

**HAVAALANI HAREKET SAHALARINDAKİ TRAFİK  
AKIŞI İÇİN FARKLI AMAÇLARI ELE ALAN ÇOK  
AŞAMALI BİR SEZGİSEL MODEL**

**Orhan Ertuğrul GÜÇLÜ**

**DOKTORA TEZİ**

**Hava Trafik Kontrol Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Cem ÇETEK**

**Eskişehir**

**Anadolu Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Şubat, 2018**

*Bu tez çalışması BAP Komisyonunca kabul edilen 1607F582 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.*

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

**Orhan Ertuğrul Güçlü** 'nın “**Havaalanı Hareket Sahalarındaki Trafik Akışı İçin Farklı Amaçları Ele Alan Çok Aşamalı Bir Sezgisel Model**” başlıklı tezi 02/02/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek “Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca, Hava Trafik Kontrol Anabilim dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

	Ünvanı Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Doç. Dr. Cem ÇETEK	.....
Üye	: Prof. Dr. Aydan CAVCAR	.....
Üye	: Prof. Dr. Nihal ERGİNEL	.....
Üye	: Doç. Dr. İnci SARIÇİÇEK	.....
Üye	: Doç. Dr. Melih Cemal KUŞHAN	.....

**Enstitü Müdürü**

## ÖZET

### HAVAALANI HAREKET SAHALARINDAKİ TRAFİK AKIŞI İÇİN FARKLI AMAÇLARI ELE ALAN ÇOK AŞAMALI BİR SEZGİSEL MODEL

Orhan Ertuğrul GÜÇLÜ

Hava Trafik Kontrol Anabilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şubat 2018

Danışman: Doç. Dr. Cem ÇETEK

Havayolu taşımacılığı küresel ölçekte faaliyet gösteren, teknolojik yenilik ve değişimlere hızlı adapte olan bir ulaşım sistemidir. Havayolu ulaşımına olan talebin her geçen yıl belirli bir oran dahilinde artması bu ulaşım sistemi için tıkanıklıkları, gecikmeleri ve hizmet aksaklıklarını da beraberinde getirmektedir. Bu sebeple havaalanlarında park pozisyonlarının etkin ve verimli kullanılması, uçaklar için manevra sahası trafiğini rahatlatarak rotaların belirlenmesi ve terminal binasındaki yolcu yürüyüş sürelerinin kısalması havayolu taşımacılığında önemli rol oynamaktadır. Bu tez çalışmasının temel amacı, yoğun havaalanlarında uçak park yerleri ve taksi yollarında yaşanan toplam gecikmeleri ve tıkanıklıkları azaltmak, inen ve kalkan uçakların taksi sürelerini kısaltarak trafik akışını hızlandırmak, körüklü ve açık park pozisyonlarının kullanım oranlarını daha dengeli paylaşmak ve hizmet verilen uçak sayısında iyileşme sağlamak için meydan hava trafik kontrol (ATC) ve ramp kulelerini koordineli şekilde kullanabilecek ve geleneksel sistemlere göre insan faktörlerinin etkilerini en aza indirebilecek ve son dakika değişikliklerine karşı çözüm üretebilecek, park yeri ve taksi rotası tahsisine yönelik dinamik kriterli sezgisel bir algoritmanın geliştirilmesidir. İlk etapta bir uçak için uygun çözüm kümesini azaltacak sezgisel eliminasyon algoritması geliştirilmiş ve park yeri kullanımı standart sapma süresi, uçak taksi ve yolcu yürüyüş süresini azaltan amaç fonksiyonları oluşturulmuştur. Daha sonra oluşturulan bu modelin GAMS çözümünden ne kadar uzaklaştığı ve bu uzaklaşmanın algoritmanın çözüm süresi bakımından ne kadar göz ardı edilebileceği araştırılmıştır. Son olarak da önerilen modelin mevcut durum ile karşılaştırması yapılmıştır. Dinamik kriterli sezgisel algoritmanın durum değişikliklerine karşı mevcut durum modeline göre hem taksi hem de yolcu yürüyüş süresi bakımından fayda sağladığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Park yeri tahsis problemi, Dinamik kriterli sezgisel algoritma, Taksi rotası tahsisi, Yer gecikmeleri, Hızlı zamanlı simülasyon, Hava trafik yönetimi

## ABSTRACT

### A MULTI-STAGE HEURISTIC MODEL WITH DIFFERENT OBJECTIVE FUNCTIONS FOR AIR TRAFFIC FLOW IN AIRPORT MOVEMENT AREAS

Orhan Ertuğrul GÜÇLÜ

Department of Air Traffic Control

Anadolu University, Graduate School of Science, February 2018

Supervisor: Assoc. Prof. Cem ÇETEK

Air travel is a transportation system operating in global scale, adapting rapidly to technological innovation and change. Every year, increasing demand for air transportation within a certain rate brings congestions, delays and disruption of services for this transportation system. For this reason, effective and efficient use of parking positions at airports, determination of routes to relieve maneuvering traffic density on taxiways and shortening of passenger walking times at the terminal building play an important role in air transportation. The main purpose of this thesis is to reduce traffic delays and congestions on taxiways and parking positions at busy airports, speed up traffic flow by shortening the taxi times of incoming and outgoing airplanes, provide more balanced distribution of open and terminal connected parking positions and improve the number of operating aircraft number using an heuristic algorithm with dynamic criteria for allocation of parking and taxi routes. This algorithm can be used in coordination with air traffic control (ATC) and ramp towers in order to minimize the effects of human factors experienced in conventional systems and produce solutions for the last-minute changes. In the first stage, a heuristic elimination algorithm was developed to reduce the appropriate set of solutions for an aircraft, and objective functions are modelled to reduce the standard deviation time of parking use, aircraft taxi and passenger walking time. This heuristic model is compared with GAMS model in terms of accuracy and computation times of results. Finally, the proposed model is compared with the current situation. It is observed that the heuristic algorithm with dynamic criteria benefits both the taxi and the passenger walking time according to the current situation model against the last minute changes.

**Keywords:** Gate assignment problem (GAP), Heuristic algorithm with dynamic criteria, Ground Delays, Fast time simulation, Air traffic management

## TEŞEKKÜR

Çalışmam süresince beni ilk günden destekleyen, bütün imkanları sağlayan, bilgi ve deneyimleriyle beni yönlendiren hocalarım olmak üzere, Sayın Prof. Dr. Aydan CAVCAR, Sayın Prof. Dr. Nihal ERGİNEL ve tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Cem ÇETEK'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın hazırlanmasında değerli katkılarından dolayı, Anadolu Üniversitesi'nde Arş. Grv. Ramazan Kürşat ÇEÇEN'e, ve verilerin temininde yardımcı olan TAV yetkililerine teşekkürlerimi sunarım.

Yoğun çalışma temposu içinde bulunduğum zaman süresince beni anlayışla karşılayarak her zaman maddi ve manevi destekleyen babam Dr. Ali GÜÇLÜ'ye, annem Suna GÜÇLÜ'ye, abim Osman Turan GÜÇLÜ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Özellikle benim her zaman yanımda olan, bütün zorlukları benimle birlikte göğüsleyen ve bundan sonraki hayatımda yanımda olacağına tereddütsüz inandığım çok değerli eşim Leyla Pınar GÜÇLÜ'ye sonsuz şükranlarımı sunarım.

Orhan Ertuğrul GÜÇLÜ

Eskişehir, 2018

## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Anadolu Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programıyla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Orhan Ertuğrul Güçlü

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

BAŞLIK SAYFASI.....	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET .....	iii
ABSTRACT .....	iv
TEŞEKKÜRLER.....	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ .....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
TABLolar DİZİNİ .....	xi
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Problemin Tanımı .....	1
1.2. Çalışmanın Kapsamı .....	4
1.3. Çalışmanın Organizasyonu .....	5
2. KAYNAK TARAMASI.....	6
2.1. Uçak Park Yeri Tahsisi Problemi (UPTP).....	6
2.2. Taksi Rotası Planlama Problemi .....	9
2.3. Bütünleşik Çalışmalar .....	10
3. YÖNTEM .....	12
3.1. Genel Algoritma .....	12
3.2. “Alt-Algoritma 1”: Park Yeri Tahsisi Algoritması.....	14
3.3. “Alt-Algoritma 2”: Taksi Rotası Tahsisi Algoritması .....	17
4. MATEMATİKSEL MODELLEME.....	22
4.1. Yolcu Yürüyüş Süresi Amaç Fonksiyonu ( $F_{PW}$ ):.....	25
4.2. Park Yeri Kullanım Süresi Amaç Fonksiyonu ( $F_{GU}$ ): .....	26
4.3. Taksi Yolu Tahsisi Amaç Fonksiyonu ( $F_{AT}$ ): .....	26
5. AHP KARAR VERME MODELİ VE FAKTÖRLER.....	28
6. SİMÜLASYONLAR.....	33
6.1. Çalışmanın Aşamaları .....	33
6.2. Modelin Kurulumu .....	35

6.2.1. Kabuller .....	35
6.2.2. Simülasyonda Kullanılan Performans Ölçütleri.....	38
6.2.3. Havaalanının Modellenmesi .....	39
6.3. Trafik Verilerinin Değerlendirilmesi .....	44
6.4. Senaryolar .....	45
7. BULGULAR.....	50
7.1. Amaç Fonksiyonlarının GAMS ve SA Park Yeri Tahsislerinin CAST Üzerinde Karşılaştırılması.....	50
7.1.1. İnen ve kalkan uçak taksi süreleri karşılaştırması .....	50
7.1.2. Havaalanı ve park yeri kullanım süreleri karşılaştırması ....	53
7.2. Önerilen Algoritmanın Üç Farklı Senaryoda Mevcut Durum ile Karşılaştırılması .....	54
8. TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	59
KAYNAKÇA .....	61
EKLER .....	66
EK-1: Analitik Hiyerarşi Süreci.....	66
EK-2: AHP Katılımcılarına Uygulanan Karşılaştırma Matrisi Anketi	78
ÖZGEÇMİŞ .....	82



## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 1.1. Havaalanı sistemi bileşenleri [3] .....	2
Şekil 3.1. Park yeri ve taksi rotası tahsisi genel algoritması .....	13
Şekil 3.2. Park yeri tahsisi algoritması .....	16
Şekil 3.3. Karar kriterleri öncelik hiyerarşisi .....	17
Şekil 3.4. “Alt-Algoritma 2”: Taksi rotası tahsisi algoritması .....	18
Şekil 3.5. 3 Boyutlu taksi yolları işgaliye matrisi.....	19
Şekil 3.6. 3 Boyutlu taksi rotası işgaliye matrisinin hesaplamasına bir örnek .....	20
Şekil 4.1. Terminal binasındaki referans noktaya olan yolcu yürüyüş güzergâhları.....	26
Şekil 6.1. Tez süresince izlenen metodoloji .....	33
Şekil 6.2. GAMS ve önerilen SA'nın park yeri tahsisi sonuçlarının karşılaştırılması ...	34
Şekil 6.3. Kombinasyonel park yeri ve taksi rotası tahsis algoritması veri hattı şeması	37
Şekil 6.4. İstanbul Atatürk Havaalanı yerleşim planı.....	40
Şekil 6.5. İstanbul Atatürk Havalimanı apron, terminal ve park yeri konumu.....	41
Şekil 6.6. CAST ile modellenen İstanbul Atatürk Havalimanı plan görüntüsü .....	43
Şekil 6.7. İstanbul Atatürk Havalimanı modeli apron bölgesi görüntüsü .....	43
Şekil 6.8. 8 Ağustos 2014 tarihinde gerçekleşen trafiklerin saatlik dağılımı bu dağılıma uygun üstel dağılım ile üretilmiş on adet senaryonun trafik dağılımı .....	45
Şekil 6.9. Önerilen kombinasyonel park yeri taksi rotası tahsisi algoritması SA ve GAMS sonuçlarının karşılaştırmasının yapılması için izlenen adımlar .....	47
Şekil 6.10. Önerilen park yeri ve taksi rotası tahsisi modelinin sınanması sürecinde yapılan işlemler.....	48
Şekil 7.1. Taksi süresi amaç fonksiyonuna göre inen ve kalkan taksi süresi (AXIT-AXOT) .....	51
Şekil 7.2. Yolcu yürüyüş süresi amaç fonksiyonuna göre inen ve kalkan uçak taksi süresi (AXIT-AXOT) .....	51
Şekil 7.3. Park yeri kullanımı standart sapması amaç fonksiyonuna göre inen ve kalkan uçak taksi süresi (AXIT) .....	52
Şekil 7.4. Ortalama havaalanı kullanım süresi (AAUT) .....	53
Şekil 7.5. Park yeri kullanım süresi standart sapması karşılaştırması(AGUT) .....	53
Şekil 7.6. Park yeri kullanım süresi standart sapması karşılaştırması - maks., min. ve ort. (AGUT).....	55

<b>Şekil 7.7.</b> Havaalanı kullanım süresi karşılaştırması (AAUT) .....	<b>56</b>
<b>Şekil 7.8.</b> İnen ve kalkan uçak taksi süreleri ortalaması (AXIT-AXOT) .....	<b>56</b>
<b>Şekil 7.9.</b> Ortalama yolcu yürüyüş süresi karşılaştırması .....	<b>57</b>

## TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Tablo 3.1.</b> (3.1) denkleminin rastgele ve değerlerine karşılık inen değerleri .....	21
<b>Tablo 5.1.</b> Beş noktalı değer skalası [52] .....	30
<b>Tablo 5.2.</b> Ana kriterler örnek karşılaştırma matrisi .....	30
<b>Tablo 5.3.</b> Yolcu yoğunluğu kriteri alt-kriterler örnek karşılaştırma matrisi.....	30
<b>Tablo 5.4.</b> Yolcu sayısı alt-kriteri alt-alt-kriterleri örnek karşılaştırma matrisi.....	31
<b>Tablo 5.5.</b> Trafik yoğunluğu kriteri alt-kriterleri örnek karşılaştırma matrisi .....	31
<b>Tablo 5.6.</b> Park yeri kullanım süresi kriteri alt-kriterleri karşılaştırma matrisi .....	31
<b>Tablo 5.7.</b> AHP ile elde edilen park yeri tahsisi kriter puanlarının 5 farklı durum için aldığı değerler.....	32
<b>Tablo 7.1.</b> Replikasyonların matematiksel model ve sezgisel algoritma sonuçlarının karşılaştırılması .....	50
<b>Tablo 7.2.</b> Senaryolara göre amaç fonksiyonu ağırlık katsayılarının aldığı değerler ....	54

## KISALTMALAR DİZİNİ

AAUT	:	Gerçek Havaalanında Bulunma Süresi
AGUT	:	Gerçek Park Yeri Kullanım Süresi
AIP	:	Aeronautical Information Publication (Ulusal Havacılık Yayını)
AHP	:	Analytical Hyerarchy Process (Analitik Hiyerarşi Süreci)
AMAN	:	Arrival Manager (İniş Yönetimi Asistanı)
ATC	:	Air Traffic Control (Hava Trafik Kontrol)
AXIT	:	Gerçek İniş Taksi Süreleri
AXOT	:	Gerçek Kalkış Taksi Süreleri
CAST	:	Collaborative Airport Simulation Tool ( İşbirlikçi Havaalanı Simülasyonu Aracı)
DHMİ	:	Devlet Hava Meydanları İşletmesi
DMAN	:	Departure Manager (Kalkış Yönetimi Asistanı)
EUROCONTROL	:	Avrupa Hava Seyrüsefer Emniyeti Teşkilatı
F <sub>PW</sub>	:	Yolcu Yürüyüş Süresi Amaç Fonksiyonu
F <sub>AT</sub>	:	Uçak Taksi Süresi Amaç Fonksiyonu
F <sub>GU</sub>	:	Park Yeri Kullanım Süresi Standart Sapması Amaç Fonksiyonu
GAP	:	Gate Assignment Problem
ICAO	:	International Civil Aviation Organization (Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü)

MO-TA	:	Modern Taxing (Modern Taksileme)
PYTMM	:	Park Yeri Tahsisi Matematiksel Modeli
SA	:	Sezgisel Algoritma
SESAR	:	Single European Sky ATM Research (Tek Avrupa Gökyüzü Hava Trafik Yönetimi Araştırma Konsorsiyumu)
SMAN	:	Surface Manager (Yer Yönetimi Asistanı)
TAV	:	Tepe-Akfen-Vie
TRACC	:	Uçak Taksi Rotası Yaratma ve Kontrolü
TRPP	:	Taksi Rotalama Planlama Problemi
UPTP	:	Uçak Park Yeri Tahsisi Problemi
SA	:	Sezgisel Algoritma

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Problemin Tanımı

Havayolu taşımacılığı günümüzde ulaşım türleri arasında en yüksek büyüme oranıyla gelişen sektörlerden biridir. Eurocontrol (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmaya göre 2023 yılına kadar hava trafiğinin Avrupa genelinde %1,5 ve Türkiye’de ise %3,1 artacağı öngörülmektedir [1]. Havayolu taşımacılığında bu hızlı talep artışı havaalanlarında sürekli ve giderek sıklaşan tıkanıklıklar, gecikmeler ve hizmet aksaklıkları gibi sorunlara neden olmaktadır. Havaalanlarında yaşanan bu olumsuzluklar aynı zamanda hava trafik sisteminin tüm diğer bileşenlerini de etkiler niteliktedir. Özellikle metropollerdeki büyük ölçekli havaalanlarındaki uçak ve yolcu trafik akışının verimsiz veya koordinasyonsuz yönetimi nedeniyle yaşanan kapasite problemleri uçuşların bağlantılı olduğu diğer havaalanları ve hava sahalarında da büyük gecikmelere ve ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Havaalanlarındaki kapasite gelişiminin öngörülen bu sürekli talep artışının gerisinde kalma olasılığı hava ulaşımının geleceğini tehdit eden faktörlerin başında gelmektedir. Bu sorunların giderilmesinde havaalanlarında hizmet verilen uçaklara uygun park pozisyonlarının ve taksi rotalarının atanması kritik bir rol oynamaktadır. Bu nedenle havaalanlarındaki uçak park yeri ve taksi rotası tahsis süreçlerinde hava trafik akışının ağırlıkları dinamik olarak değişen çoklu amaç fonksiyonları kullanarak eniyilemesi bu tez çalışmasının konusu olarak belirlenmiştir.

Havaalanları en basit şekilde tamamen veya kısmen hava araçlarının iniş, kalkış ve yüzey hareketleri için kullanılmak üzere tüm bina, tesisat ve teçhizatı içeren karada veya suda belirlenmiş alanlar olarak tanımlanmaktadır [2]. Ancak bu tanımın da ötesinde, havaalanları hava seyrüsefer hizmet sağlayıcısı, havaalanı işleticisi, havayolu ve yer hizmetleri işletmeleri başta olmak üzere çok sayıda aktörün farklı kullanıcılara (uçak, yer araçları, yolcu ve kargo trafiğine) hizmet vermek üzere faaliyet gösterdiği karmaşık taşımacılık sistemleridir. Havaalanı sistemini oluşturan bileşenler hizmet sundukları kullanıcının türüne göre kara tarafı ve hava tarafı olmak üzere iki ayrı kategori altında sınıflandırılırlar (Şekil 1.1) [3].



Şekil 1.1. Havaalanı sisteminin bileşenleri [3]

Hava tarafı uçakların iniş, kalkış ve yer hareketleri ile havaalanı etrafındaki uçuş hareketlerine ilişkin operasyonların gerçekleştirildiği kontrol bölgesi ve hareket sahası bileşenlerinden meydana gelir. Kontrol bölgesi yol hava sahası ve terminal hava sahalarından (TMA) devralınan veya onlara devredilecek uçakların havaalanı üzerindeki ve çevresindeki uçuşlarının kontrolü için oluşturulmuş yerel hava sahasıdır. Bu hava sahası dikeyde su veya yer seviyesine göre en az 700 ft (200 m) ve yatayda havaalanı merkezine göre en az 5 NM (9,3 km) olacak şekilde belirlenmiş bir hacmi kapsar. Hareket sahası ise iniş, kalkış ve taksi hareketlerinin gerçekleştirildiği pist sistemi, taksi yolu sistemleri, apron, terminal binasına köprüle bağlı ve açık park yerlerinde oluşmaktadır [4]. Kara tarafı ise havaalanına yer ulaşım sistemi ile inen ve kalkan yolcu, bagaj ve kargo operasyonlarının gerçekleştirildiği terminal binaları ve kapılar, araç dolaşım ve park alanlarından meydana gelir.

Hava ve kara tarafında yürütülen operasyonlar birbirleriyle yakın bir etkileşim içindedir. Özellikle terminal binaları içindeki yolcu ve kargo trafiği ile hareket sahalarındaki uçak trafiği arasında kesintisiz geçişin sağlanması operasyonların bütünü açısından önemlidir. Hareket sahalarındaki uçakların taksi yolu veya park yerinde

yaşayacakları herhangi bir gecikme terminal binalarında artan yolcu kuyruklarına, beklemelere, tıkanıklıklara aktarmalı uçuşların kaçırılmasına dolayısıyla müşteri memnuniyetsizliğine ve ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Benzer şekilde terminal binasındaki yolcu operasyonlarındaki herhangi bir aksaklıklar da hareket sahalarındaki uçakların kalkış öncesi ve iniş sonrası yerde gecikme almalarına, havada bekletilmelerine, rota ve uçuş seviyesi değişikliklerine; uçuş programı ve filo planlamasında aksaklıklara yol açarak havayolu işletmeleri için maliyet risklerini artıracaktır [5]. Her iki taraftaki operasyonların verimli ve sorunsuz şekilde yürütülebilmesi etkili, dinamik ve eşgüdümlü bir uçak park yeri yönetim ve taksi yolu rota planlama sürecini gerektirmektedir.

Uçak park yeri yönetimi havaalanı terminal, apron ve ramp sistemlerinin, teçhizatının ve kaynaklarının planlanması, kontrolü ve dağıtımı ile ilgili tüm faaliyetleri kapsar [6]. Bu faaliyetlerin en kritiği havaalanına inen uçaklara etkili şekilde terminal bağlantılı veya açık park yeri planlama ve tahsis sürecidir. Bu süreç hava alanındaki uçakların yer hareketleri akışı ve iniş- kalkış yönetimi, terminal binası yolcu organizasyonu ve yer hizmetleri operasyonlarının işleyişini etkilemektedir. Bu fonksiyonlardan herhangi birisi park yeri tahsisi nedeniyle aksamaya uğrarsa, bu problem uçak park yeri tahsisi problemi (UPTP) olarak tanımlanmaktadır [7]. Uçakların havaalanı tesisleri arasındaki taksi yollarındaki hareketlerinin herhangi bir çakışma olmadan emniyetli ve etkili şekilde yürütülememesi ise taksi rotası planlama problemi (TRPP) olarak adlandırılmaktadır [8]. Taksi rotası planlama problemi park yerlerinin planlanan şekilde kullanımını etkilediği gibi, yeterli olmayan park yeri planlama ve tahsisi de havaalanının genel kullanım kapasitesinin ve taksi yollarındaki trafik akışının verimli bir şekilde kullanımının önüne geçmektedir.

Günümüzde havaalanlarındaki uçakların park yeri tahsisi ve taksi yollarındaki rota planlaması ayrı birimler tarafından gerçekleştirilmektedir. Uçak park yeri planlaması ve tahsisi havaalanı ramp ünitelerindeki operatörler tarafından uçuş planı verilerine dayalı tahminler esas alınarak yapılmaktadır. Hareket sahalarında bulunan tüm uçak ve yer araçlarının trafiği ise meydan kontrol kulelerindeki hava trafik kontrolörleri tarafından yürütülmektedir. Hava trafik kontrolörlerinin ve ramp ünitelerindeki operatörlerin performansını artırarak kapasitesi ve trafik akışı problemlerini azaltacak karar destek sistemlerinin kullanılmasına rağmen, bu sistemler park yeri tahsisi taksi rotası tahsisi



sürecini bütünleşik olarak ele almamaktadır. Her iki birim ve dolayısı ile manevra sahalarındaki uçak yer trafiği ve terminal binalarındaki yolcu akışı arasında bütünleşik ve dinamik bir eşgüdümü sağlayan bir planlama ve tahsis sürecine ihtiyaç duyulmaktadır.

## 1.2. Çalışmanın Kapsamı

Bu tez çalışmasının amacı yoğun havaalanlarında uçak park yerleri ve taksi yollarında yaşanan toplam gecikmeleri ve tıkanıklıkları azaltmak, inen ve kalkan uçakların taksi sürelerini kısaltarak trafik akışını hızlandırmak, körüklü ve açık park pozisyonlarının kullanım oranlarını daha dengeli paylaşmak ve hizmet verilen uçak sayısında iyileşme sağlamak için meydan hava trafik kontrol (ATC) ve ramp kulelerini koordineli şekilde kullanılacak ve geleneksel sistemlere göre insan faktörlerinin etkilerini en aza indirebilecek ve son dakika değişikliklerine karşı çözüm üretebilecek, park yeri ve taksi rotası tahsisine yönelik çok amaçlı, bütüncül ve dinamik bir eniyileme algoritmasının geliştirilmesidir.

Hava trafik akışını eniyilemesi için üç ayrı amaç fonksiyonu seçilmiştir. Bunlar havaalanına inen ve kalkan yolcuların uçak ve terminal arasındaki toplam aktarma süresi ( $F_{PW}$ ); inen ve kalkan uçakların hareket sahasındaki toplam taksi süresi ( $F_{AT}$ ); ve bir park yerinin havaalanı ortalama park yeri kullanım süresinden sapması ( $F_{GU}$ ) olarak seçilmiştir. Her bir amaç fonksiyonunun katsayısı, havaalanı kara ve hava tarafındaki elemanların kapasitesi, kullanım durumu ve operasyonel koşullara bağlı olarak dinamik bir şekilde değişebilmektedir. Yolcuların uçak ve terminal arasındaki toplam aktarma süresi; terminal bölgesindeki yolcu akış yönü, tıkanıklıklar ve hizmet dışına alınan alanlar, terminal içindeki kapılara olan yürüyüş mesafeleri, açık park pozisyonlarına olan otobüs aktarma süreleri gibi bir dizi faktör tarafından etkilenmektedir. İnen ve kalkan uçakların hareket sahasındaki toplam taksi süresi ise; pist ile kapılar ve açık park pozisyonları arasındaki mesafe, taksi yollarındaki uçakların trafik akış yönü, inşaat veya kaza nedeniyle taksi yollarındaki kapalılık durumu, hız tahditleri, apron içi taksi yollarındaki geri-itme (push-back) manevrası yapan uçaklarla olan çakışmalar gibi birtakım kısıtlayıcılara bağlı olarak değişmektedir. Park yeri kullanım oranı ise; park yeri işgaliye (turn-around) süresi ve hizmet verilen uçak sayısına bağlıdır. Park yeri işgaliye süresi ise; hizmet alacak uçakların tipi, yolcu sayısı, park yeri tercihi, hava yolu işleticisinin iş modeli, yer hizmetleri araçlarının ilgili park yerine intikal ve hizmet verme sürelerine bağlıdır. Bu amaç

fonksiyonu ile park yerleri kullanım oranlarının belirli bir eşik seviyesinin altına düşürülmeden hava alanı genelinde daha dengeli bir kaynak kullanım kontrolü hedeflenmektedir.

Hava alanlarının hava tarafında uçakların yer hareketlerinin optimum şekilde sürdürülebilmesi için park yeri kullanım oranlarının artırılması ve terminal binasındaki yolcu akışının herhangi bir tıkanıklığa yol açmadan hava alanı operasyonlarının sürdürülebilmesi hedeflenmektedir. Bu kapsamda uçakların park yeri tahsisleri yapılırken eş zamanlı olarak uçakların taksi rotalarının da tahsisi yapılmaktadır. Bu sayede hareket sahasındaki uçakların manevraları esnasında olası yaşanacak çakışmaların önüne geçilebilmektedir.

### **1.3. Çalışmanın Organizasyonu**

Bu tez çalışmasının ilk bölümde problemin tanımlanması ve çalışmanın kapsamı ve organizasyonu tanımlanmıştır. İkinci bölümde ilk bölümde belirtilen problemler ile ilgili kaynak taraması ortaya konmuştur. Üçüncü bölümde kullanılan yöntem detayları ile anlatılmıştır. Dördüncü bölümde park yeri tahsisinde kullanılan matematiksel model anlatılmıştır. Sonraki bölümde çok amaçlı fonksiyonun ağırlıkları Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ile belirlenmiştir. Altıncı bölümde önerilen yöntemin simülasyonlarının hangi aşamalarda analiz edildiği hangi metotların kullanıldığı, analiz için gerekli simülasyon modellemesinin yapılması, İstanbul Atatürk Havalimanı için referans olarak alınacak trafik verilerinin analizi ve son olarak da simülasyon senaryoları oluşturulmuş ve detayları ile anlatılmıştır. Yedinci bölümde belirli parametreler çerçevesinde önerilen modelin referans model ile karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Son bölümde önerilen model hakkındaki görüş ve önerilerimiz paylaşılmış ve mevcut havaalanlarında nasıl kullanılacağı hakkında bilgi verilmiştir.

## 2. KAYNAK TARAMASI

Hava trafik kontrol sisteminin faaliyet esnasında uçaklara hizmet verebilmesi yeteneği sistem kapasitesi olarak tanımlanabilir [9]. Bu sistemin bir bileşeni olan havaalanlarının kapasitesi ise belli bir zaman döngüsünde uçuş operasyonlarına (iniş ve kalkış trafikleri) hizmet verebilmesi için sahip olduğu fiziksel kabiliyetini ifade eder [10]. Bir havaalanının kapasitesini değerlendirebilmek için ona ait hava ve kara tarafı elemanlarının kapasitesini ayrı ayrı incelemek gerekir. Ancak yapılan çalışmalar havaalanı sisteminin toplam kapasitesi çoğunlukla hava tarafı elemanlarına ait fiziksel ya da operasyonel kısıtlayıcıları tarafından sınırlandırıldığını göstermektedir [11]. Park yeri tahsisi ve taksi yolu planlaması da bu kısıtlayıcılardan kabul edilmektedir. Bu kısıtlayıcılar statik planlamanın getirdiği birtakım dezavantajlardan kaynaklı olmakla birlikte aynı zamanda insan faktörlerine de dayanmaktadır. Bu bölüm park yeri tahsisi problemi, taksi yolu planlaması problemi, bütünleşik çalışmalar olmak üzere üç başlık altında incelenecektir.

### 2.1. Uçak Park Yeri Tahsisi Problemi (UPTP)

Park yeri planlaması ve tahsisi konusunda uçuş planlarını verilerine dayalı tahminleri esas alarak çalışan çeşitli statik çözüm yöntemleri havaalanları tarafından kullanılmaktadır. Her uçak için havaalanının etkinliğini ve/veya yolcuların havaalanı kullanımının kolaylığını eniyilemek hedefleri ile mevcut fiziksel ve operasyonel kısıtlayıcılar dâhilinde park yeri tahsisinin gerçekleştirilmesi, modellenmesi, çözümü ve uygulanması açısından bir dizi zorluğu beraberinde getiren problem Uçak Park Yeri Tahsisi Problemi (UPTP) olarak adlandırılır. UPTP, içerdiği çok sayıda değişken (park yeri ve uçak sayısı, park yerlerinin konumu ve konfigürasyonu, hizmet verilen yolcu sayısı, uçuş hizmetinin türü vb.), kısıtlayıcı (uçak gövde uzunlukları ve kanat açıklıkları, uçakların iniş ve kalkış zamanları, uçak işleticilerinin park yeri tercihleri, sunulan yer hizmetlerinin türü, hava trafik kural ve prosedürleri vb.), belirsizliğin (uçakların performansındaki farklılık, insan faktörleri, beklenmeyen son dakika gecikmeleri, acil durumlar vb.) bulunması ve hedef fonksiyonların birbirleri ile çatışabilmesi nedeniyle karmaşık bir yapıdadır.

Bu problemin çözümü konusunda çok sayıda araştırma literatürde mevcuttur. Bu konuda Braaksma ve Shortreed (1971), Babic vd. (1984), Bandara ve Wiransighe (1992) ve Yan ve Huo (2001) tarafından yapılan ilk çalışmalar çeşitli matematiksel programlama

tekniklerini kullanarak terminaldeki yolcular için en kısa yürüme mesafelerine göre park yeri ataması yapan yaklaşımları içermektedir [12-15]. Bu tekniklere dayalı geliştirilen yaklaşımlar arasında hava tarafı operasyonlarına odaklanan çalışma sayısı oldukça kısıtlıdır. Bu konuda sadece Ruperto ve Francesc (2007) taksi sürelerinin azaltılmasına yönelik bir yaklaşım geliştirirken ve Neuman ve Atkin (2013) havaalanında uçak park yeri tahsisi yaparken uçakların taksi hareketlerindeki olası çakışmaları ve karşılaşmaları göz önünde bulundurmıştır [16, 17]. Ancak bu çalışmalar tüm taksi yolu açısından çok sadece uçakların push-back (park yerinden çıkma) sırasında taksi yollarında olası çakışmaların etkilerini incelemekle sınırlı kalmıştır. Uçak park yeri tahsisi problemi için geliştirilen matematiksel programlama teknikleri kesin çözüm sağlayabilmekle beraber bu yöntemlerin temel dezavantajı bu çözümü bulmak için gereken hesaplama sürelerinin pratik uygulamalar açısından özellikle problem ölçeği büyüdüğünde kabul edilemeyecek kadar uzun olmasıdır.

Matematiksel programlama tekniklerinin bu dezavantajı nedeni ile birçok araştırmacı sezgisel yöntemler kullanarak park yeri tahsisi problemine kabul edilebilir sürede yaklaşık çözümler bulma konusuna yönelmişlerdir. Sezgisel yöntemlerle yolcu yürüme mesafesini azaltmaya yönelik havaalanı park yeri tahsisi çalışmalarına örnek olarak melez doğrusal programlama ve açgözlü arama [18]; çoklu periyodik tam sayılı programlamaya dayalı sezgisel yaklaşım [19]; melez benzetilmiş tavlama ve açgözlü arama [20]; kesikli parçacık sürü [21] ve karınca kolonisi yöntemi [22] örnek verilebilir. Görüldüğü üzere bu çalışmalarda hava tarafı kısıtlayıcılarından olan uçakların taksi yolu çakışmaları ve inen uçakların uçuş süresince yaşadıkları gecikmeleri göz ardı edilmiştir.

Bir grup araştırmacı ise gerek daha farklı tipteki park yeri tahsisi için sağladığı esnek kullanım olanağı [23] ve gerekse sezgisel yaklaşımlara göre GAMS çözümleri bulmadaki üstünlüğü nedeniyle [24] üstsezgisel (meta-heuristic) yöntemleri benimsemişlerdir. Bunlara örnek olarak, Gu ve Chung (1999) tarafından park yerlerinin kullanıma hazır hale getirilmelerindeki gecikmeleri azaltan genetik algoritmaya dayalı global arama tekniği yaklaşımı; Xu ve Bailey (2001) tarafından geliştirilen tabu arama (taboo search) tekniğini kullanan üstsezgisel yaklaşımı; Yan vd. (2002) tarafından önerilen stokastik uçuş gecikmelerinin statik park yeri tahsisi üzerindeki etkilerini inceleyen çoklu aç gözlü arama yaklaşımı; Ding vd. (2004) tarafından dengelenmemiş park yeri tahsisi

problemi için önerilen açgözlü arama ve tabu arama karma tekniğine dayalı üstsezgisel yaklaşım ve Cheng vd. (2012) tarafından genetik algoritma, tabu arama ve benzetilmiş tavlama yöntemleri olmak üzere üç ayrı üstsezgisel tekniğe dayalı melez yaklaşımı verilebilir [25-29]. Şeker ve Noyan (2012) park yeri tahsisi problemini büyük ölçekli karma tam sayı programlama ve tabu araması tekniğini birleştiren bir model tasarlamışlardır [30]. Aynı zamanda İstanbul Atatürk Havalimanı için Genç vd. (2012) tarafından sezgisel bir algoritma olan Big Bang-Big Crunch metodu ile park yeri tahsisi üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir [31]. Fakat bu sezgisel çalışmalar park yeri tahsisinin operasyon öncesi Gantt çizelgesi üzerine belirtilen metotlarla işlenmesi üzerine yapılmıştır. Operasyon öncesi yapılan atamalar operasyon süresince yaşanan son dakika gecikmelerine karşı herhangi bir değişiklik sunamadıkları için park yeri tahsisi problemini tam anlamıyla çözememektedirler.

Bir dizi araştırmacı ise hava alanlarındaki park pozisyonu atama dinamiğini ilgili tüm operasyonel kısıtlayıcılar ile gerçek zamanlı çözebilmek amacıyla bilgi-tabanlı sistemler ve simülasyon yaklaşımları üzerine çalışmalar yapmışlardır. Bilgi-tabanlı sistemler her bir uçuş için park pozisyonu ve uçakların dinamik durumlarını, yolcu ve bagaj hareketlerini, uçak tiplerini, hava alanı işletme kurallarını, havayolu taleplerini hesaba katan bir ana karar destek sistemi içerir. Bu ana karar destek sistemi sürekli olarak bağlı olduğu dış veri tabanlarından yolcu ve/veya uçak trafiğine ilişkin bilgileri temin eder. Bilgi-tabanlı sistemlere Brazile ve Swigger (1988) ve Gossling (1990) tarafından havaalanında yolcu akışı, yolcu ve bagaj transfer rotaları gibi kara tarafı kısıtlayıcıları ve uçakların yer çakışmaları, park yeri ve uçakların fiziksel uygunlukları gibi hava tarafı kısıtlayıcılarını da göz önünde bulunduran park yeri tahsisi çözümünde kullandıkları yaklaşımlar örnek verilebilir [32, 33]. Bilgi-tabanlı yaklaşımların sağladığı gerçekçi analiz olanaklarına ek olarak park yeri tahsisinin kesin olmayan bilgileri ve çoklu karar kriterlerini barındırması nedeniyle simülasyon yöntemlerine de başvurulmuştur. Bu yaklaşımlara Hamzawi (1986) tarafından yapılan havaalanlarında farklı park yeri tahsisi stratejilerini değerlendirerek günlük park yeri tahsisi planlaması; Cheng (1998) tarafından tanımlanan simülasyon ve bilgiye dayalı sistemleri bütünleştiren kurala dayalı reaktif simülasyon modeli örnek gösterilebilir [34, 35].

## 2.2. Taksi Rotası Planlama Problemi

Taksi Rotası Planlama Problemi (TRPP) havaalanlarında taksi yollarında uçakların yaşadığı gecikme, çakışma ve taksi yolunun uzaması gibi birtakım problemlerin bütününe kapsamaktadır. Atkin ve ark. [36] 2010 yılında havaalanlarında yer problemlerini tanımlamak adına hazırladıkları çalışmada, havaalanlarındaki uçak yer hareketlerini kısıtlayan faktörleri; iniş ve kalkış uçaklarının zamanlama problemleri, ilgili uçağın rotasını takip edip etmediği, uçaklar arasındaki ayırma minimaları ve uçak hareket hızları olarak tanımlamıştır.

Taksi rotası planlama problemi üzerine yapılan en güncel çalışmalara Tek Avrupa Gökyüzü Hava Trafik Yönetimi Araştırma Konsorsiyumu'nun (SESAR) uzun dönemli araştırma programı kapsamında yürütülen Uçak Taksi Rotası Yaratma ve Kontrolü (TRACC) [37] ve Modern Taksileme (MO-TA) [38] projeleri örnek verilebilir. Her iki proje de havaalanlarında uçaklar için çakışmasız taksi rotalarını ve bunlara ilişkin hızları belirleyerek hava trafik kontrolörlerine tavsiye olarak sunan karar destek araçlarının geliştirilmesine yöneliktir. Ancak bu çalışmalarda park yeri planlaması ve tahsis sürecinin taksi yolu planlaması üzerindeki etkileri ele alınmamıştır.

SINTEF Araştırma Grubu hava trafik kontrol optimizasyonu adı altında üstsezgisel arama algoritmaları kullanarak uçaklara taksi rotalarını atayan bir algoritma üzerinde çalışmaya devam etmektedir [39]. Bu çalışma da sadece taksi rotası tahsisi üzerine bir çalışma olduğu için diğer kısıtlayıcıların etkileri uçaklara taksi süresi artış cezası olarak yansımaktadır.

Zhou ve Jiang (2015) yaptıkları çalışmada statik sezgisel taksi rotası tahsis algoritması ortaya koymuşlardır [40]. Bu algoritma ile uçakların ilgili havalimana operasyon düzenlemeden diğer uçaklarla olası çakışmalarını göz önünde bulundurarak taksi rotası tahsisi yapmaktadır. Jiang ve Ark. park yeri ile pist arasında uçakların taksi rotalarını genetik algoritma ile belirleyerek pist kalkış planlaması verimini artırmayı, taksi ve gecikme sürelerini kısaltmayı hedeflemiştir [41]. Guepet ve Ark. taksi rotası tahsisinde taksi sürelerini göz önünde bulundurarak en kısa rotanın tahsisini gerçekleştirecek matematiksel modelin karmaşık tamsayı programlama methodu ile çözümünü yapmışlardır

[42]. Fakat bu çalışmaların ortak eksiklikleri çevrimiçi çalışmamaları ve park yeri tahsisi operasyonları ile entegre çözüm üretmemeleridir.

Bu çalışmalardan da görüldüğü üzere havaalanı kontrol sahasının, hava tarafı elemanlarının, terminal binası yolcu akış ve sürelerinin ve park yerlerinin tümünü içerecek derece büyük problemin hızlı simülasyon ortamına uyarlanması ve genel algoritmanın etkilerinin sınanmasının yanı sıra karar kriterlerinin tasarımı ve kalibrasyonu için de hızlı zamanlı simülasyonların kullanılacak olması bu çalışmayı önceki örneklerden farklı kılmaktadır.

### **2.3. Bütünleşik Çalışmalar**

Park yeri ve taksi rotasının bütünleşik çalışılması ile ilgili literatürde çok fazla çalışma bulunmamaktadır. İniş uçaklarının iniş zamanlarının değişmesi hem park yeri hem de taksi yolu planlamasını eş zamanlı olarak etkilemektedir. Bu sebeple literatürde bu iki planlamaya entegre olarak çözüm üreten çalışmalar da mevcuttur.

Güncel çalışmalara örnek olarak Kim ve ark. [43] taksi süresi ve yolcu yürüyüş süresini kısaltan bir model tasarlamışlardır. Bu çalışmada kullandıkları matematiksel modelde taksi süresi ve yolcu transfer süresini minimum yapan park yerinin uçağa tahsis edilmesini hedeflemişlerdir. Yine yakın zamanda yapılan çalışmalardan olan hava alanında taksi planlaması ve bunun pist kalkış planlamasına etkisi Smeltink ve ark. [44] tarafından sonuçlandırılmıştır. Fakat bu çalışmalar sonucunda elde edilen yöntemler çevrimdışı çalışmaları nedeniyle gerçek operasyon uygulamalarına uyarlanması konusunda birtakım zorluklarla karşılaşmaktadır. Pavese ve ark. [45] tarafından havaalanlarına inen uçakların iniş sıralamalarının yapılması için kullanılan sistem AMAN, havaalanındaki uçak yer hareketlerinin belirlenmesi için kullanılan sistem SMAN ve kalkış uçakların sıralamasını yapan DMAN sistemlerinin entegre olarak çalışmasını sağlayacak sezgisel bir algoritmanın CPLEX üzerinde sınanması yapılmıştır. Bu önerilen algoritmada uçakların gerçek takoz çekme ve teker koyma zamanları referans alınarak “İlk İnen İlk Hizmeti Alır” prensibi ile uçaklara operasyon izinlerinin verilmesi ya da gecikme yaşamaları durumunda sistem içindeki diğer uçakların operasyonlarına etki etmemeleri için yeni bir takoz çekme zamanı belirlenerek ilgili uçaklara SLOT verilmesi ile havaalanındaki son dakika değişiklikleri kontrol altında tutulur. Chua [46] yaptığı Avrupa Birliği çalışmasında uçakların havaalanlarında taksi hareketlerini otomatik çekme araçları tarafından yapılması ile

kontrolör iş yükünün azaldığını, uçakların taksi süresince motorlarını çalıştırmadıkları ve rota öneren bir sezgisel algoritma ile taksi süreleri azaldığı için uçak yakıt tüketimlerinin de aynı oranda azaldığını gözlemlemiştir.

Park yeri ve taksi rotası tahsisinde son dakika değişikliklerinin çözümünü gerçek zamanlı olarak tahsis sürecine dâhil edecek bir sistemin geliştirilmesi havaalanının verimliliğini ve performansını arttıracaktır. Özellikle Güçlü ve Çetek yaptığı çalışmalarda hava alanı park yeri ve taksi rotası tahsisinde önerdiği yöntem ile İstanbul Atatürk Havalimanı'nda uçak başına ortalama 6 saniyelik taksi süresi kazancı, park yerleri işgaliye sürelerinin homojen dağılması ile park yeri kullanım verimliliğinin arttığını gözlemlemiştir [47, 48]. Bu çalışmalarda da çevrimiçi çalışan algoritmaların hava alanı yönetiminde fayda sağladığı görülmektedir. Ancak çalışma algoritma içerisinde sadece taksi süresini kısaltmaya yönelik tek bir eniyileme metodu bulundurması ve kara tarafı kısıtlayıcılarını tahsis sürecinde değerlendirmeye katmaması havaalanı operasyonlarının bir bütün olarak değerlendirilerek tahsis işleminin yapılmasının önüne geçtiği görülmüştür.



### 3. YÖNTEM

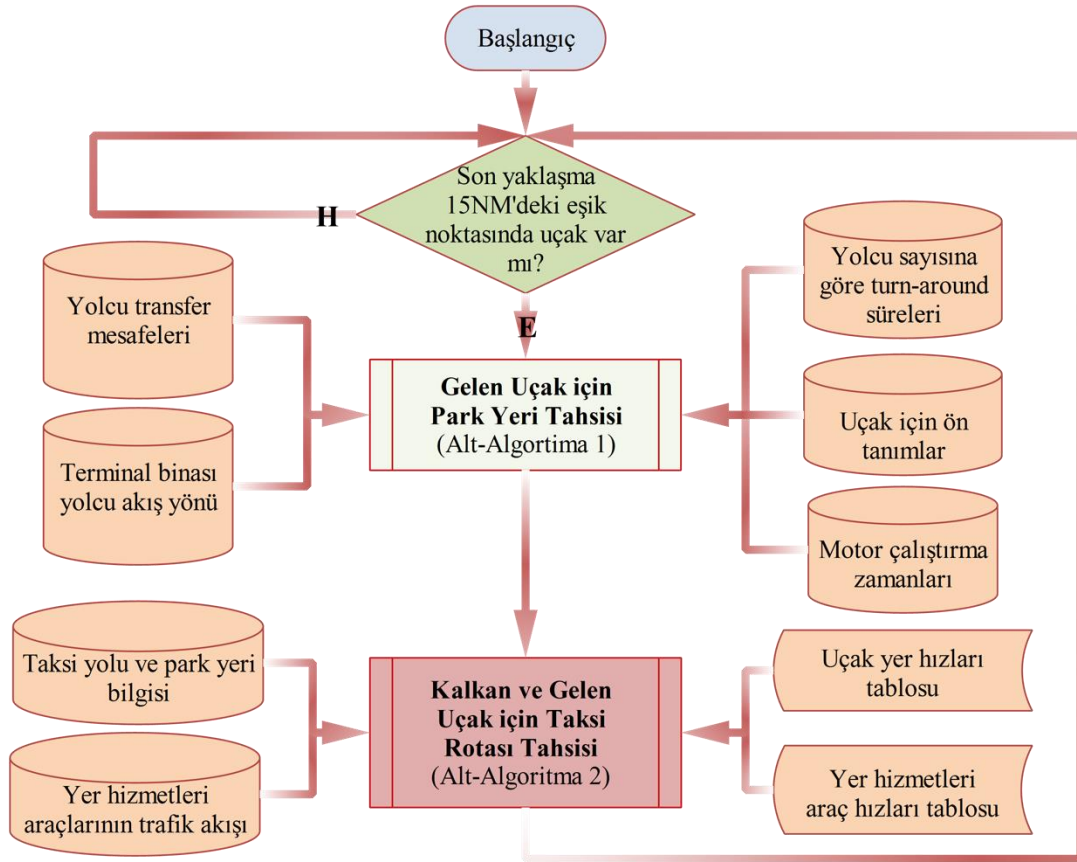
Bu çalışma süresince öncelikle önerilen algoritma için gerekli olan hava ve kara tarafı kısıtlayıcıları ortaya konulmuştur. Bunlara ek olarak operatör, kontrolör ve işletmecilerin havaalanındaki trafik akışı ve terminal binasındaki yolcu akışının iyileştirilmesi üzerine talep ve görüşleri toplanmış ve Analitik Hiyerarşi Yöntemi ile kriterlerin ağırlıkları çıkarılmıştır. Elde edilen kısıt, kriter ve ağırlıkları dahilinde algoritmanın eliminasyon aşaması hazırlanmıştır. Daha sonra elde edilen çözüm kümesi içinden havaalanı hava trafiği, terminal binası yolcu akışı ve park yeri kullanım verimliliğini sağlayacak üç farklı amaç fonksiyonu ortaya konmuştur. Bu amaç fonksiyonlarının matematiksel modelleri çıkartılarak GAMS üzerinde kodlaması yapılmıştır. Daha sonra İstanbul Atatürk Havalimanı gerçek trafik verisindeki pik saate göre türetilen replikasyonlar ile hem simpleks hesaplaması yapan GAMS üzerinde hem de sezgisel algoritmanın (SA) kodlandığı MATLAB üzerinde koşturularak karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Bu sayede önerilen algoritmanın GAMS çözümünden ne kadar uzaklaştığı gözlemlenmiştir. İkinci aşamada ise önerilen algoritmanın İstanbul Atatürk Havalimanı gerçek trafik verisi ile karşılaştırması yapılmıştır. Bu karşılaştırma için gerçek veri üzerinden on adet 24 saatlik replikasyonlar üretilmiş ve bu replikasyonların ortalamaları referans senaryo verisi ile karşılaştırılmıştır. Daha sonrasında önerilen algoritma hakkındaki görüş ve düşüncelerimiz paylaşılmıştır.

#### 3.1. Genel Algoritma

Park yeri ve taksi rotası tahsisini yapacak algoritma sistemde çevrimiçi çalıştığı için algoritmanın kısa sürede sonuç verebilir olması gerekmektedir. Alternatif park yeri çözüm kümesi eleman sayısının fazla olması eniyileme yapacak fonksiyonların hesaplama sürelerinin artmasına neden olmaktadır. Bu sebeple algoritmanın genel çerçevesinde eliminasyon aşaması (0-1 elemesi) kullanılmaktadır. Hesaplamaya alınan herhangi bir uçak için alternatif park yeri sayısı toplam park yeri sayısından hesaplamaların kolaylıkla yapılabileceği sayılara düşürülmüş olacaktır. Elde edilen bu indirgenmiş çözüm kümesinden amaç fonksiyonlarının kümülatif bileşimini minimize eden ideal park yeri ilgili uçak için en uygun yer olarak uçağa tahsis edilmektedir.

Önerilen algoritmada son yaklaşma 15 NM'deki alana giren uçaklara Şekil 3.1'deki genel atama algoritması uygulanmaktadır. Algoritmada öncelikle son yaklaşma 15

NM'deki 2 NM'lik yarıçaplı alan içinde herhangi bir uçak olup olmadığı kontrol edilir. Şayet bu alan içerisinde uçak tespit edilirse algoritma atama sürecini başlatır. Herhangi bir uçak tespit edilmezse algoritma hazır durumda bir sonraki uçağı beklemeye devam eder. Son yaklaşma 15 NM'de beliren uçak var ise kalkacak uçakların motor çalıştırma zamanları, ilgili uçak için yapılan ön tanımlar, hızlı-tur (quick-turn) yapacak yani konaklama süresini olabildiğince kısa tutacak uçakların yolcu sayılarına göre park yerini işgaliye (turn-around) süreleri, terminal binasında kalabalığa neden olmamak amacıyla inen ve kalkan yolcu akış yönü, yolcuların terminal binasındaki ortak alanlara olan transfer süreleri göz önünde bulundurularak yukarıda belirtilen kıstaslar dâhilinde "Park Yeri Tahsisi" süreci tamamlanır. Park yeri tahsisi yapıldıktan sonra o park pozisyonunda işlem yapan uçakların "Taksi Rotasının Tahsisi" yapılır. Bu taksi yolunun ataması aşamasında taksi yolunun belirlenen zamanda müsait olması durumu, yer hizmetleri araçlarının trafik akış yönü ve rotası, yer hizmetleri araç hızları ve BADA verilerinden alınan uçak yer hızı bilgisi girdi olarak kullanılıp izlenecek uygun taksi yolu seçilir [59].



Şekil 3.1. Park yeri ve taksi rotası tahsisi genel algoritması

Genel algoritmadaki “Alt-Algoritma 1” bloğunda hava trafik akışının eniyileme fonksiyonları olan  $F_{PW}$ ,  $F_{AT}$ ,  $F_{GU}$  fonksiyonlarının dinamik değişkenli kümülatif bileşenini alan amaç denklemlerinin hesaplaması yapılmaktadır. Bu kümülatif bileşim fonksiyonu algoritmanın hava alanı hareket sahası veya terminal binasındaki tıkanıklıklara karşı daha kararlı çıktı vermesini sağlamaktadır.

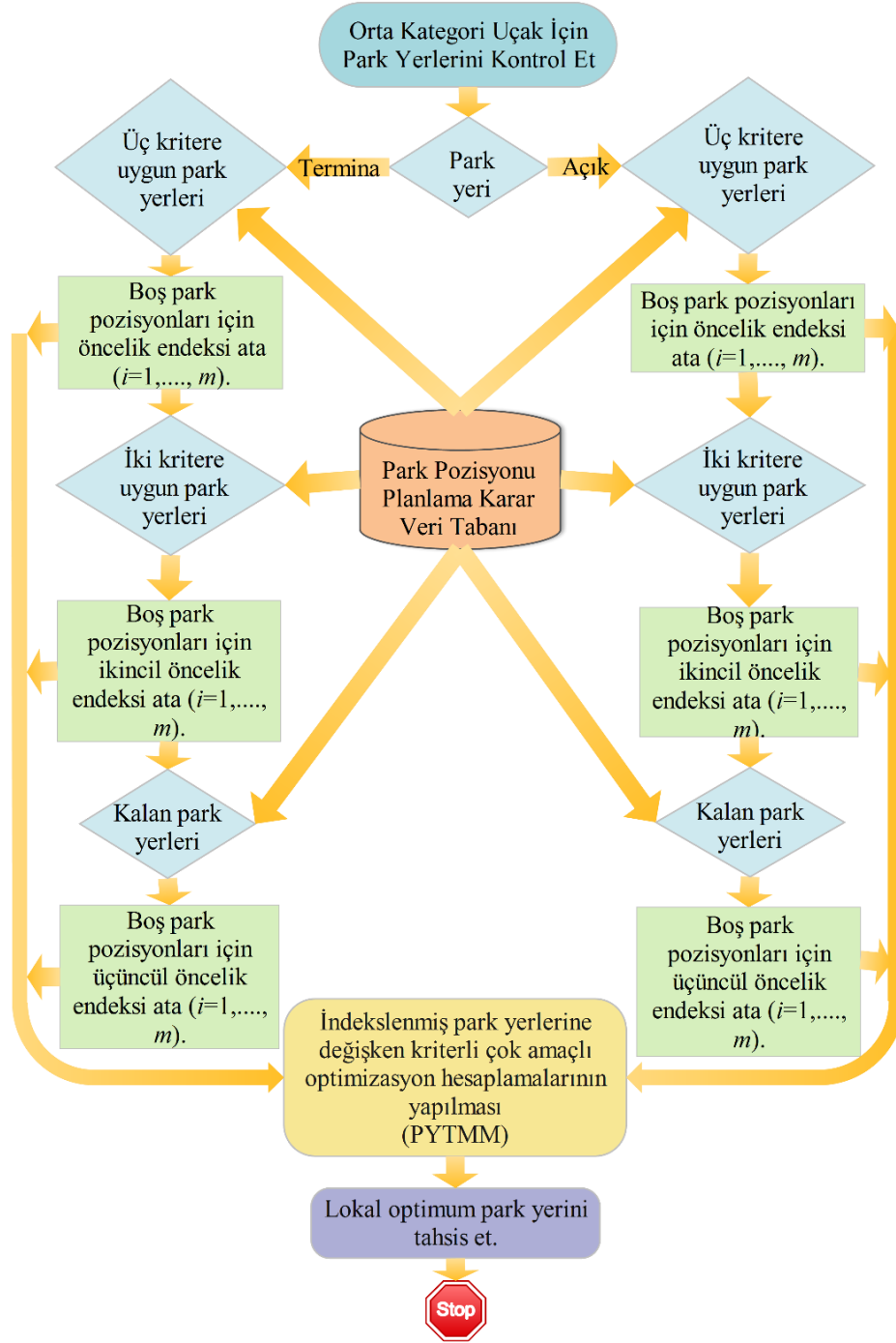
Genel atama algoritmasının dinamik değişkenli bir yapıda olması hava alanındaki kısıtlayıcılara karşı her türlü sonucu üretebilen organik bir çevrimiçi algoritma olmasını sağlamaktadır. Hava alanlarındaki operasyonel atama sürecinde sezgisel yapıdaki bir karar destek sisteminin kullanılması ile hava alanlarının olası (kaza-kırım, terör, terminal binasındaki inşaat faaliyetleri, hava alanı hareket sahasındaki yapısal faaliyetler vb.) tehlike veya kapanma durumlarında gerekli karar verme çıktılarını sağlayabilir nitelikte olacağı düşünülmektedir.

### **3.2. “Alt-Algoritma 1”: Park Yeri Tahsisi Algoritması**

Şekil 3.2’de verilen park yeri tahsisi “Alt-Algoritma 1”de ilgili uçak için uygun park yeri çözüm kümesi belirli kısıtlar dahilinde oluşturulur ve amaç fonksiyonları hesaplamasına alınır. Çözüm kümesini daraltan bu kriterler:

- i. Tercih edilen park yeri terminal bağlantılı ise sırasıyla:
  - Terminal bağlantılı boş park yerlerinden ilgili uçak için 3 kritere (Park yeri kategorisi, havayolu şirketinin park yeri bölgesi tercihi, yer hizmetleri araçlarının yollarını kesiyor olması) uygun park pozisyonları,
  - Terminal bağlantılı boş park yerlerinden park yerine ulaşana kadarki zaman göz önünde bulundurularak 2 kritere uygun (Park yeri kategorisi, havayolu şirketinin park yeri bölgesi tercihi) park pozisyonları,
  - Terminal bağlantılı boş olan ve 10 dakika içinde boşaltılacak yerlerinden park yerine ulaşana kadarki zaman göz önünde bulundurularak 1 kritere uygun (Park yeri kategorisi) park pozisyonları,

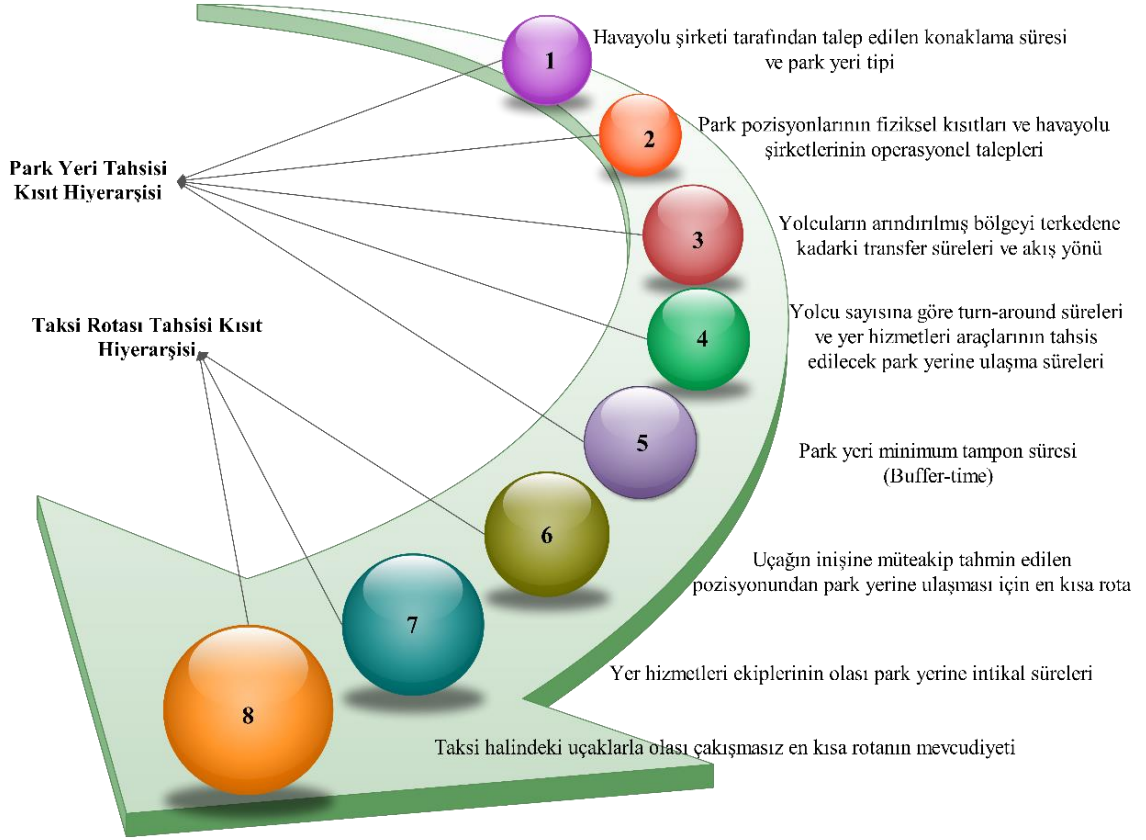
- ii. Tercih edilen park yeri açık park pozisyonunda ise sırasıyla:
- Açık aprondaki boş park yerlerinden ilgili uçak için 3 kritere (Park yeri kategorisi, havayolu şirketinin park yeri bölgesi tercihi, yer hizmetleri araçlarının yollarını kesiyor olması) uygun park pozisyonları,
  - Açık aprondaki boş park yerlerinden park yerine ulaşana kadarki zaman göz önünde bulundurularak 2 kritere uygun (Park yeri kategorisi, havayolu şirketinin park yeri bölgesi tercihi) park pozisyonları,
  - Açık aprondaki boş olan ve 10 dakika içinde boşaltılacak yerlerden park yerine ulaşana kadarki zaman göz önünde bulundurularak 1 kritere uygun (Park yeri kategorisi) park pozisyonları,



Şekil 3.2. "Alt-Algorithm 1": Park yeri tahsisi algoritması

Belirtilen kısıtlamalar ile bir uçak için uygun çözüm kümesi ilgili zaman dönemi içinde daraltılarak Matematiksel Model'in hesaplama süresinin kısaltılması sağlanmış olacaktır. Şekil 3.3'te bu kısıtlara ek olarak amaç fonksiyonlarının ağırlıklarını belirleyen karar kriterleri ve onların öncelik hiyerarşisi gösterilmiştir. Bu hiyerarşiye dayanarak park

yeri ataması sürecinde kullanılacak amaç fonksiyonlarının ağırlıklandırması çok kriterli karar verme ile yapılmıştır.



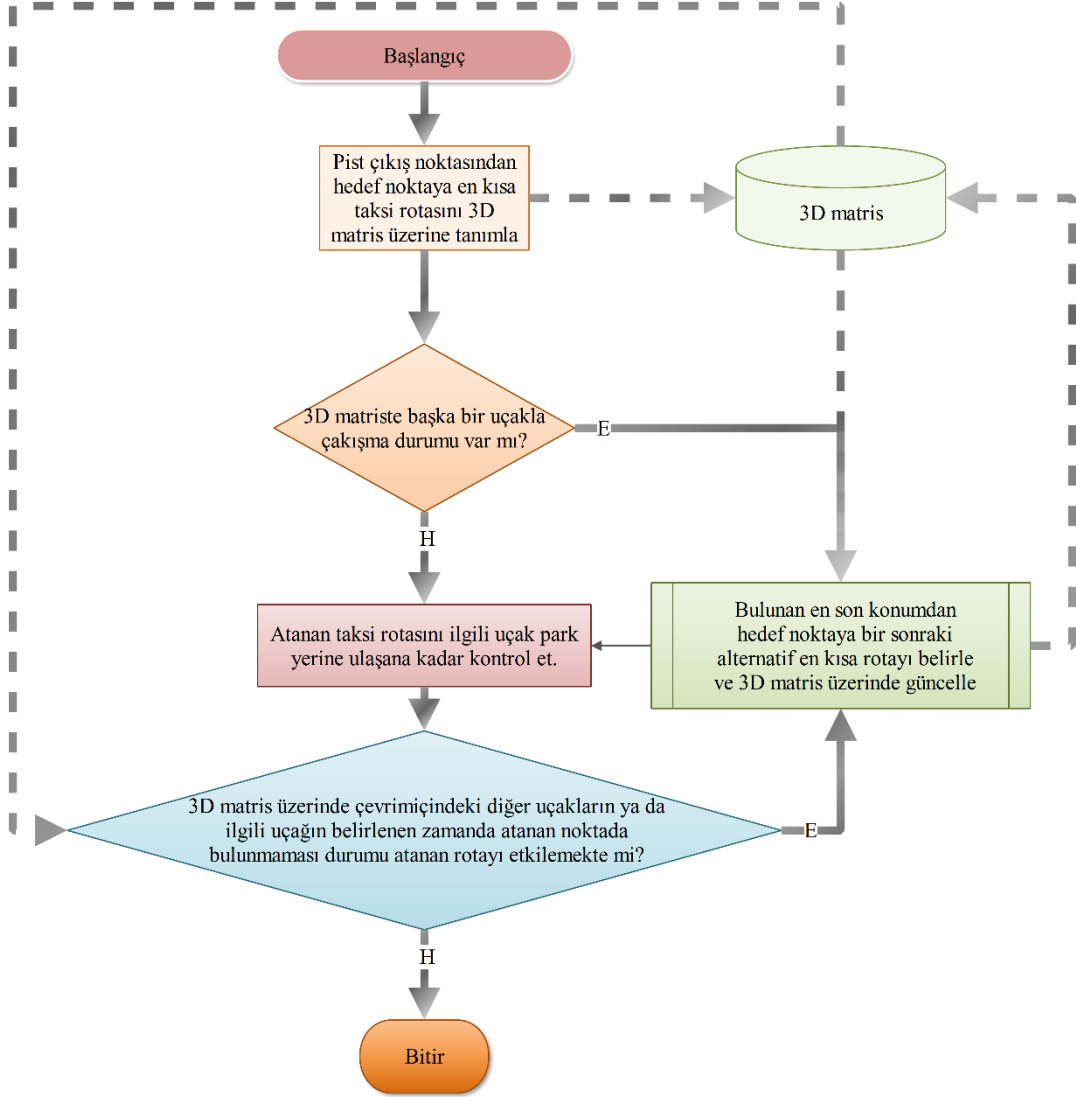
Şekil 3.3. Kısıtlar öncelik hiyerarşisi

### 3.3. “Alt-Algorithm 2”: Taksi Rotası Tahsisi Algoritması

Alt-Algorithm 1 tarafından yürütülen park yeri tahsis sürecinde her bir uçak için uçak taksi süresi ( $F_{AT}$ ) pist çıkışı ile atanan park yeri arasındaki en kısa taksi rotası kullanılarak hesaplanmaktadır. Ancak bu en kısa rota belirlenirken manevra sahasında herhangi başka bir uçakla yaşanabilecek karşılaşması göz önünde bulundurulmamaktadır.

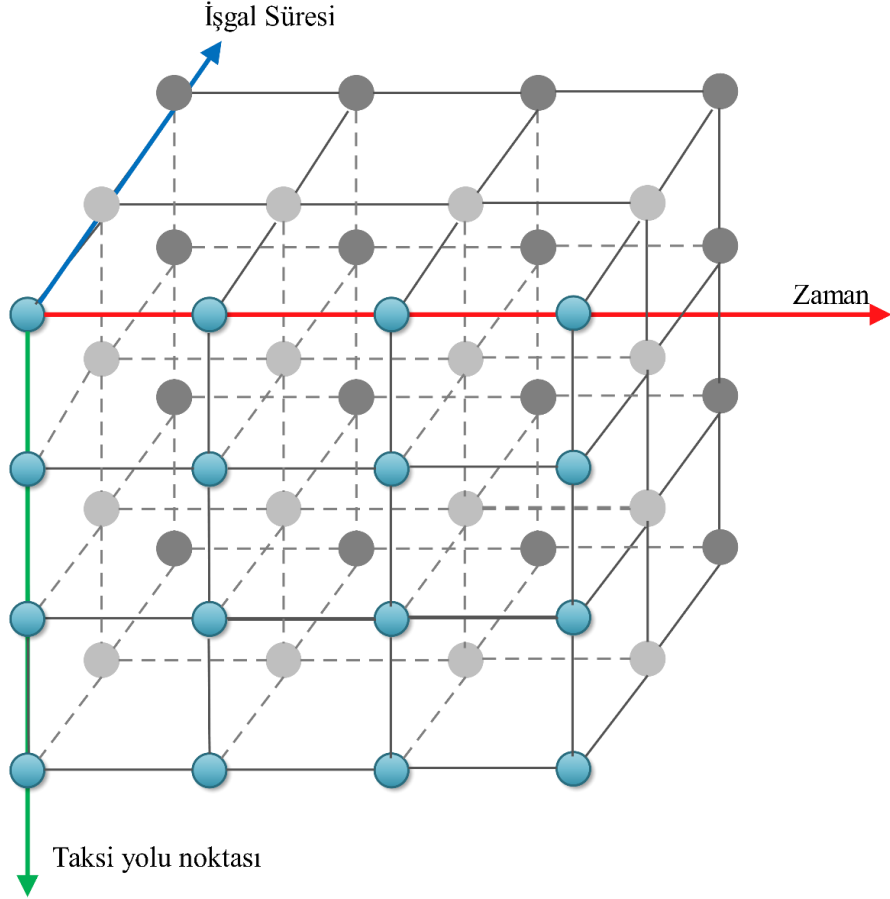
Park yeri ve bu park yerine ait önceden hesaplanmış en kısa taksi rotası ilgili uçağa tahsis edildikten sonra bu uçağın pisti terk ettiği andan itibaren hareket sahasındaki diğer uçakların rotaları ile olası çakışmasının olup olmadığı “Alt-Algorithm 2” ile araştırılır (Şekil 3.4). Bu algoritma sonucunda önceden hesaplanmış taksi rotasında bir gecikme yaşanması durumunda ilgili uçak için alternatif taksi rotalarından en kısa sürede olanı tahsis

edilir ve uçak park yerine ulaşana kadar bu kontrol devam eder. Bu tahsisin yapılmasında (3.1) denklemini referans alınarak geliştirilen sezgisel taksi rotası tahsis algoritması kullanılmaktadır.



Şekil 3.4. "Alt-Algorithm 2": Taksi rotası tahsis algoritması

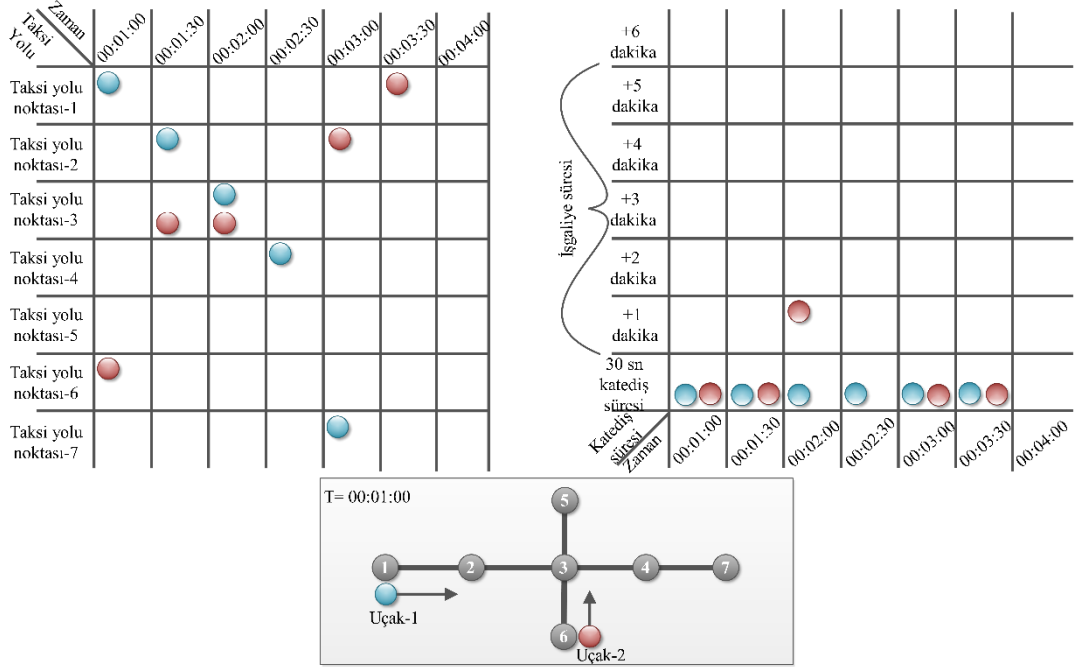
Taksi rotası ile başka uçakların olası çakışmalarının araştırılmasını sağlayan sezgisel algoritma 3 boyutlu bir matris ile yapılmaktadır (Şekil 3.5). Bu matrisin bir eksenini hareket sahasındaki taksi yollarının 100 m.'lik bölümlere ayrıldığında taksi yolu üzerindeki ve kesişim noktalarındaki referans noktaları, bir eksenini zaman skalasını, bir eksenini de ilgili taksi yolu noktasının işgal süresini belirtir.



**Şekil 3.5.** 3 Boyutlu *taksi yolları işgaliye matrisi*

Bir uçağın ilgili taksi yolu noktasından bekleme yapmadan taksi yapması durumunda bu noktayı işgal süresi 100 m.'lik taksi yolu bölümünün taksi yolundaki belirlenmiş taksi hızına oranı ile hesaplanır. Şayet bu nokta üzerinde başka bir uçağın aynı zaman diliminde bulunması durumunda diğer uçağın bu noktayı kat ediş süresi diğer uçağın bulunma süresine 100 m.'lik taksi yolu bölümünün taksi yolundaki belirlenmiş taksi hızına oranından elden süreye eklenmesi ile bulunur (Şekil 3.6).





Şekil 3.6. 3 Boyutlu taksi rotası işgaliye matrisinin hesaplamasına bir örnek

Denklem (3.1) iki uçağın taksi yolu kesişim noktasında aynı anda ya da 2 dakikalık fark ile bulunması durumunda alacağı 2 dakikalık gecikmeyi belirtmektedir. Bu ifadenin rastgele  $T_{i_1 j_n}$  ve  $T_{i_2 j_n}$  değerlerine karşılık inen  $G$  değerleri Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

$$G = 2 \cdot \text{Sign} \left( \left\| \left\| 2^{\text{sign}(|T_{i_1 j_n} - T_{i_2 j_n}| - 2)} \right\| - 2 \right\| \right) \quad (3.1)$$

Bu denklemde  $T_{i_1 j_n}$   $i$ . uçağın  $j$ . kavşak noktasına girme zamanını,  $T_{i_2 j_n}$  de  $i_2$ . uçağın  $j$ . kavşak noktasına girme zamanını belirtmektedir.

**Tablo 3.1.** (3.1) denkleminin rastgele  $T_{i_1 j_m}$  ve  $T_{i_2 j_m}$  değerlerine karşılık inen  $G$  değerleri

$T_{i_1 j_m}$ (dk.)	$T_{i_2 j_m}$ (dk.)	$G$ (dk.)
0	0	2
0	1	2
0	2	2
1	1	2
1	2	2
0	3	0
0	4	0
1	5	0
4	3	2
4	4	2
5	3	2
5	2	0
6	3	0

## 4. MATEMATİKSEL MODELLEME

Bir olayın geçmişte elde edilmiş sonuçlarından yararlanarak, bu olayın gelecekte ne gibi sonuçlar doğuracağını araştırmamıza yardımcı olan niceleyici tekniklere matematiksel modelleme denir. Alınacak kararın önemi arttıkça, karar vermede kullanılan değişken sayısı arttıkça, karar verme faaliyetine katılan kişi sayısı arttıkça matematiksel modele olan ihtiyaç artar. Bu sebeple park yeri ve taksi rotası tahsisini sağlayacak algoritmanın doğruluğunun sınanabilmesi için matematiksel modellemenin yapılması gerekmektedir.

Bir probleme karşılık oluşturulan matematiksel modelleme ilgili problemin olası çözümlerinin çözüm aranan elemanlarla olan tüm olası seçeneklerin hesaplanarak ideal seçeneğin belirlenmesini sağlamaktadır. Bu sebeple oluşturulan matematiksel model ile bir uçak için bütün park yerleri arasından en ideal çözüm bulunmaktadır.

Geliştirilen atama algoritmasının gerçek zamanlı ve çevrimiçi çalışması amaçlanmaktadır. Bu nedenle makul bir sürede en ideal çözümün bulunması amacıyla atama yapılacak her uçak için mevcut çözüm kümesindeki park yeri sayısının uygun bir boyuta indirgenmesi gerekmektedir. Bu anlamda indirgeme belirli bir silsile ve kriterler dahilinde yapılacak olan eliminasyon işlemi uygulanarak gerçekleştirilecektir. Bu tür bir eliminasyonda karar değişkenlerinin farklı seçenekleri üzerinden en iyi çözüm aranması nedeniyle bu tür optimizasyon yöntemlerine kombinyonel optimizasyon (Combinatorial Optimisation) olarak adlandırılmaktadır [50].

Matematiksel modelin oluşturulması için gerekli varsayımlar, indisler, parametreler ve karar değişkenleri şu şekilde tanımlanmıştır:

### **Park Yeri Tahsisi Matematiksel Modeli (PYTMM)**

#### **Varsayımlar:**

1. Her uçak bir park yerine atanmalıdır.
2. Aynı zaman diliminde bir park yerine birden fazla uçak atanamaz.
3. Uçağın kategorisi ile atanacak park yerinin fiziksel boyutları uyumlu olmalıdır.
4. Uçağa atanacak park yeri bölgesi havayolu işletmesinin talep ettiği park yeri bölgesi ile örtüşmelidir (Örneğin havayolu işletmesi terminal bağlantılı park yeri talep ediyorsa, buna uygun bir park yeri ataması yapılmaya çalışılmalıdır.).

**İndisler:**

$I = \{1, 2, \dots, n\} \rightarrow$  uçak kümesi,  $i, i_2 \in I$

$G = \{1, 2, \dots, m\} \rightarrow$  park yeri kümesi,  $g \in G$

$T = \{1, 2, \dots, z\} \rightarrow$  zaman kümesi,  $t \in T$

$N = \{1, 2, \dots, a\} \rightarrow$  pist çıkışındaki taksi yolu noktaları kümesi,  $a \in N$

**Parametreler:**

$C_{ig}$  :  $i$ . uçağın  $g$ . park yerine varma süresi,

$R_i$  :  $\begin{cases} 1, i. uçağın terminal bölgesini tercih etmesi, \\ 2, i. uçağın açık apronu tercih etmesi, \end{cases}$

$K_i$  :  $\begin{cases} 1, i. uçağın kategorisi hafif ise, \\ 2, i. uçağın kategorisi orta ise, \\ 3, i. uçağın kategorisi ağır ise, \end{cases}$

$p_g$  :  $g$ . park yerinin bulunduğu bölge,

$t_g$  :  $g$ . park yeri için izin verilen uçak kategorisi,

$q_{ig}$  :  $i$ . uçağın  $g$ . park yerine girme zamanı,

$S_i^+, S_i^-$  :  $i$ . uçağın park yeri bölge tercihinin sapma değişkenleri,

$D_g$  :  $g$ . park yerinden terminal binası referans noktasına yolcu yürüyüş süresi,

$T_i$  :  $i$ . uçağın konaklama süresi,

$T_g$  :  $g$ . park yerinin toplam kullanım süresi,

$P_i$  :  $i$ . uçağındaki toplam yolcu sayısı,

$m$  : Havaalanındaki toplam park yeri sayısı,

**Karar Değişkenleri:**

$X_{igt}$  :  $\begin{cases} 1, i. uçak g. park yerine t zamanında park ederse, \\ 0, diğer durumlarda \end{cases}$

### Amaç Fonksiyonu:

1. Yolcu yürüyüş süresi amaç fonksiyonu

$$F_{PW} = \text{Min} \left( \sum_{i \in I} \sum_{g \in G} \sum_{t \in T} D_g \cdot X_{igt} \cdot P_i \right) \quad (3.1)$$

2. Park yeri kullanım süresi standart sapması amaç fonksiyonu

$$F_{GU} = \text{Min} \left\{ \sum_{g \in G} \left\| \left( \frac{\sum_{i \in I} \left( \sum_{t \in T} X_{igt} \right) \cdot T_i}{m} \right) - T_g \right\| \right\} \quad (3.2)$$

3. Uçak taksi süresi amaç fonksiyonu

$$F_{AT} = \text{Min} \left( \sum_{i \in I} \sum_{g \in G} C_{ig} \cdot \left( \sum_{t \in T} X_{igt} \right) \right) \quad (3.3)$$

### Kısıtlar:

1. Her uçak bir park yerine atanmalıdır.

$$\sum_{g \in G} \sum_{t \in T} X_{igt} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, I \quad (3.4)$$

2. Her park yerine en az bir uçak atanmalıdır.

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T} X_{igt} \geq 1 \quad \forall g = 1, \dots, G \quad (3.5)$$

3. Tahsis edilecek park yerinin müsait olma zamanı gelecek uçağın park yerine ulaşma zamanından sonra olmalıdır.

$$\forall q_{i_2g} \geq q_{i_1g} \text{ ve } \forall i_2 \geq i_1 \text{ için;}$$

$$q_{i_2g} - q_{i_1g} \geq T_{i_2} - \left( 2 - \sum_{t \in T} X_{i_1gt} - \sum_{t \in T} X_{i_2gt} \right) \cdot M \quad \forall i_1, i_2 = 1, \dots, I, \forall g = 1, \dots, G \quad (3.6)$$

4. İnen uçağın uçak kategorisi park yerine izin verilen uçak kategorisi ile uyumlu olmalıdır.

$$\sum_{i \in I} \left( \sum_{t \in T} X_{igt} \right) \cdot K_i \leq t_g \quad \forall g = 1, \dots, G \quad (3.7)$$

5. Havayolu şirketinin park yeri bölgesi tercihi mümkün olduğunca sağlanmalıdır (Esnek Kısıt). Bunun sağlanması için hedef programlama kullanılmıştır. Bir uçağın park yeri bölgesi tercihinin atanabilecek olası park yerlerinin bulunduğu bölgeyi atanabilmesi sapma değişkenlerinin  $(S_i^+, S_i^-)$  minimum yapılması ile sağlanmaktadır. Öncelikle bu değerlerin belirtilen çözüm kümesi dahilinde alabileceği minimumlarının hesaplanması gerekmektedir. Minimum değerler de ilk dört kısıt ve (3.8) denklemi kısıtı ile  $z = \min(\sum_{i \in I} S_i^+ + S_i^-)$  amaç fonksiyonu hesaplanması ile bulunur. Bu hesaplama sonucunda her bir uçak için minimum  $S_i^+, S_i^-$  hesaplanıp “*hedef*” matrisine aktarılır. Daha sonra (3.4), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8) ve (3.9) kısıtları çerçevesinde (3.1), (3.2) ve (3.3) amaç fonksiyonları çözülmektedir.

$$\sum_{i \in I} (\sum_{t \in T} X_{igt}) \cdot R_i = p_g + S_i^+ - S_i^- \quad \forall g = 1, \dots, G \quad (3.8)$$

$$\sum_{i \in I} (S_i^+ + S_i^-) \leq \text{hedef} \quad (3.9)$$

6. İlgili park yerinin toplam kullanım süresi hesaplaması denklem (3.10) ile hesaplanmaktadır.

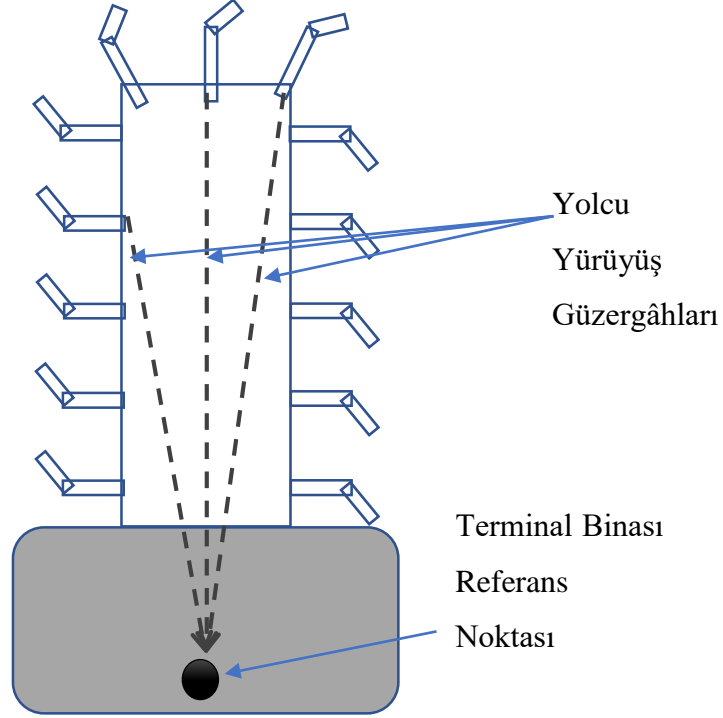
$$T_g = \sum_{i \in I} (\sum_{t \in T} X_{igt}) \cdot T_i \quad \forall g = 1, \dots, G \quad (3.10)$$

#### 4.1. Yolcu Yürüyüş Süresi Amaç Fonksiyonu ( $F_{PW}$ ):

Hava alanına inen ve kalkan yolcuların uçak ve terminal arasındaki toplam aktarma süresi belirten amaç fonksiyonu Yolcu Yürüyüş Amaç Fonksiyonu olarak denklem (3.1)’deki şekilde ( $F_{PW}$ ) tanımlanmıştır.

$F_{PW}$ , terminal bölgesindeki yolcu akış yönü, tıkanıklıklar ve hizmet dışına alınan alanlar, terminal içindeki kapılara olan yürüyüş mesafeleri, açık park pozisyonlarına olan otobüs aktarma süreleri gibi bir dizi faktör tarafından etkilenmektedir. Terminal binasına bağlı park pozisyonlarından yolcuların terminal binasındaki referans noktaya olan yürüyüş güzergâhları Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Bu güzergâhlar ile park yerinden terminal binası referans noktasına yolcu yürüyüş süresi  $D_g$  belirlenmektedir.  $D_g$  süresi, park yerinden terminal binasına olan mesafenin ortalama yürüyüş hızına bölünmesi ile elde edilen süreye

ek olarak kullanılan park yeri açık ise otobüs süresinin eklenmesi ile bulunur.  $P_i$  ilgili uçaktaki toplam yolcu sayısını belirtmektedir. (3.1) denklemine göre de terminaldeki park yerleri tahsis edilmiş uçakların toplam yolcu yürüyüş süresini belirtmektedir.



Şekil 4.1. Terminal binasındaki referans noktaya olan yolcu yürüyüş güzergâhları

#### 4.2. Park Yeri Kullanım Süresi Amaç Fonksiyonu ( $F_{GU}$ ):

Havaalanı park yeri kullanım süresi standart sapmasını belirten amaç fonksiyonu olan Park Yeri Kullanım Süresi Amaç Fonksiyonu ( $F_{GU}$ ) denklem (3.2)'de ifade edildiği şekilde hesaplanmaktadır. Bu amaç fonksiyonu ilgili park yeri kullanım süresinin havaalanı ortalama park yeri kullanım süresine olan sapma süresini minimize etmek için oluşturulmuştur.

#### 4.3. Taksi Yolu Tahsisi Amaç Fonksiyonu ( $F_{AT}$ ):

İnen ve kalkan uçakların hareket sahasındaki taksi süresini minimize eden Taksi Yolu Tahsisi Amaç Fonksiyonu ( $F_{AT}$ ) ile denklem (3.3)'de belirtildiği şekilde hesaplanmaktadır. Bu amaç fonksiyonundaki  $C_{ig}$  ilgili uçağın referans pist çıkış

noktasından park yerine olan en kısa taksi süresini belirtmektedir. İnen ve kalkan uçakların hareket sahasındaki toplam taksi süresi  $C_{ig}$  ; pist ile kapılar ve açık park pozisyonları arasındaki mesafe, taksi yollarındaki uçakların trafik akış yönü, inşaat veya kaza nedeniyle taksi yollarındaki kapalılık durumu, hız tahditleri, apron içi taksi yollarındaki geri-itme (push-back) manevrası yapan uçaklarla olan çakışmalar gibi birtakım kısıtlayıcılara bağlı olarak değişmektedir. (3.3) denklemi ilgili uçağın park yerine olan taksi süresini minimum yapmak için oluşturulmuştur.



## 5. AHP KARAR VERME MODELİ VE FAKTÖRLER

Bu bölümde 4. bölümde anlatılan amaç fonksiyonlarının kümülatif bileşimindeki çok kriterli karar verme modeli belirlenmiş ve bu modelin ağırlık katsayıları ortaya konulmuştur. Karar verme modeli çok amaçlı fonksiyonda kümülatif bileşenlerin alındığı (5.1) denklemindeki ağırlık katsayıların hesaplanmasında kullanılacaktır. Çok amaçlı fonksiyonda belirtilen  $\alpha, \beta, \chi$  katsayıları her bir amaç fonksiyonunun park yeri tahsisinde ne kadar etkin olduğunu belirlemektedir. Denklemdaki  $N_{GU}, N_{AT}, N_{PW}$  değerleri ise amaç fonksiyonlarının normalleştirilmesi için hesaplanmış değerlerdir. Bu değerler her bir amaç fonksiyonunun alabileceği maksimum değer ile belirlenmiştir. Denklem 5.1’de belirtilen çok amaçlı fonksiyonun ağırlıklarının hesaplanması Thomas Saaty’nin ortaya koyduğu Analitik Hiyerarşi Süreci ile analiz edilmiş ve ilgili konu anlatımı EK-1’de verilmiştir [51].

$$X = \alpha \cdot \frac{F_{GU}}{N_{GU}} + \beta \cdot \frac{F_{AT}}{N_{AT}} + \chi \cdot \frac{F_{PW}}{N_{PW}} \quad (5.1)$$

Ağırlık katsayılarının belirlenmesinde; terminal bölgesi yolcu yoğunluğu, hava alanı hareket sahasındaki uçak trafik yoğunluğu ve park yeri kullanım oranı olmak üzere 3 ana kriter kullanılmaktadır. Bu kriterler belirlenirken maliyet endeksli kriterler göz önünde bulundurulmamıştır. Bu sebeple karar verici olmayan havayolu şirketleri ve yer hizmet sağlayıcılarındaki uzmanlardan görüş alınmamıştır. Ana kriterler ve bunların alt kriterleri de aşağıda belirtilmiştir:

### A. Terminal bölgesi yolcu yoğunluğu kriteri:

**A.1.** Yolcu akış yönü alt-kriteri,

**A.2.** Yolcu yürüyüş rotaları çakışması alt-kriteri,

**A.3.** Terminal binasındaki belirli bölgelerdeki yolcu sayısının artması alt-kriteri,

**A.3.1.** Dış hatlar terminali yolcu yoğunluğu alt-alt-kriteri,

**A.3.2.** İç hatlar terminali yolcu yoğunluğu alt-alt-kriteri,

**A.3.3.** Pasaport kontrol noktası yoğunluğu alt-alt-kriteri,

### B. Hava alanı hareket sahasındaki uçak trafik yoğunluğu kriteri:

**B.1.** Taksi yollarındaki uçak sayısının artmasına bağlı olarak uçak taksi gecikmeleri alt-kriteri,

- B.2.** Yer hizmetleri araçlarının taksi rotası kesişim noktalarındaki uçak çakışmalarından kaynaklı beklemlerin artması alt-kriteri,
- B.3.** Push-back yapacak uçakların apron bölgesindeki taksi yapan uçaklardan kaynaklı gecikmelerinin artması alt-kriteri,
- B.4.** De-icing, Anti-icing bölgesi uçak yoğunluğunun artması alt kriteri,
- C.** Park yeri kullanım süresi kriteri:
  - C.1.** Terminal bağlantılı park yeri kullanım tercihi alt-kriteri,
  - C.2.** Açık park yeri kullanım tercihi alt-kriteri,
  - C.3.** Uzak açık apronu park yeri kullanım tercihi alt kriteri,

Çok kriterli karar verme modelinde üç ana kriterin elde edecekleri önem değerlerinin tersi ( $1/\text{Önem değeri}$ ) (5.1) denklemindeki katsayılar olacaktır. Bu katsayılar da park yeri ataması algoritmasında hesaplanan hava alanına inen ve kalkan yolcuların uçak ve terminal arasındaki toplam aktarma süresi ( $F_{PW}$ ), inen ve kalkan uçakların hareket sahasındaki toplam taksi süresi ( $F_{AT}$ ) ve hava alanı park yeri kullanım süresi ( $F_{GU}$ ) ile çarpılması ile alternatif park yerlerinin maliyet endeksi çıkarılmış olacaktır.

Bu katsayıların değişkenliği dış tetikleyiciler (terminal bölgesi kamera analizleri, operatör park yeri ihtiyacı, hareket sahası uçak taksi yoğunluğu) ile alt faktör puanlarına faktör dereceleri atanarak sağlanacaktır. Uygulamada 5 adet faktör derecesi kullanılacak ve bu amaçla aritmetik diziye göre artış, geometrik diziye göre artış ve düzensiz dizi ile artış yöntemleri kullanılacaktır. Bu tez çalışmasında her bir alt-kriter için 5 adet faktör seviyesi kullanılacak ve alt-kriter puanlarının faktör derecelerine dağıtılmasında Liberatore [52] tarafından geliştirilen beş noktalı değer skalasından yararlanılacaktır. Bu skala mükemmel (M), iyi (İ), Orta (O), Kötü (K) ve Çok Kötü (ÇK) noktalarından oluşmaktadır. Bu beş noktanın önem ağırlıkları Tablo 5.1’de verilen ikili karşılaştırma karar matrisi ile belirlenmiştir.

Tablo 5.1’e göre değerlendirme sonucunda mükemmel için 0,513, iyi için 0,261, orta için 0,129, vasat için 0,063 ve zayıf için 0,034 önem ağırlıkları değerleri belirlenmiştir. Alt faktör puanlarının faktör derecelerine dağıtılmasında, alt faktörün puanı en büyük derecenin puanı olarak kabul edilecek ve diğer derecelerin puanları Liberatore skalası değerlerinin en büyük değere oranlanmasıyla bulunacaktır.

**Tablo 5.1** Beş noktalı değer skalası [52]

	<i>Mükemmel</i>	<i>İyi</i>	<i>Orta</i>	<i>Kötü</i>	<i>Çok Kötü</i>	<i>Öncelik</i>
<i>Mükemmel</i>	1,00	3,00	5,00	7,00	9,00	0,513
<i>İyi</i>	0,33	1,00	3,00	5,00	7,00	0,261
<i>Orta</i>	0,20	0,33	1,00	3,00	5,00	0,129
<i>Vasat</i>	0,14	0,20	0,33	1,00	3,00	0,063
<i>Zayıf</i>	0,11	0,14	0,20	0,33	1,00	0,034

Tablo 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 ve 5.6 kriter ve alt-kriterler tanımlanan değerler uzman görüşleri sonucunda elde edilen matrislerdir. İnternet ortamında hazırlanan karşılaştırma sorularına 14 uzmanın verdiği değerler ile kriter ve alt kriterler için matrisler oluşturulmuştur. Uzmanlara internet üzerinde uygulanan anket Ek-2’de verilmiştir.

**Tablo 5.2** Ana kriterler karşılaştırma matrisi

	<i>Yolcu Yoğunluğu</i>	<i>Trafik Yoğunluğu</i>	<i>Park Yeri Kullanım Süresi</i>	<i>Öncelik</i>
<i>Yolcu Yoğunluğu</i>	1,00	0,56	0,84	0,2677
<i>Trafik Yoğunluğu</i>	1,29	1,00	0,93	0,3626
<i>Park Yeri Kullanım Süresi</i>	1,19	1,07	1,00	0,3697

**Tablo 5.3** Yolcu yoğunluğu kriteri alt-kriterler karşılaştırma matrisi

	<i>Yolcu akış yönü</i>	<i>Yürüyüş Rotası Çakışması</i>	<i>Yolcu Sayısı Artması</i>	<i>Öncelik</i>
<i>Yolcu akış yönü</i>	1,00	1,45	1,35	0,41
<i>Yürüyüş Rotası Çakışması</i>	0,69	1,00	1,11	0,30
<i>Yolcu Sayısı Artması</i>	0,74	0,90	1,00	0,29

**Tablo 5.4** Yolcu sayısı alt-kriteri alt-alt-kriterleri karşılaştırma matrisi

	<i>Dış Hatlar</i>	<i>İç Hatlar</i>	<i>Pasaport Kontrol</i>	<b>Öncelik</b>
<i>Dış Hatlar</i>	1.00	1.54	0.53	0.29
<i>İç Hatlar</i>	0.65	1.00	0.52	0.22
<i>Pasaport Kontrol</i>	1.90	1.91	1.00	0.48

**Tablo 5.5** Trafik yoğunluğu kriteri alt-kriterleri karşılaştırma matrisi

	<i>Taksi Yolu Uçak Sayısı</i>	<i>Push-backlerin gecikmesi</i>	<i>Yer hizmetleri araçlarının beklemesi</i>	<i>De-icing ve Anti-icing yoğunluğu</i>	<b>Öncelik</b>
<i>Taksi Yolu Uçak Sayısı</i>	1.00	0.72	1.20	1.03	0.24
<i>Push-backlerin gecikmesi</i>	1.38	1.00	1.27	1.12	0.29
<i>Yer hizmetleri araçlarının beklemesi</i>	0.83	0.79	1.00	0.93	0.22
<i>De-icing ve Anti-icing yoğunluğu</i>	0.97	0.89	1.07	1.00	0.24

**Tablo 5.6** Park yeri kullanım süresi kriteri alt-kriterleri karşılaştırma matrisi

	<i>Terminal bağlantılı Tercihi</i>	<i>Açık tercihi</i>	<i>Y apronu tercihi</i>	<b>Öncelik</b>
<i>Terminal bağlantılı Tercihi</i>	1.00	2.00	2.86	0.54
<i>Açık tercihi</i>	0.50	1.00	1.69	0.28
<i>Y apronu tercihi</i>	0.35	0.59	1.00	0.18

Bu karşılaştırma matrislerindeki Tablo 5.1'deki Liberatore değer skalasına göre tablolandıklarında Tablo 5.7'deki AHP ile elde edilen park yeri tahsisi kriter puan planı elde edilir. Bu plan ile değişken durumların kriterlere karşılık inen derece puanlarının belirtildiği senaryolar bulunmaktadır.

**Tablo 5.7 AHP ile elde edilen park yeri tahsisi kriter puanlarının 5 farklı durum için aldığı değerler**

Kriter No.	Kriterler ve Alt-Kriterleri	%	Puan	Senaryolar				
				1	2	3	4	5
<b>1</b>	<b>Yolcu Yoğunluğu</b>	27	0,27	<b>0,14</b>	0,35	0,11	0,29	0,24
1.1	Yolcu akış yönü	41	0,11	0,06	0,14	0,05	0,11	0,10
1.2	Yürüyüş Rotası Çakışması	30	0,08	0,04	0,10	0,03	0,08	0,07
1.3	Yolcu Sayısı Artması	29	0,08	0,04	0,10	0,03	0,09	0,07
1.3.1	Dış Hatlar	29	0,02	0,01	0,03	0,01	0,02	0,02
1.3.2	İç Hatlar	22	0,02	0,01	0,02	0,01	<b>0,03</b>	0,02
1.3.3	Pasaport Kontrol	48	0,04	0,02	0,05	0,02	0,04	0,03
<b>2</b>	<b>Trafik Yoğunluğu</b>	36	0,36	0,43	<b>0,18</b>	0,15	0,35	0,44
2.1	Taksi Yolu Uçak Sayısı	24	0,09	0,10	0,04	0,04	0,08	0,09
2.2	Push-backlerin gecikmesi	29	0,10	0,12	0,05	0,04	0,10	0,10
2.3	Yer hizmetleri araçlarının beklemesi	22	0,08	0,09	0,04	0,03	0,08	<b>0,16</b>
2.4	De-icing ve Anti-icing yoğunluğu	24	0,09	0,10	0,04	0,04	0,08	0,09
<b>3</b>	<b>Park Yeri Kullanım Süresi</b>	37	0,37	0,44	0,47	<b>0,74</b>	0,36	0,33
3.1	Terminal bağlantılı Tercihi	54	0,20	0,24	0,26	0,40	0,20	0,18
3.2	Açık tercihi	28	0,10	0,12	0,13	0,21	0,10	0,09
3.3	Y apronu tercihi	18	0,07	0,08	0,09	0,13	0,07	0,06

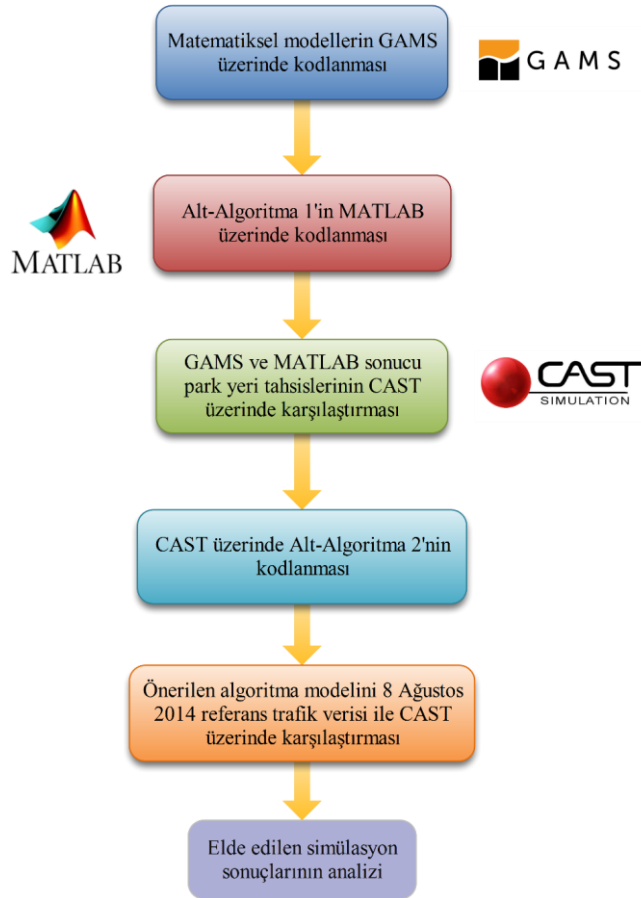
Tablo 5.7’de belirtilen senaryolar kriter ve alt kriterlerin önem durumuna göre diğer kriterlerin değerlerini değiştirdiği gösterilmiştir. Örneğin, birinci senaryoda terminal binasında yolcu yoğunluğunun azaldığı ve bu sebeple kriter değerinin yarıya düştüğü görülmektedir. Diğer kriterlere de kalan oranın paylaşım yüzdeleri dahilinde dağıtılmıştır. Üçüncü senaryoda park yeri kullanım süreleri ile ilgili bir problem yaşanması durumunda ilgili kriterin iki kat artırılmıştır. Yine kalan oran diğer kriterleri paylaşım yüzdeleri dahilinde dağıtılmıştır. Bu değişken kriter yapısı ile önerilen sezgisel algoritma dahilinde kullanılan amaç fonksiyonlarının durumlara göre ağırlıklandırılması sağlanmıştır.

## 6. SİMÜLASYONLAR

Bu bölümde önerilen sezgisel algoritmanın sınanması için izlenen aşamalar, simülasyon modelinin kurulumu, kullanılacak trafik verisinin analizi ve senaryoların nasıl oluşturulduğu anlatılmaktadır.

### 6.1. Çalışmanın Aşamaları

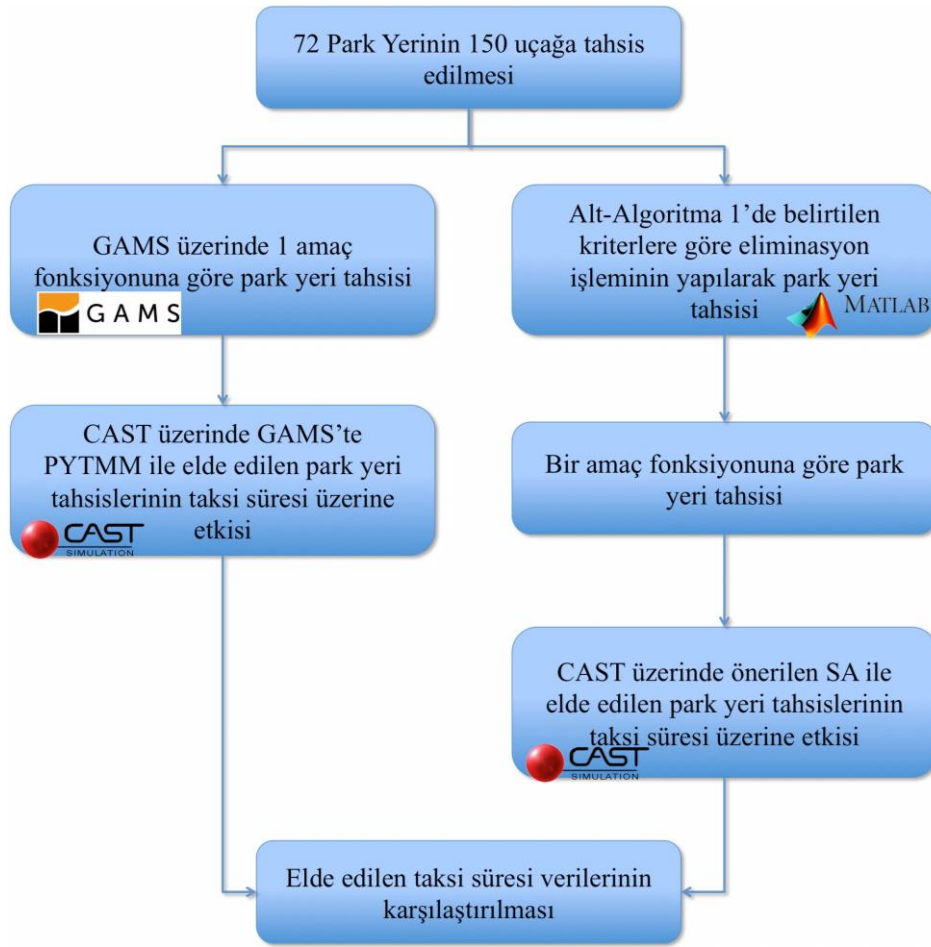
Tez konusu olan sezgisel algoritmanın sınanması için Şekil 6.1'deki adımlar izlenmiştir.



Şekil 6.1. Tez süresince izlenen metodoloji

Öncelikle önerilen Matematiksel Model GAMS üzerinde kodlanmıştır. Fakat önerilen modelde 3 amaç fonksiyonunun da aynı anda hesaplama yapıldığında GAMS yazılımının bilgisayarın izin verdiği bellek dâhilinde çözüm üretemediği görülmüştür. Bu sebeple Matematiksel Model'in amaç fonksiyonları ayrı ayrı hesaplanmıştır. Daha sonra bu modellerin hesaplama yapabilmesi için mümkün olan en büyük sayıdaki uçak ve park yeri

kümesi belirlenmiştir. Önerilen modelde 150 uçak 72 park yeri için uygun çözümler elde edilebilmiştir. GAMS üzerinde kodlanan model için 8 Ağustos 2014 trafik verisindeki pik saate göre 4 saatlik uçuş verisi alınıp bu veriden replikasyonlar üretilmiştir. Elde edilen replikasyon uçuş verileri GAMS ve MATLAB üzerinde ayrı ayrı hazırlanan kodlarda koşturulmuştur (Şekil 6.2). Aynı zamanda güncel havacılık bilgi yayınları ve gerçek operasyon kabulleri referans alınarak CAST üzerinde İstanbul Atatürk Havalimanı modeli oluşturulmuştur. Sonra park yeri tahsisi sonuçları CAST üzerinde koşturularak SA ve GAMS çözümlerinin karşılaştırılması yapılmıştır.



Şekil 6.2. GAMS ve önerilen SA'nın park yeri tahsisi sonuçlarının karşılaştırılması

İkinci aşamada önerilen sezgisel algoritmanın 8 Ağustos 2014 trafik verisinden üretilen referans senaryo ile karşılaştırılmıştır. Öncelikle Taksi Rotası Tahsisi Alt-Algorithması (Alt-Algorithm 2) CAST üzerinde kodlanmış daha sonra da MATLAB üzerinde koşturularak elde edilen park yeri tahsisi çıktıları CAST'a girdi olarak tanımlanıp

önerilen algoritma ile referans senaryo belirli parametreler altında karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında analiz ve öneriler yapılmıştır.

## **6.2. Modelin Kurulumu**

### **6.2.1. Kabuller**

Önerilen algoritma modeline hava tarafı elemanları üzerindeki kısıtlayıcılar ve kara tarafındaki yolcu yürüme mesafesi, yolcu memnuniyeti kısıtlayıcılar dahil edilmiştir. Bunun nedeni havaalanı operasyonlarını daha gerçekçi şekilde temsil eden bir park yeri ve taksi yolu atama modelinin oluşturularak hava ve kara tarafına ilişkin performans parametrelerinin operasyonlar üzerindeki etkisinin incelenbilmesidir.

Havaalanında hava trafik hizmetinin kapasitesini kısıtlayan pist, apron, taksi yolları, park pozisyonları, hizmet verilen uçakların performans farklılıkları, hizmet verilen uçuş operasyon tipi, havayolu şirketlerinin park yeri tercihi, yolcu yürüyüş mesafesine dayanan müşteri memnuniyeti yer hizmetleri araçlarının taksi yolları üzerinden katediş ve yer hizmetleri araçlarının park yerlerine ulaşım süresi gibi faktörler modele dâhil edilmiştir. Bu faktörlerin oluşturduğu büyük çaplı problemlerin konvansiyonel tekniklerle park yeri tahsisi planlamasını zorlaştırmaktadır. Önerilen modelin getirdiği yenilik ise park yeri ve taksi yolu tahsislerinin mevcut yöntemler yerine kombinasyonel optimizasyon algoritması ile yapılmasıdır.

Modeldeki operasyonel kısıtlayıcılara ek olarak bir dizi ek kabulde bulunulmuştur. Bu ek kabuller uygulanması olası kabuller olup herhangi bir kısıtlamayı bünyesinde barındırmamaktadır. Bu kabuller;

- Uçakların havaalanı ile yaptıkları ikili anlaşmalar sonucunda elde edilen havaalanına operasyon düzenleme ve konaklama süresi gibi parametreler sisteme önceden tanımlanmış olması gerekmektedir.
- Uçakların iniş yapacakları piste son yaklaşma hattı üzerindeki 15 NM'deki son yaklaşma eşik bölgesine giriş zamanları algoritmaya girdi olarak tanımlanabilmektedir.
- Yer hizmetleri personeline uçakların park yeri atamaları ile ilgili detay bilgileri bir veri hattı yoluyla ulaştırılabilmektedir.



- Yer hizmetleri araçlarının park yerine ulaşan uçaklara vardıklarını bildirebilecekleri bir veri hattı bulunmaktadır.

- Hava trafik kontrol kulesindeki yer kontrol pozisyonu iniş ve kalkış uçakları için taksi yolu atamasına ilişkin bilgilere erişimi özel bir veri hattı üzerinden sağlanabilmektedir.

- Aynı bilgiler RAMP kule yetkililerine de veri hattı yoluyla ulaştırılabilmektedir.

- Hızlı zamanlı simülasyon analizleri için gerekli referans pik güne ilişkin trafik veri seti 2014 yılı trafik istatistiklerine göre saptanmıştır. Referans pik saatin hesaplanmasına ilişkin veriler Devlet Hava Meydanları İşletmesi (DHMI) tarafından yayınlanan havaalanı aylık trafik istatistikleri ve EUROCONTROL günlük ve saatlik trafik hareketleri verileri kullanılmıştır.

- Referans pik gündeki uçakların tip ve performans kategorileri, iniş ve kalkış saatleri ile park yeri bilgileri ise Tepe-Akfen-Vie (TAV) tarafından sağlanmıştır. Uçakların simülasyona giriş zamanları, park yeri tercihleri, uçak tipleri ve modellerinden oluşan bir günlük veri seti kullanılarak simülasyon analizleri için uçuş planları oluşturulmuştur.

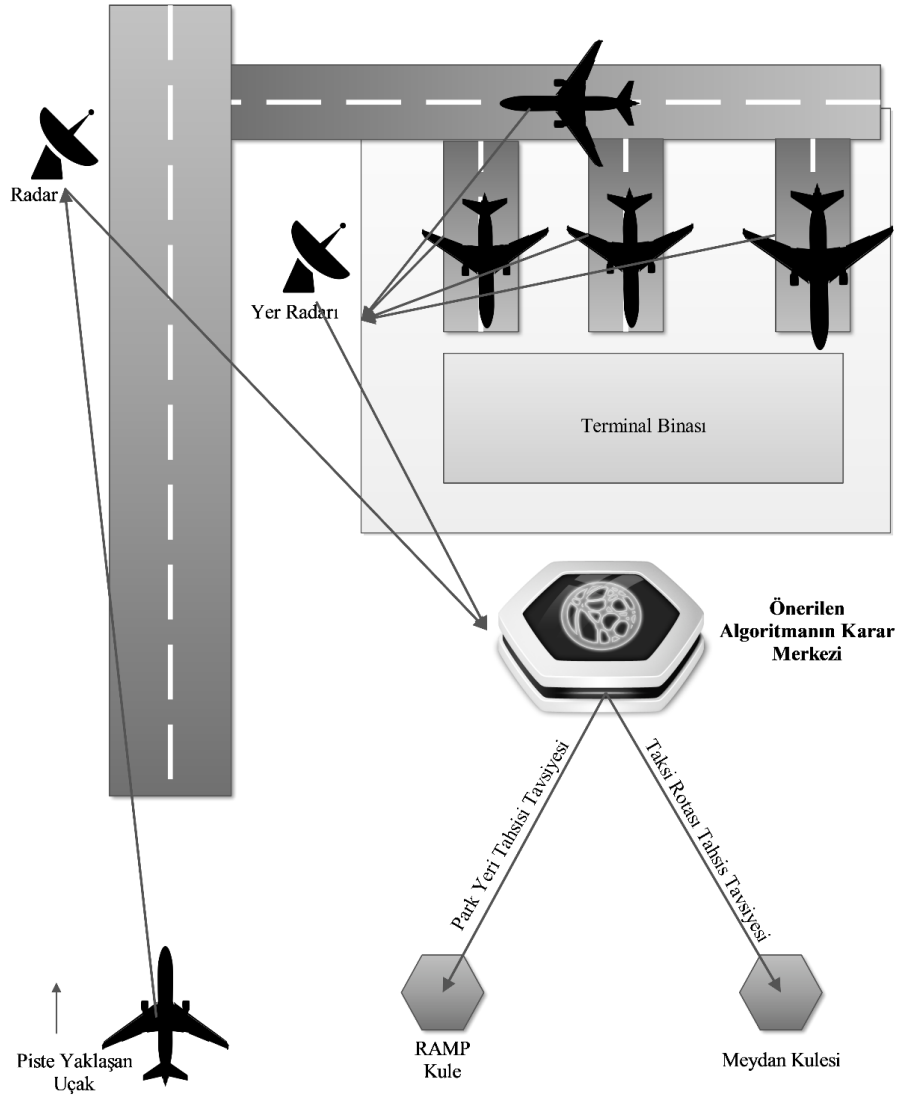
- Simülasyon analizlerinde kullanılmak üzere seçilen İstanbul Atatürk Havalimanı modeli manevra sahası (pist ve taksi yolu sistemleri), körüklü ve açık park pozisyonlarını ve ilk tırmanma ve son yaklaşma hatlarını içeren havaalanı kontrol bölgesi hava sahası ve terminal binası ile sınırlı tutulmuştur. İlgili havaalanındaki elemanlar modellenirken referans pik gün için geçerli olan Havacılık Bilgi Yayını (AIP) esas alınmıştır [53].

- Son yaklaşma hattındaki uçaklar arasındaki hava trafik ve kuyruk türbülansı için kullanılan mesafe ve zaman ayırmaları Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatı'nın (ICAO) uçuşun yaklaşma ve kalkış fazları için belirlediği limitlere göre belirlenmiştir [53]. ICAO bu limitleri ağır/heavy (136.000 kg ve üzeri), orta/medium (136.000 kg'dan az ancak 7.000 kg'dan fazla) ve hafif/light (7.000 kg'dan az) olmak üzere üç ayrı azami kalkış ağırlığı kategorisine göre belirlemektedir.

- Meteorolojik olaylar simülasyon analizlerine dahil edilmemiştir. Ancak iniş ve kalkış yapan uçakların kullandıkları pist bilgileri gerçek verilerden

alındığı için İstanbul Atatürk Havalimanında bağımsız operasyon düzenlenebilen pist oryantasyonu olan inişler için 05 pisti, kalkışlar için 35 pisti seçilmiştir.

- Bu modelde, inen uçaklara park yeri tahsisi kara ve hava tarafı kısıtlayıcılarını bir bütün olarak göz önünde bulundurarak yaklaşma radar ekranında belirli bölgede beliren uçaklara park yeri ve taksi yolu tahsisi yapılır (Şekil 6.3). Daha sonra bu tahsis bilgisi ilgili birimlere (RAMP, Meydan kontrol kulesi, yer hizmetleri, hava yolu işletmeleri, hava alanı işleticilerine) gönderilir.



Havaalanında gün içinde farklı zamanlarda taksi yolları veya terminal binalarında yoğunluklar yaşanabilmektedir. Bu yoğunlukların azaltılabilmesi için park yeri tahsisi algoritma içindeki amaç kriterlerinin değişken katsayı sistemi göz önünde bulundurularak

yapılmaktadır. Buna karşın havaalanında yaşabilecek olağanüstü durumlar bu çalışmanın analizleri kapsamına alınmamıştır. Fakat oluşturulan modelde, havaalanı sisteminde yaşanabilecek olağanüstü durumlarda park yeri tahsisi sürecini ya da taksi yolu ataması sürecini etkileyecek olayların etkilerinin en aza indirilmesi dinamik bir algoritma ile sağlanacağı düşünülmektedir.

## **6.2.2. Simülasyonda Kullanılan Performans Ölçütleri**

Atatürk Havalimanı manevra sahası için gerçekleştirilen hızlı zamanlı simülasyon analizlerinde manevra sahası kapasite ve trafik akış verimini belirlemek için uçak başına havaalanındaki ortalama bulunma süresi ve uçakların yerde geçirdikleri inen ve kalkan uçak için ayrı olmak üzere ortalama taksi süresi olarak iki ana ölçüt belirlenmiştir. Her iki tür performans ölçütü de bir havaalanının kapasitesini (birim zamandaki hizmet çıktısı) ve onunla yakın ilişkili olan tıkanıklık ve gecikmelerinin (hizmette yaşanan aksamaların) saptanması açısından önemlidir. Havaalanına inen ve kalkan trafiklerin hareket süreleri ve gecikmeleri birbirleriyle yakın ilişkili olsalar dahi manevra sahalarının farklı noktalarındaki kapasite ve trafik akış performansını yansıttıkları için ayrı ayrı incelenmeleri uygun görülmüştür. Böylelikle simülasyonlarda uçakların toplam hareket sürelerine ilişkin olarak şu dört performans ölçütü göz önünde bulundurulmuştur:

1. İniş Taksi Süreleri (AXIT): havaalanına inen uçakların inişlerini tamamladıktan sonra pist çıkış yolundan bağlantı taksi yoluna girişleri ile kendilerine atanmış olan körüklü veya açık pozisyona park edene kadar geçen sürelerin toplamıdır.
2. Kalkış Taksi Süreleri (AXOT): havaalanından gidecek olan uçakların park pozisyonundan çıkmaları ile başlayıp kalkış için kullanacakları pistin başındaki bekleme noktasına (departure queue point) varmalarına kadar geçen sürelerin toplamıdır.

Taksi süreleri, uçakların park pozisyonlarına, pist kullanım senaryosuna ve taksi yollarının yapısına doğrudan bağlıdır ve sistemdeki yer hareketleri ve olası tıkanma noktaları hakkında önemli bilgiler sağlar [47, 48]. Aynı zamanda taksi sürelerinin uzaması ilgili rotalar üzerinde trafik yoğunluğuna ve artan çarpışma veya emniyetsiz olay olasılıklarına işaret etmektedir.

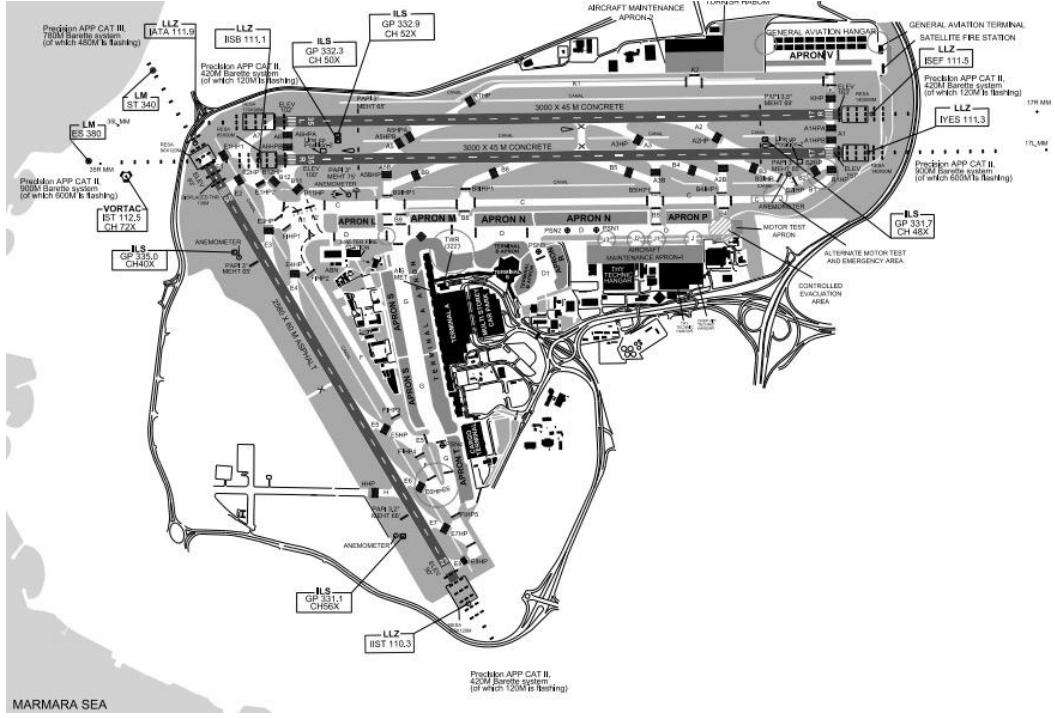
Havaalanında hizmet edilen uçak sayısının yanı sıra bir uçağın havaalanında bulunma süresi de havaalanı kapasite ve trafik akışı parametrelerinin saptanması için kullanılabilir. Bu sebeple bir uçağın planlanmış, tahmini ve gerçek havaalanı ve park yeri işgal süreleri de bir havaalanının teorik ve pratik kapasitesinin karşılaştırılabilmesinin yanı sıra park yerlerinin ne kadar verimli kullanılabildiğini de bizlere sağlayabilmektedir. Böylelikle analizlerde havaalanı kullanımı ve park yeri verimliliğine ilişkin olarak şu altı performans ölçütü ele alınmıştır:

1. Park Yeri Kullanım Süresi (AGUT): Bir uçağın park yerini girdiği zamandan, geri itme manevrası ile park yerini terk edene kadar geçecek sürelerin toplam süresidir.
2. Havaalanında Bulunma Süresi (AAUT): Bir uçağın havaalanına teker koyduğu zamandan, havaalanını terk etmek için pistten teker kesene kadar geçecek sürelerin toplam süresidir.

Havaalanı ve park yeri kullanım süreleri ile havaalanında yaşanan tıkanıklıkların son dakika mı yoksa belirli bir zaman periyodunda mı yaşandığı ve önerilen algoritmanın bu tıkanıklıklara karşı nasıl bir sonuç ürettiği konusunda bize önemli bilgiler sağlamaktadır. Ayrıca bu süreler arasındaki farklılıklar ile havaalanı kapasitesi ile ilgili bize bir takım öngörüler de oluşturmaktadır.

### **6.2.3. Havaalanının Modellenmesi**

Hızlı zamanlı simülasyon çalışmaları İstanbul Atatürk Havalimanındaki pist sistemi, taksi yolları ağı, körüklü ve açık park pozisyonları ile ilk tırmanma ve son yaklaşma hatlarının Şekil 6.4'de verilen yerleşim planına verilerine göre CAST ortamında modellenmesiyle başlamıştır. Bu yerleşimine göre, İstanbul Atatürk Havalimanı 405834N-0284851E koordinatlarında İstanbul'un 24 km batısında yer alan 37 m rakımda bulunan iç hat ve dış hat uçuşlarına 24 saat hizmet veren bir havaalanıdır [53].



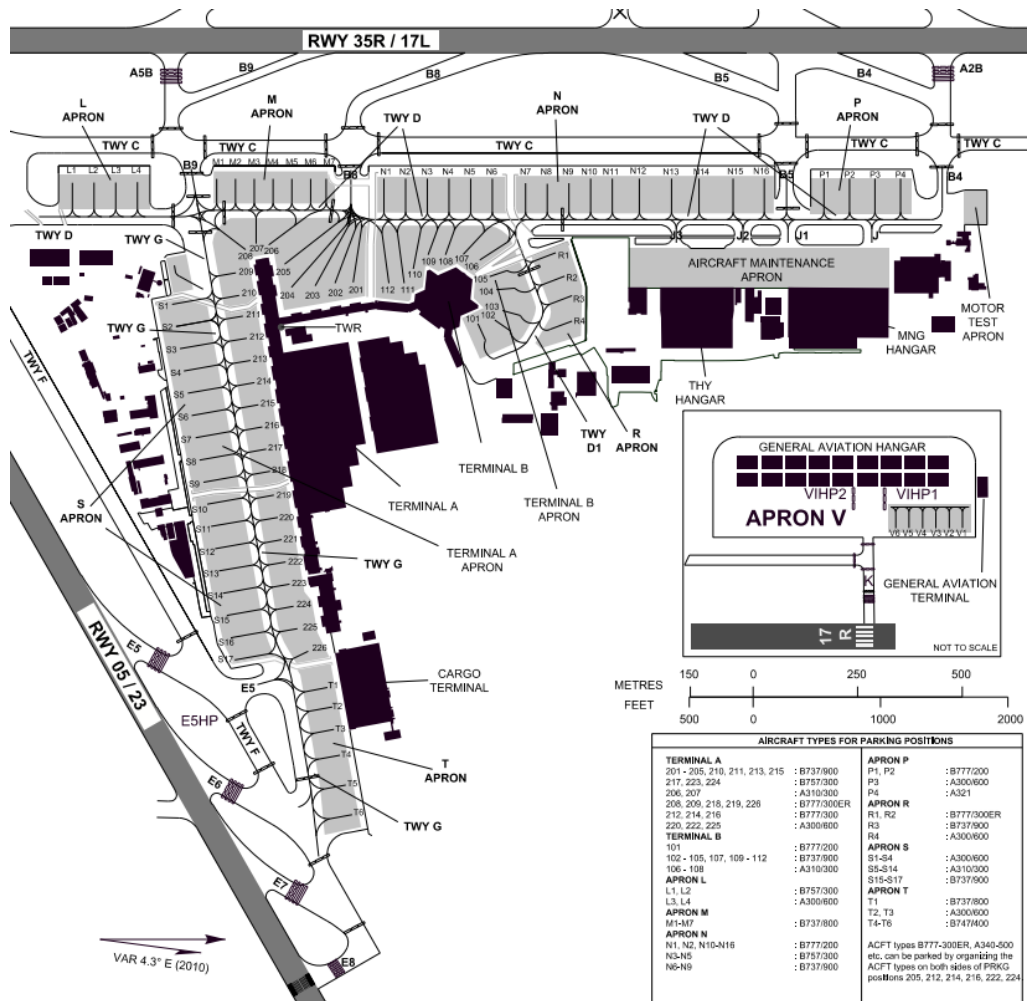
Şekil 6.4. İstanbul Atatürk Havalimanı yerleşim planı [53]

Atatürk Havalimanı 3 pisti, 2 terminal binası, 8 apronu, 4 ana taksi yolu ve bunların bağlantı taksi yolu sistemlerini içermektedir. Açılal konumlarına göre sırasıyla 35R/17L, 35L/17R ve 05/23 olarak adlandırılan üç piste sahiptir (Şekil 6.4). Her biri 3000 m boyunda ve 45 m genişliğindeki 35R/17L ve 35L/17R pistleri birbirine bağımlı operasyon düzenlenen paralel pistlerdir. Uzunluğu 2580 m ve genişliği 60 m olan 05/23 pisti ise diğer paralel pistlere göre açık V şeklinde konumlandırılmış bir pisttir. Rüzgâr ve benzeri hava koşullarının en uygun olduğu günlerde, 35R pistinin sadece kalkış ve 05 pisti ise sadece iniş operasyonları için kullanımı durumunda en yüksek saatlik operasyon sayısı elde edilmektedir [54].

Havaalanında bu pistler ile bağlantılı A'dan K'ya kadar harflerle adlandırılan 8 adet taksi yolu bulunmaktadır. Bunlardan C, D, F ve G ana taksi yollarıdır. Ana taksi yollarının temel işlevi apronlar ile bağlantı taksi yolu sistemleri arasındaki taksi trafiği geçişini sağlamaktadır. Bağlantı taksi yolu olan A, B ve E sistemleri pistler ile ana taksi yolları arasındaki geçişe olanak vermektedir. Bağlantı taksi yollarında K taksi sistemi ise 17R/35L pistini doğrudan genel havacılık bakım apronuna bağlamaktadır. Buna ek olarak uçakların pist işgaliye sürelerini azaltmak için kullanılan hızlı çıkış taksi yolları da bu bağlantı sistemine dâhildir. Bağlantı taksi yollarının adlandırılması, dâhil oldukları sistemin harfini

takip eden bir numara kullanılarak yapılır. Örneğin 05/23 pistini F ana taksi yoluna bağlayan E sisteminin bağlantı yolları E1-8 olarak adlandırılmaktadır. Bu 4 sisteme ait toplam 35 adet bağlantı taksi yolu mevcuttur.

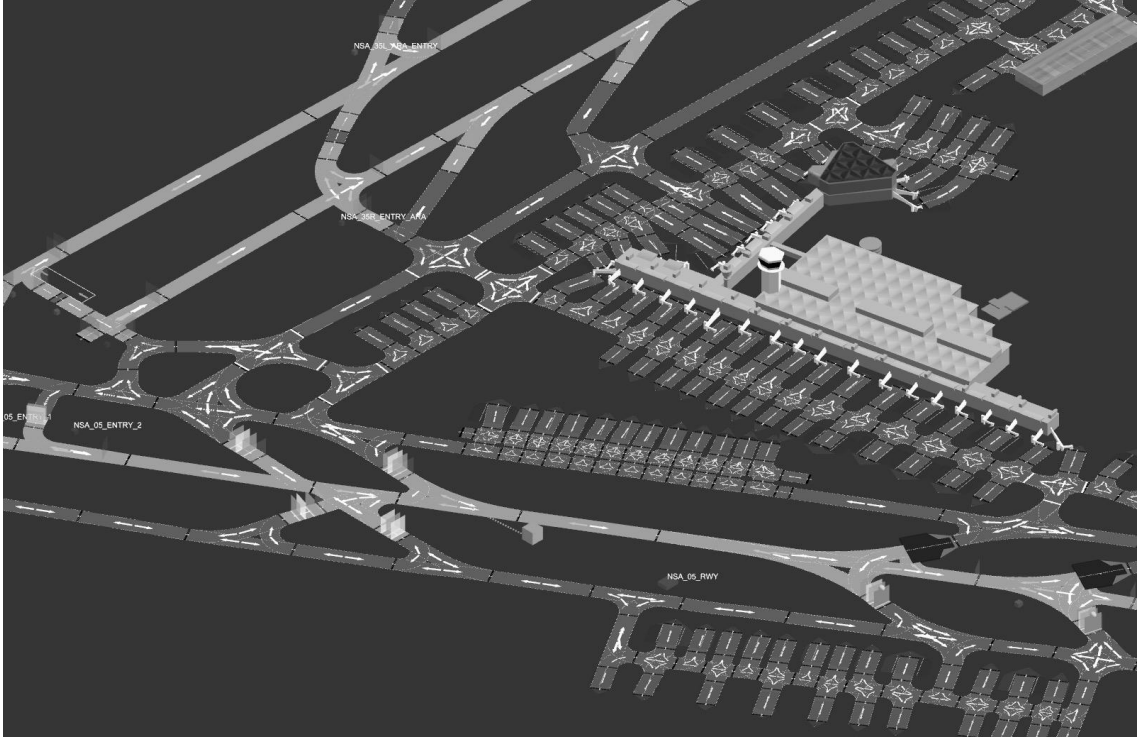
Ana taksi yolları pist sistemini iç hat, dış hat ve kargo olmak üzere 3 terminal binasına ve havaalanındaki çeşitli yerlerindeki 7 adet aprona bağlamaktadır. Açık park pozisyonlarını barındıran bu apronlar L, M, N, P, R, S ve V harfleriyle adlandırılmaktadır. Bunların haricinde bir adet de motor test apronu bulunmaktadır. Havaalanı'nda toplam 104 adet park pozisyonu mevcuttur (Şekil 6.5). Bu park pozisyonlarının 38'i terminal binalarına bağlanan körüklü park pozisyonu, 60 adedi ise apronlarda yer alan açık park pozisyonlarıdır. Körüklü park pozisyonlarının 12 adedi iç hatlara hizmet verirken 26 adedi ise dış hat uçuşları yapan uçaklara hizmet vermektedir. Bunların yanında kargo terminalinde yalnızca kargo uçaklarına tahsis edilmiş 6 adet park pozisyonu bulunmaktadır.



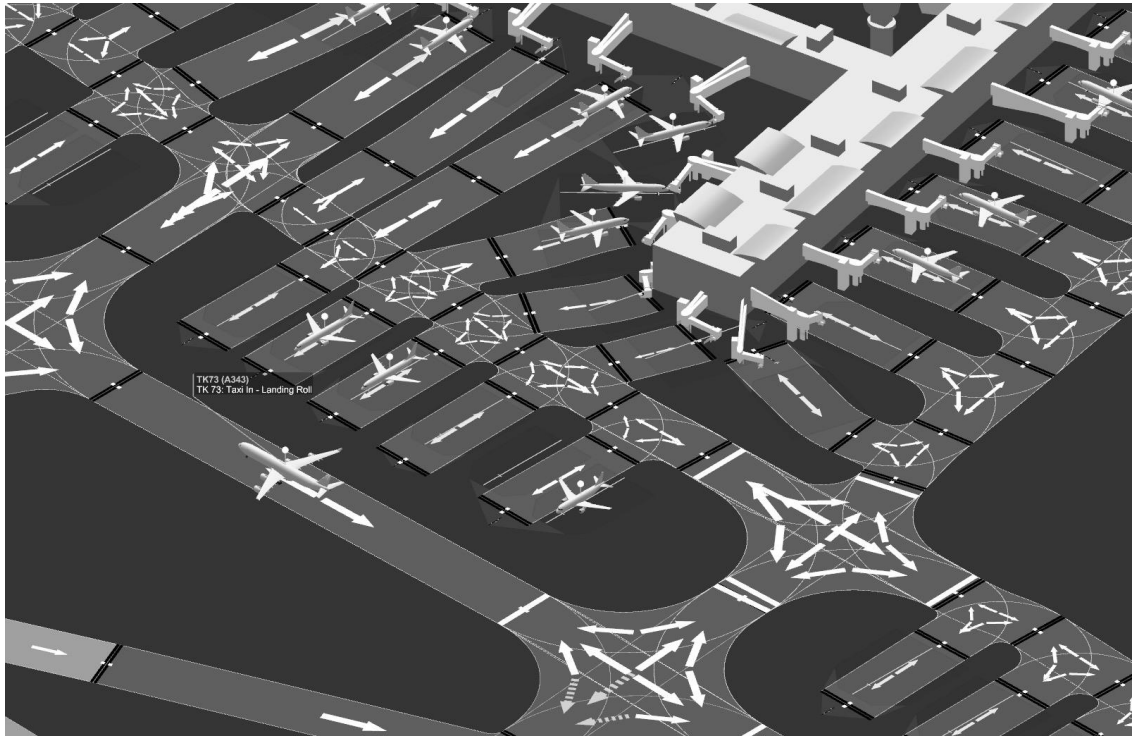
Şekil 6.5. İstanbul Atatürk Havalimanı apron, terminal ve park yeri konumu [54]

Havacılık Bilgi Yayını referans alınarak İstanbul Atatürk Havalimanı apron, terminal, park yeri, pist ve taksi yolları altyapısı gerçek koordinat verilerine dayandırılarak CAST ortamında tanımlanması tamamlandıktan sonra rassal uçuş üreten “trafik akış üretici” kullanılarak modelin doğruluğu herhangi bir uçuş planı tanımlamaya gerek kalmaksızın sınanmıştır. CAST modelindeki pist ve taksi yollarındaki trafik akışının doğru şekilde işlediğinden emin olunduktan sonra seçilen referans pik gün için tüm iniş ve kalkış uçaklarına ilişkin bilgileri içeren “uçuş planı” modele girilmiştir. Uçuş planı csv formatında tanımlanan referans iniş ve kalkış zamanları, uçak tipi, kalkış ve varış meydanları, operasyon tipi (kalkış veya iniş), uçuş kodu, havayolu kodu, uçak tescil numarası ve atama yapılan park pozisyon bilgilerinden meydana gelmektedir.

Uçuş planının tanımlanmasından sonra son yaklaşma hattındaki uçakların ayırma minima kuralları, pist giriş ve çıkışlarındaki bekleme noktaları körüklü ve açık park pozisyonlarına ilişkin atama kuralları; taksi yolları ve kavşaklarındaki çakışma bölgeleri ve geçiş kuralları; push-back (geri itme) hareket yönü ve bu sırada kapatacağı taksi yolu ve park pozisyonlarına ilişkin öncelikler ve kurallar ile pist sisteminin işleyişine ilişkin kurallar ilgili program modülleri kullanılarak oluşturulmuştur. Geri itme manevrası yapacak uçak taksi yolu üzerinde başka uçaklardan dolayı geri itme gecikmesi en fazla 5 dakika olarak belirlenmiştir. Bu süre İstanbul Atatürk Havalimanı’ndaki gerçek operasyon gözlemlerine göre belirlenmiştir. Modelin iki ve üç boyutlu apron bölgesi görünümü Şekil 6.6 ve 6.7’de verilmiştir. CAST yazılımının sağladığı eşzamanlı üç boyutlu görsel simülasyonlarla modeldeki trafik akışının gerçekçiliği sınanmıştır.



**Şekil 6.6.** CAST ile modellenen İstanbul Atatürk Havalimanı plan görüntüsü

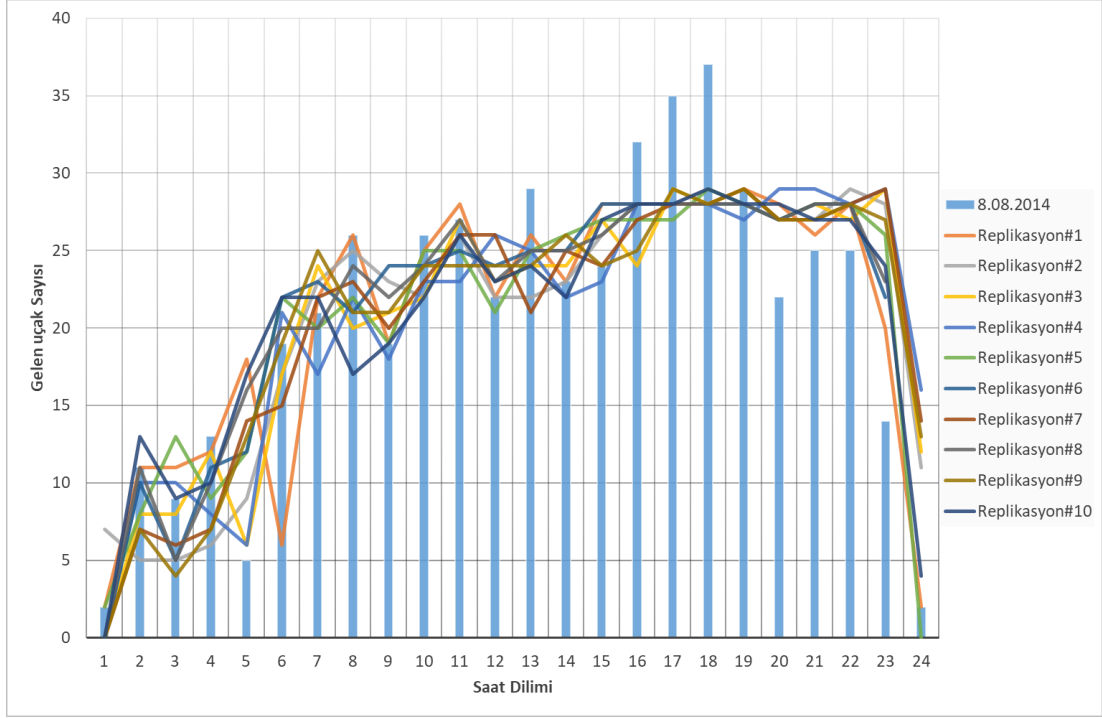


**Şekil 6.7.** İstanbul Atatürk Havalimanı modeli apron bölgesi görüntüsü



### 6.3. Trafik Verilerinin Değerlendirilmesi

İstanbul Atatürk Havalimanı terminal işletmecisi olan TAV, tez konusundan önerilen modelin hızlı zamanlı simülasyon analizlerinin yapılabilmesi için gerekli olan iniş yapacak uçakların piste teker koyma ve park yerine giriş saatleri ile kalkış yapan uçakların motor çalıştırma, taksiye başlama ve pistten teker kesme saatlerini içeren ayrıntılı trafik veri setini tarafımıza sağlamıştır. Ancak TAV tarafından sağlanan 08 Ağustos 2014 tarihli trafik veri seti çoğunluğu hafif kategori olan genel havacılık, askeri ve iş jetlerine ilişkin operasyon bilgilerini içermemektedir. Bu nedenle bu uçuşlar çalışmanın kapsamı dışında bırakılmış ve ticari amaçlı yolcu ve kargo operasyonlarını içeren 496 kalkış ve inişten oluşan toplam 992 uçuş analizlerle dâhil edilmiştir. Referans pik günde gerçekleşen ticari uçuş operasyonlarının %83'ü orta (medium) %17'si ağır (heavy) kategori uçaklarından oluşmakta olup yıllık dağılımlara bakıldığında havaalanında gerçekleşen uçak performans kategorisi dağılımı ile uyumlu olduğu görülmektedir. 992 adetlik trafik dörder saatlik toplamda altı gruba ayrılarak her grup kendi içinde trafik yoğunluğu, iniş uçakları için minimum ve maksimum pist ayırma süresi ve standart sapması, inen uçakların maksimum, minimum ve ortalama park yeri konaklama süresi, inen uçakların kategori dağılımı parametreleri ile değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme ile her bir saat grubu kendi içinde olmak üzere üstel dağılım ile on adet yeni senaryo üretilmiş ve bu senaryolar hızlı zamanlı simülasyon aracı olan CAST üzerinde koşturularak analize uygun veri haline getirilmiştir. Şekil 6.8'de görülen grafikte 8 Ağustos 2014 tarihli iniş operasyonları trafik verisi ve üstel dağılım ile üretilen on adet yeni senaryo görülmektedir. Bu senaryolar incelendiğinde Havacılık Bilgi Yayınlarında belirtilen pist ve son yaklaşma ayırma minimaları uygulandığında maksimum iniş sayısı olarak 29'a ulaşılmıştır. TAV tarafından sağlanan trafik verisindeki 37 iniş operasyonu sayısına ulaşamamıştır.



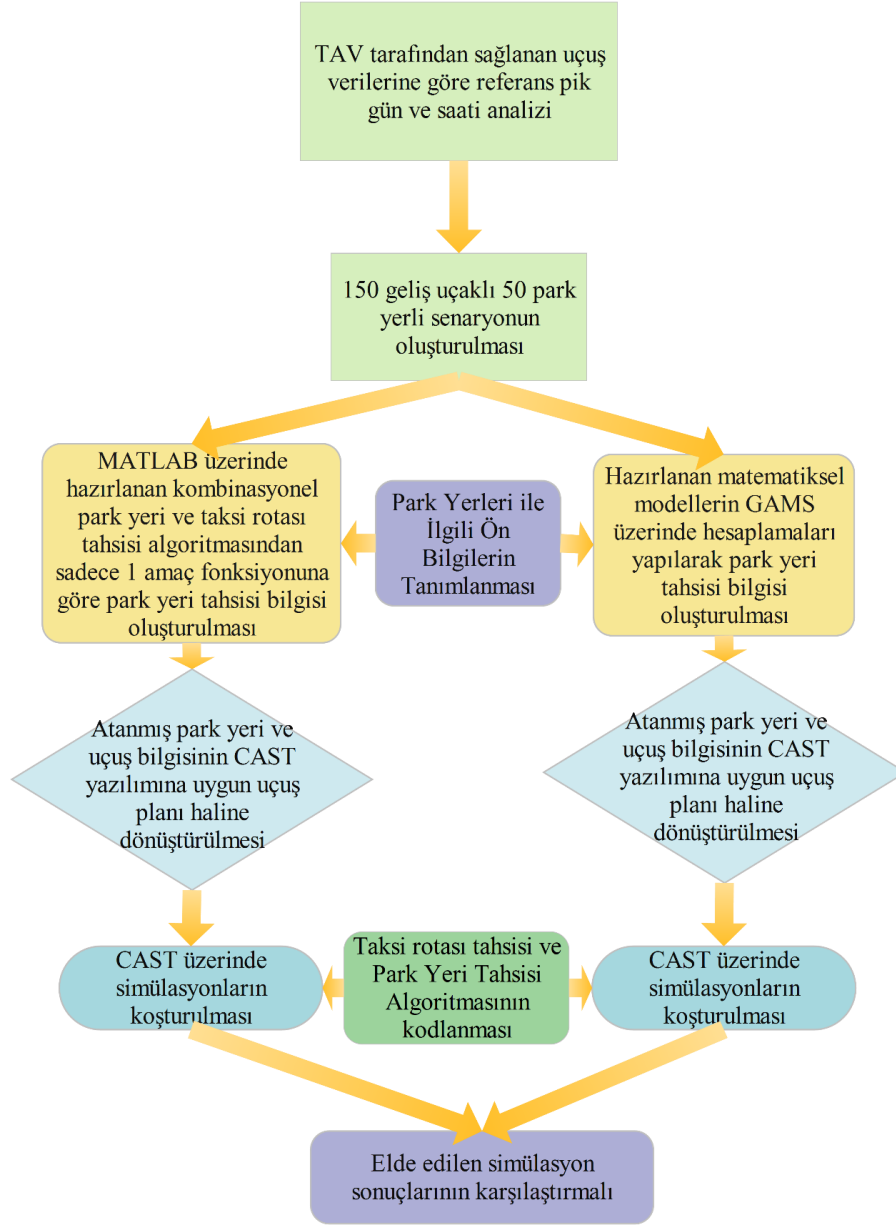
**Şekil 6.8.** 8 Ağustos 2014 tarihinde gerçekleşen trafiklerin saatlik dağılımı bu dağılıma uygun üstel dağılım ile üretilmiş on adet senaryonun trafik dağılımı

#### 6.4. Senaryolar

Kombinasyonel algoritma iki aşamada analiz edilmiştir. Birinci aşamada SA sonuçlarının GAMS sonuçları ile karşılaştırılıp, GAMS sonuçlarından ne kadar uzaklaştığı analiz edilmiştir (Şekil 6.9). İkinci aşamada ise TAV tarafından sağlanan park yeri bilgileri olan 1 günlük gerçek trafik verisinin önerilen algoritma ile karşılaştırmalı analizi yapılmıştır (Şekil 6.10).

Birinci aşamada TAV tarafından sağlanan trafik verisinin pik saati olan 16:00 merkez olmak kaydıyla 2 saat öncesi ve 1 saat sonrası yani 14:00-18:00 arasındaki 150 uçuş verisinden uçuş planı üretilmiştir. Elde edilen uçuş planından üssel dağılımla 150 uçaklı 9 adet daha senaryo ve uçuş planı oluşturulmuştur. Elde edilen 10 senaryo öncelikle çok amaç optimizasyonu tekniği ile önerilen üç matematiksel ile hesaplamaya alınmıştır. Fakat GAMS'in bu problemi yaklaşık iki gün içinde çözmemesi ve yüksek hesaplama kapasitesine sahip bilgisayarlarda dahi yetersiz hafıza hatası (out of memory) alınması nedeniyle her bir amaç fonksiyonunun tek tek hesaplanmasına karar verilmiştir. Aynı zamanda GAMS ile hesaplamalara başlamadan önce iç hat dış hat kısıtı da modele

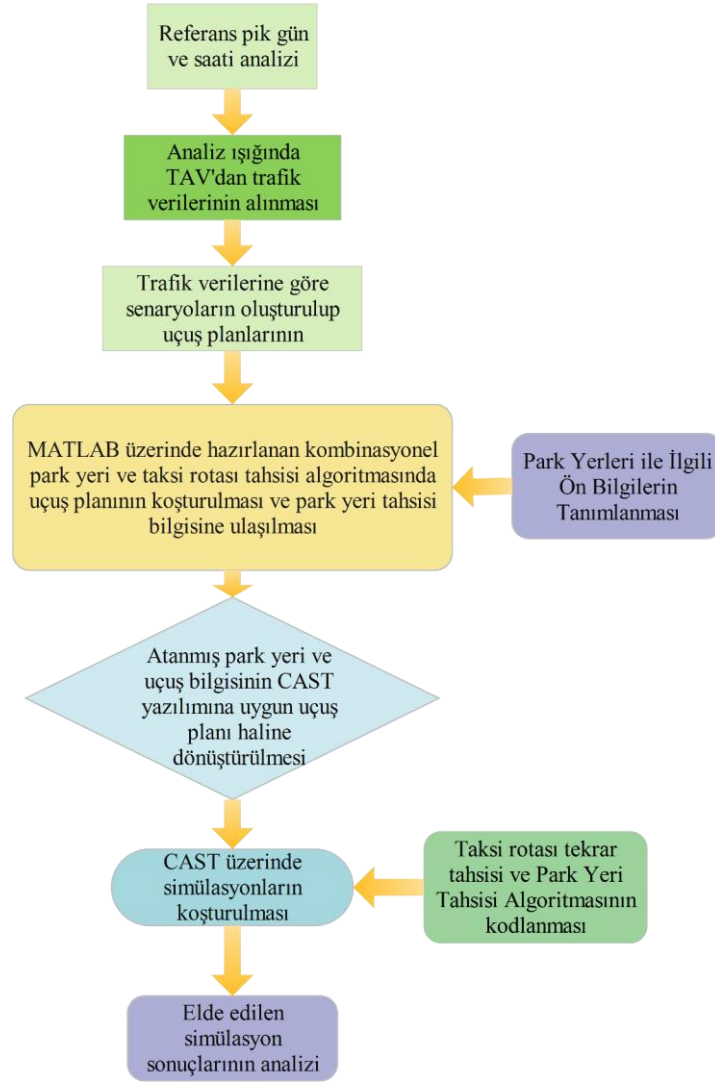
eklenmek istemiştir. Lakin kısıt sayısının artırılması ile replikasyonların hiçbirisinde uygun olmayan çözüm kümesi hatası verdiği için modelden iç hat dış hat kısıtı modelden çıkarılmıştır. Oluşturulan senaryolar pik saat referans alınarak üretildiği için önerilen amaç fonksiyonları ile bu 10 senaryonun 3'üne park yeri tahsisi uygun olmayan çözüm kümesi (infeasible solution) hatasıyla oluşturulamamıştır. Geriye kalan 150 uçaklı 72 park yerli toplamda yedi senaryo her bir amaç fonksiyonu ile hesaplanarak GAMS hesaplaması sonucunda 21 farklı park yeri tahsis sonucu elde edilmiştir. Bu yedi senaryo MATLAB üzerinde de her bir amaç fonksiyonu ile ayrı ayrı hesaplanarak SA çözümüyle 21 farklı park yeri tahsisi elde edilmiştir. Elde edilen 42 adet park yeri tahsisli uçuş planı herhangi bir kodlama yapılmamış CAST üzerinde koşturularak sonuçlar, inen ve kalkan uçak için taksi süreleri, park yeri işgaliye süreleri ve havaalanında bulunma süreleri olmak üzere üç ana parametreden üretilen ortalama AXIT, AXOT, AGUT ve AAUT sonuçları ile analiz edilmiştir. Bu analizler sonuçlar kısmında detayları ile verilmiştir.



Şekil 6.9. Önerilen kombinasyonel park yeri taksi rotası tahsisi algoritması SA ve GAMS sonuçları karşılaştırmasının yapılması için izlenen adımlar

İkinci aşamada CAST üzerinde modelleme ve uçuş planının tanımlanmasından sonra algorithmada belirtilen taksi rotası tahsisi ve park yeri atama algoritması simülasyon modeline eklenmiştir (Şekil 6.10). Böylelikle inen uçaklara, önceden tanımlanmış taksi rotasında başka bir uçağın olmasından kaynaklı gecikme yaşanması durumunda tekrardan taksi rotası tahsisi veya önceden tanımlanmış taksi rotası uygulanamaması durumunda tekrar park yeri tahsisi yapılabilir. Önerilen algoritma modelinin kararlılığının sınanması için gerçek trafik verisi referans alınarak oluşturulan on adet senaryo gerekli hızlı

zamanlı simülasyon ortamı hazırlandıktan sonra deneyler Şekil 6.10'da gösterilen işlemlere tabi tutulmuştur. Bu işlemler sırasıyla referans pik gün ve saatinin analizi, analizler sonucunda TAV'dan verilerin istenmesi, alınan verilere göre senaryoların oluşturulması, oluşturulan uçuş planlarına MATLAB üzerinde hazırlanan kombinasyonel algoritma ile park yeri tahsisinin yapılması, elde edilen park yeri tahsis bilgisinin uçuş planlarına işlenip verilerin CAST üzerinde koşuturulması ve simülasyon sonuçlarının analiz edilmesidir.



Şekil 6.10. Önerilen park yeri ve taksi rotası tahsisi modelinin sınanması sürecinde yapılan işlemler

Trafik verilerine göre 10 adet senaryo ve uçuş planı oluşturulmuştur. Bu uçuş planları 3 farklı havaalanı durumu için MATLAB'da algoritmada hesaplamaya alınıp, 10 adet senaryo için toplamda 30 adet park yeri tahsisi verisi elde edilmiştir. Senaryoların

model doğrulama testleri tamamlandıktan sonra nihai sonuçların üretimi için koşturulmuşlardır. Her bir simülasyon koşturma süresi referans günün ilk saat diliminde kalkış talep eden ilk uçağın park pozisyonunu terk etme zamanı ile iniş talep eden son uçağın park etme zamanları arasındaki zaman periyodun içermektedir. CAST üzerinde bir adet referans senaryo olmak üzere toplamda karşılaştırılacak 31 farklı simülasyon sonucu elde edilmiştir. Simülasyon sonuçlarında elde edilen ortalama EXIT, AXIT, EXOT ve AXOT verileri ile hem önerilen algoritma çıktılarının referans gerçek veriye göre artıları hem de gerçek veriden üretilmiş 10 adet senaryo ile algoritmanın kararlılığı analiz edilmiştir. Detaylı analiz ve karşılaştırma sonuçları yedinci bölümde verilmiştir.

## 7. BULGULAR

### 7.1. Amaç Fonksiyonlarının GAMS ve SA Park Yeri Tahsislerinin CAST Üzerinde Karşılaştırılması

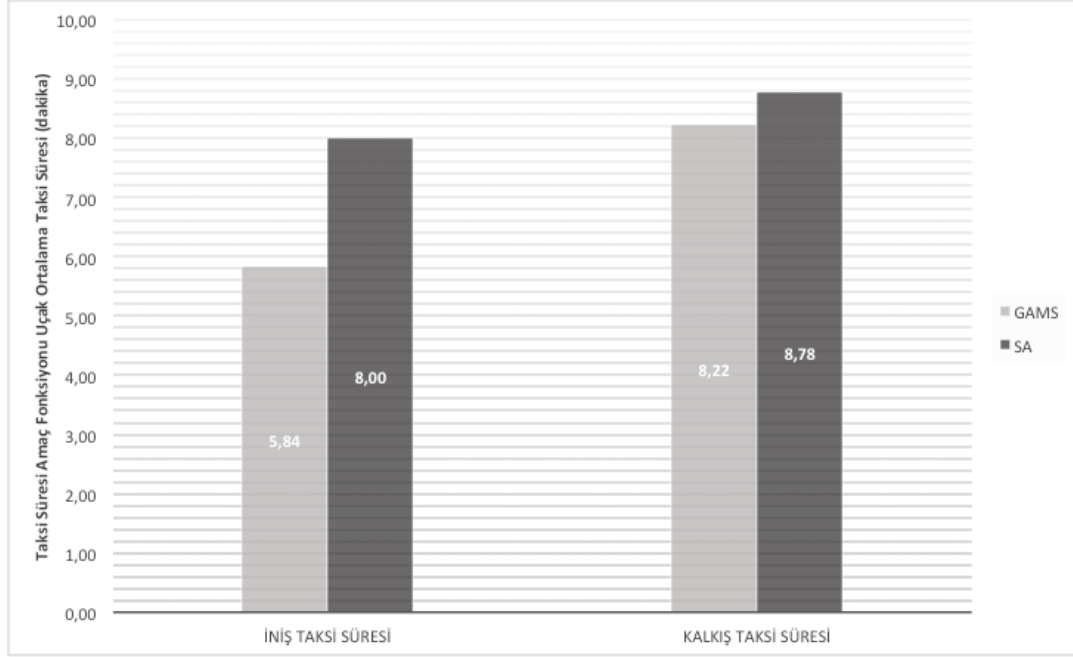
GAMS ve SA park yeri tahsisi çözümlerini karşılaştırmak için elde edilen amaç fonksiyonu değerleri Tablo 7.1’de verilmiştir. Bu tabloda GAMS ve SA sonuçlarının replikasyon karşılaştırmalarına bakıldığında R4 haricinde kalan diğer sonuçlarda GAMS sonuçlarına yakın sonuçların elde edildiği görülmektedir. Önerilen algoritmada yapılan eliminasyon işlemi ile algoritmanın hesaplama süresi 0.1 saniyelere kadar düşürülmüştür. Bu değer GAMS hesaplamalarında ortalama 3 saatleri bulmaktadır. Bu yüzden replikasyonların GAMS ve SA sonuçlarındaki bu farklılıklar kabul edilebilir bir değerdedir.

**Tablo 7.1.** Replikasyonların matematiksel model ve sezgisel algoritma sonuçlarının karşılaştırılması

Replikasyonlar		R1	R2	R3	R4	R6	R9	R10
$F_{PW}$ (dk.)	GAMS	143.049	138.503	156.745	123.928	129.649	135.856	147.945
	SA	158.573	149.032	166.931	179.728	133.948	141.845	151.823
$F_{GU}$ (dk.)	GAMS	1.768	1.653	1.527	1.692	1.447	1.557	1.676
	SA	1.823	1.773	1.739	1.832	1.635	1.665	1.728
$F_{AT}$ (dk.)	GAMS	592	715	576	661	723	698	743
	SA	628	774	642	721	796	745	812

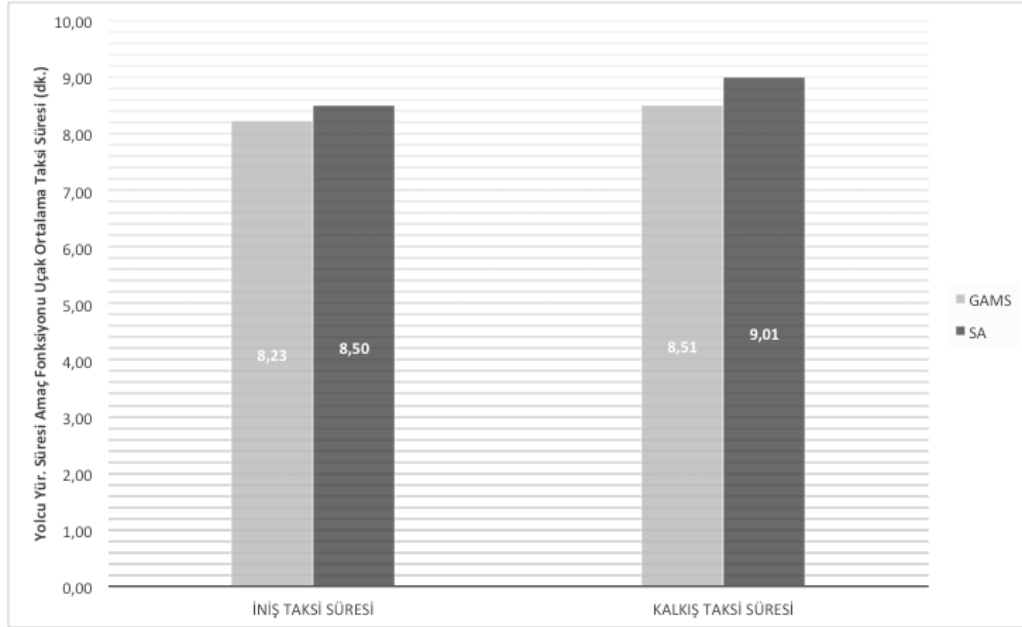
#### 7.1.1. İnen ve kalkan uçak taksi süreleri karşılaştırması

Şekil 7.1’de taksi süresini kısaltmayı hedefleyen amaç fonksiyonuna göre inen ve kalkan uçakların SA ve GAMS karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada iniş taksi süresinde GAMS sonuçlarının daha başarılı olduğu görülebilmektedir.



**Şekil 7.1.** *Taksi süresi amaç fonksiyonuna göre inen ve kalkan taksi süresi (AXIT-AXOT)*

Şekil 7.2’de yolcu yürüyüş süresi amaç fonksiyonunun hesaplamasına göre inen ve kalkan uçakların taksi süreleri replikasyon ortalamaları görülmektedir. Bu grafik ile senaryolarda GAMS ve SA çözüm değerlerinde büyük farklılıklar olmadığı görülmektedir.

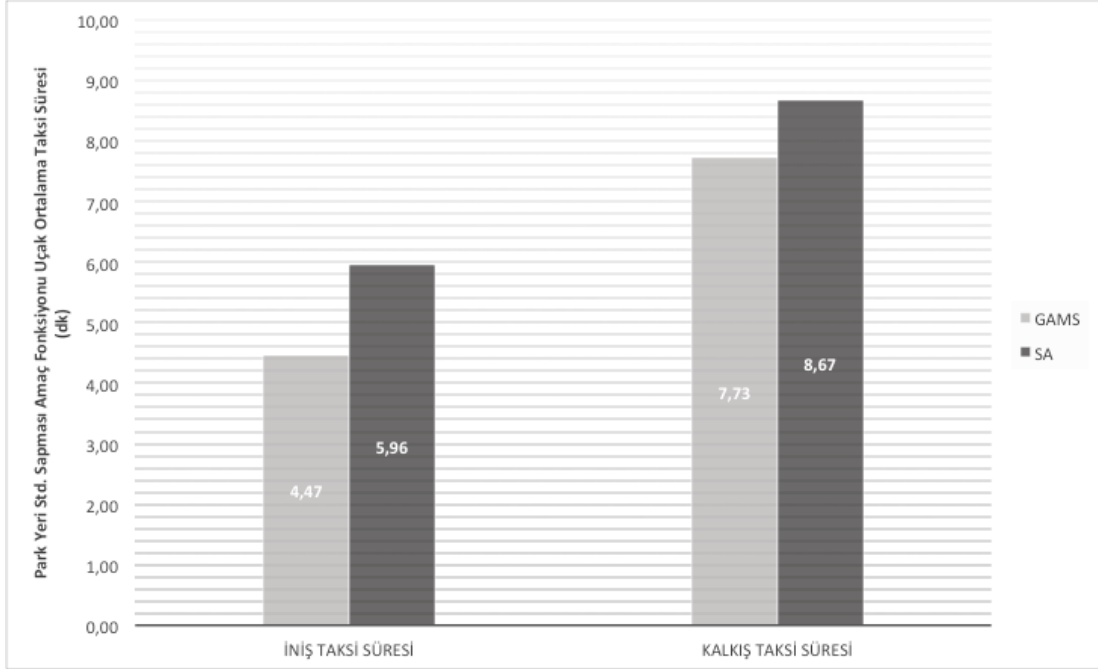


**Şekil 7.2.** *Yolcu yürüyüş süresi amaç fonksiyonuna göre inen ve kalkan uçak taksi süresi (AXIT-AXOT)*

Şekil 7.3’te ise park yeri kullanımı standart sapması amaç fonksiyonunun inen ve kalkan uçakların taksi süreleri üzerine etkisi görülmektedir. Bu grafikte de her ne kadar



GAMS sonuçlarının daha iyi bir çözüm ürettiği görülse de taktik çevrimsel bir uygulamasının olmaması bu zaman farklarını göz ardı edilebilmesini sağlamaktadır. Çünkü önerilen SA bir saniyeden kısa bir sürede bu hesaplamaları yapabiliyor olması çevrimiçi bir sistemi birkaç adım ön plana çıkarabilmektedir.



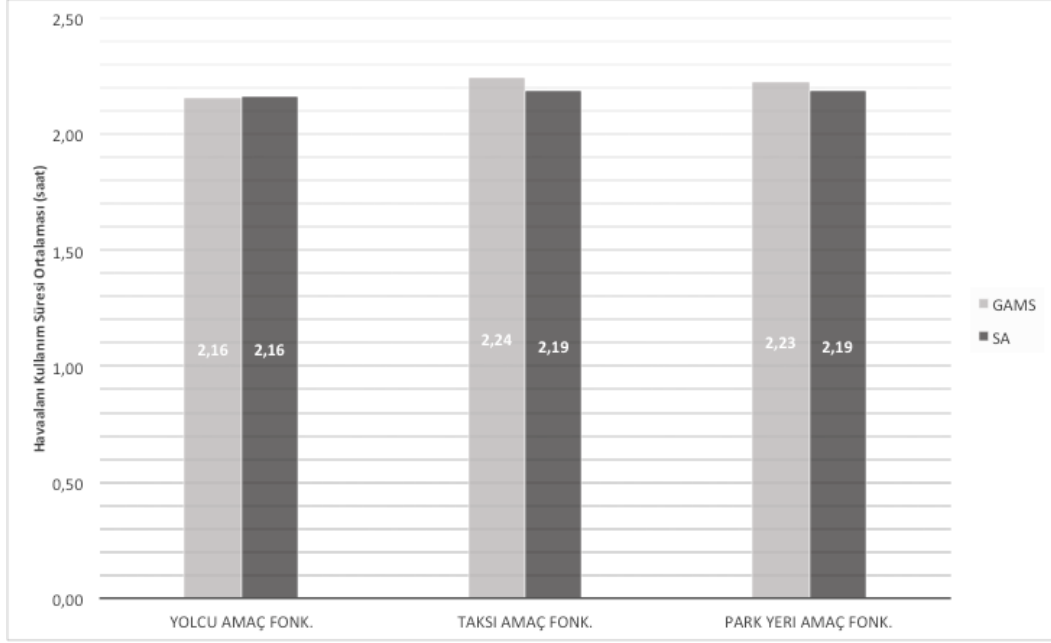
**Şekil 7.3.** Park yeri kullanımı standart sapması amaç fonksiyonuna göre inen ve kalkan uçak taksi süresi (AXIT)

Park yeri kullanımı standart sapması amaç fonksiyonu haricinde diğer amaç fonksiyonlarında GAMS ve SA çözümlerinde büyük bir fark bulunmamaktadır. Bu amaç fonksiyonundaki farkın fazla olmasının sebebi ortalama park yeri kullanım süresini 150 uçak 72 park yeri için hesaplayamamış olması ve lokalde yapılan hesaplamadaki trafik sayısına göre daha az bir trafik sayısında bir uçuş planı ile simülasyonların yapılmış olmasıdır. Park yeri kullanımı standart sapması amaç fonksiyonu bu duruma rağmen çok büyük farklılık göstermemiştir.

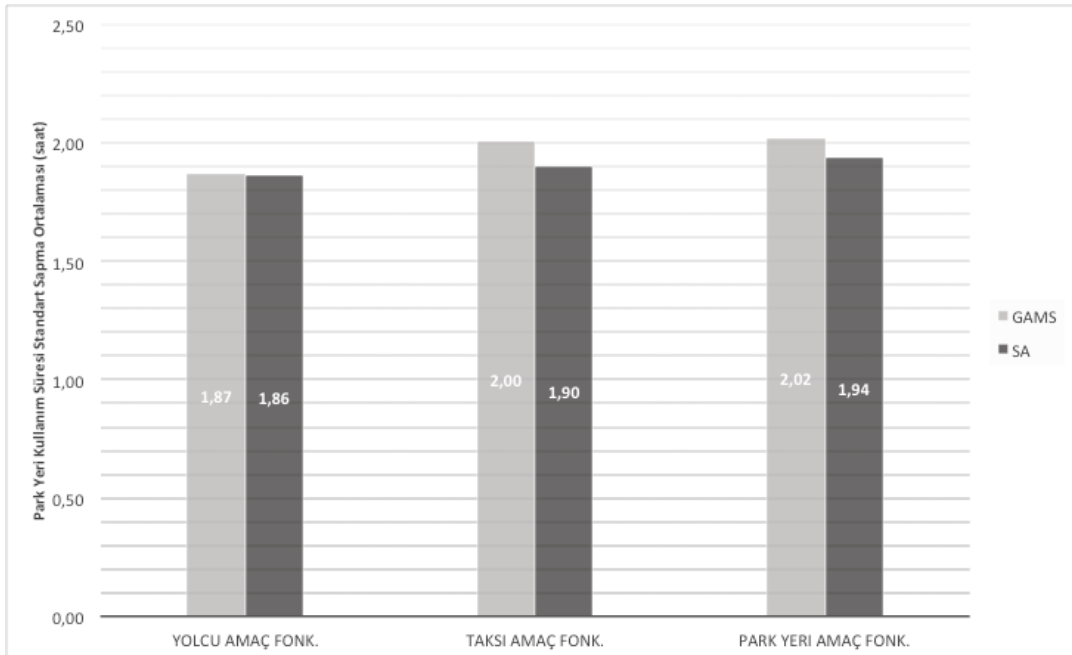
Elde edilen inen ve kalkan uçak taksi süreleri park yeri kullanımı standart sapması ile yolcu yürüyüş süresi amaç fonksiyonlarının elde ettiği değerlerin taksi süresi amaç fonksiyonunda elde edilen değerlerden az olduğu görülmektedir. Bunun sebebi taksi süresi amaç fonksiyonuna göre park yeri tahsisi yapılırken ön tanımlı taksi rotaları kullanılmış ve bu taksi rotaları havacılık bilgi yayınlarına uygun olarak hazırlanmıştır.

### 7.1.2. Havaalanı ve park yeri kullanım süreleri karşılaştırması

Şekil 7.4 ve Şekil 7.5'te havaalanı ve park yeri kullanım süreleri için GAMS ve SA çözümlerinde büyük bir fark olmadığı görülmektedir. Bunun en büyük sebebi önerilen algoritmanın uçuş planlarına bağlı kalması ve çevrimiçi çözüm üretebiliyor olmasıdır.



Şekil 7.4. Ortalama Havaalanı kullanım süresi (AAUT)



Şekil 7.5. Park yeri kullanım süresi standart sapması karşılaştırması (AGUT)

## 7.2. Önerilen Algoritmanın Üç Farklı Senaryoda Mevcut Durum ile Karşılaştırılması

Bu kısımda önerilen kombinasyonel park yeri ve taksi rotası algoritmasının 8 Ağustos 2014 verilerinden türetilmiş 10 adet farklı replikasyon ile referans senaryo trafik verilerinin AXIT ve AXOT parametrelerinde ne kadar bir iyileştirme yapıldığının analizleri yapılmıştır. Referans senaryo ile karşılaştırma yapılırken üç farklı senaryo üzerinde durulmuştur (Tablo 7.2). Bunlardan ilk senaryo apron bölgesi taksi sürelerinin kısaltılmasını hedefleyen, ikinci senaryo AHP sonucunda elde edilen katsayıları alan ve üçüncü senaryo ise terminal binasındaki yolcu yürüyüş sürelerinin kısaltılmasını hedefleyen üç farklı durumdur.

**Tablo 7.2.** Senaryolara göre amaç fonksiyonu ağırlık katsayılarının aldığı değerler

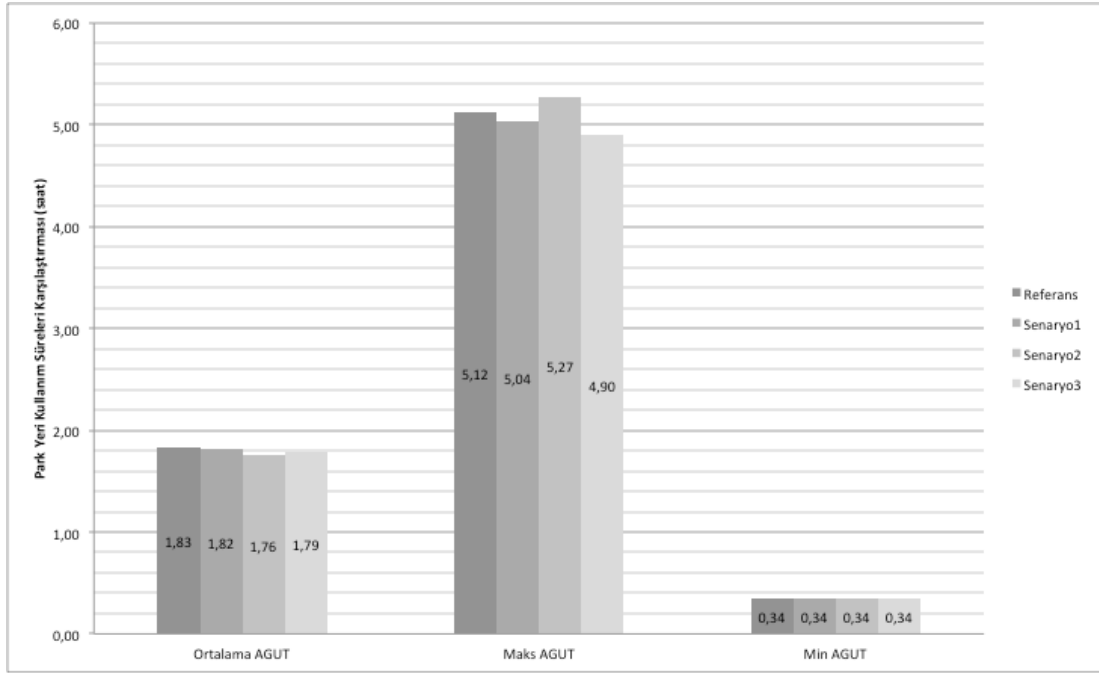
Senaryolar	$\alpha$	$\beta$	$\chi$
Senaryo1	0,30	0,59	0,11
Senaryo2	0,37	0,36	0,27
Senaryo3	0,17	0,33	0,5
Referans	Mevcut Durum		

Bu kısımda uçak taksi süreleri ve park yeri kullanım oranları, CAST yazılımının bize sağladığı sonuçlar ile elde edilmiştir. Yolcu yürüyüş süresi ortalaması ise senaryolardaki uçuş planlarındaki yolcu sayısının modeli tasarlanırken terminal binasındaki referans noktaya olan mesafenin havaalanlarında yolcuların ortalama yürüyüş hızı olan 1,8 km/sa'e oranlanması ile bulunmuştur.

Simülasyon analizlerinde uçakların meydana ortalama tahmini ve gerçek taksi süreleri ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Tahmini süreler ile gerçek taksi süreleri arasındaki fark CAST'ın belirttiği havaalanı kapasite analiz kriterlerine dayanmaktadır [54]. Bu kapasite kriterlerine göre bir uçağın tahmini taksi süresi, apron bölgesinde ilgili zaman döneminde taksi yapan uçak sayısına bağlı olarak değişmektedir. İstanbul Atatürk Havalimanı Avrupa

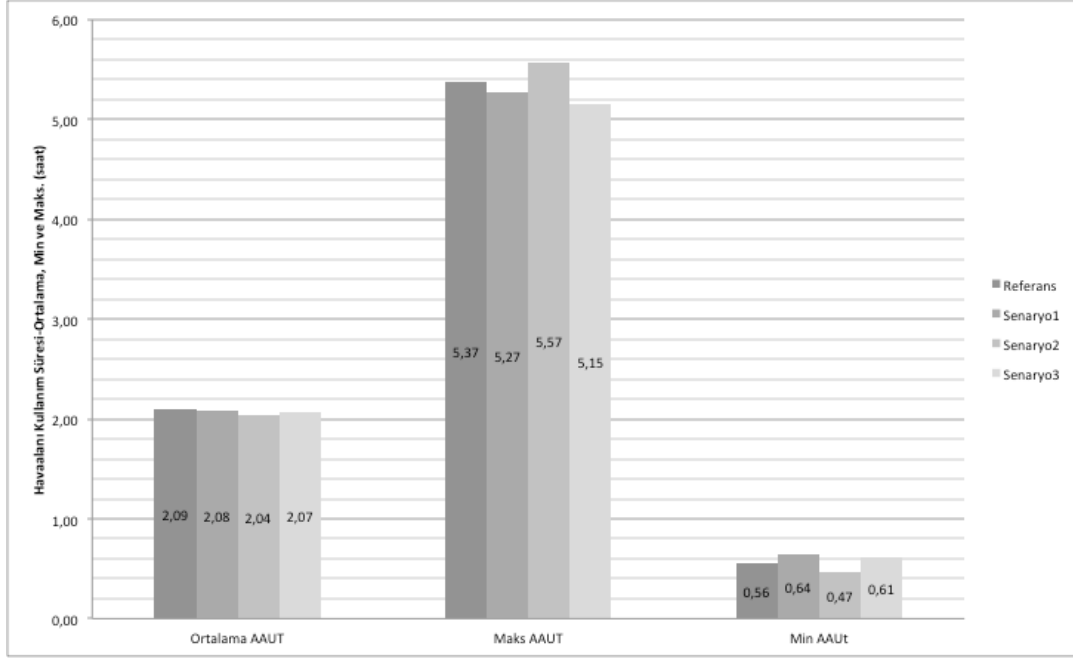
ve Dünya genelinde yoğun bir meydan olması nedeniyle bu havaalanı için belirlenen planlanmış ve tahmini taksi süreleri gerçek taksi sürelerinden farklılık göstermektedir.

Şekil 7.6 önerilen algoritma modelinin ilgili meydana ortalama park yeri işgal sürelerinin referans senaryo ile karşılaştırmasını vermektedir. Bu karşılaştırmada planlanmış ve tahmini park yeri işgal sürelerine bakıldığında üçüncü durumda daha çok park yeri konaklamasına müsaade edilmiş olsa da gerçek ortalama park yeri kullanım süreleri referans senaryonun altında kalmıştır. Bunun sebebi havaalanında 24 saat içerisinde uçak başına ortalama konaklama süresinin yaklaşık 12 dakika artırılabilmesidir. Bir başka deyişle bir gün içerisinde yaklaşık 20 saatlik park yeri kapasite artışın ulaşılabilmektedir.



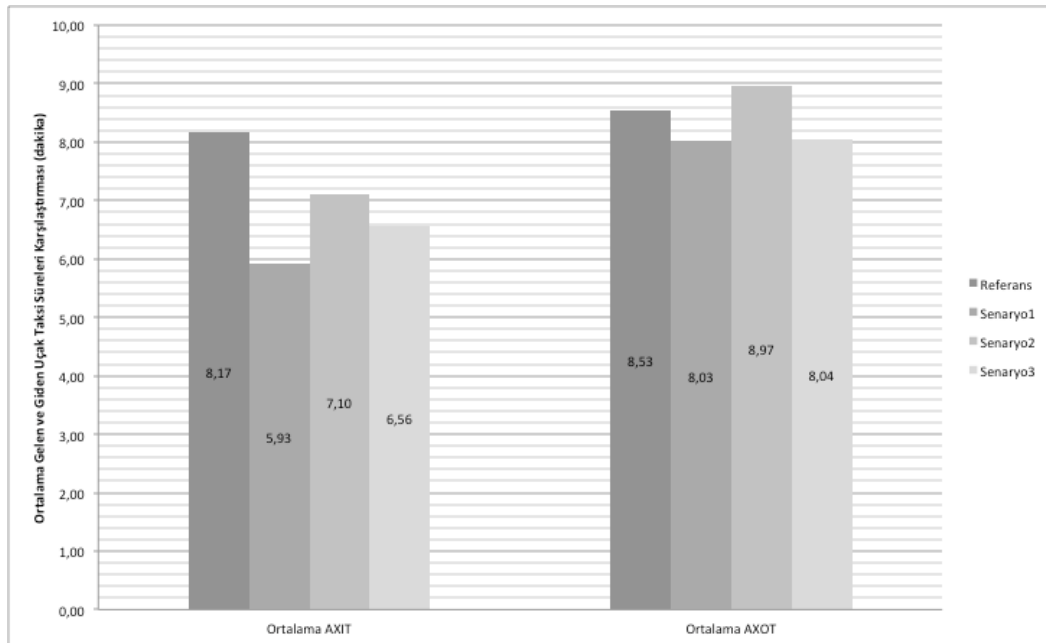
Şekil 7.6. Park yeri kullanım süresi standart sapması karşılaştırması - maks., min. ve ort. (AGUT)

Şekil 7.7 havaalanında bulunma sürelerinin referans senaryo ile karşılaştırılmasını göstermektedir. Bu grafiklerde de planlanmış ve tahmini bulunma süreleri ikinci durumda daha fazla olsa da havaalanında gerçek bulunma süreleri referans ve diğer durumların altında olmuştur. Ortalama değerlerde yine ikinci senaryoda daha iyi bir sonuç elde edilmesi park yeri kullanım süresi ile doğru orantılıdır. Çünkü uzman görüşleri sonucunda elde edilen ağırlık katsayılarında park yeri kullanımı standart sapması diğer ağırlıklardan çok az bir farkla fazladır.



Şekil 7.7. Havaalanı kullanım süresi karşılaştırması (AAUT)

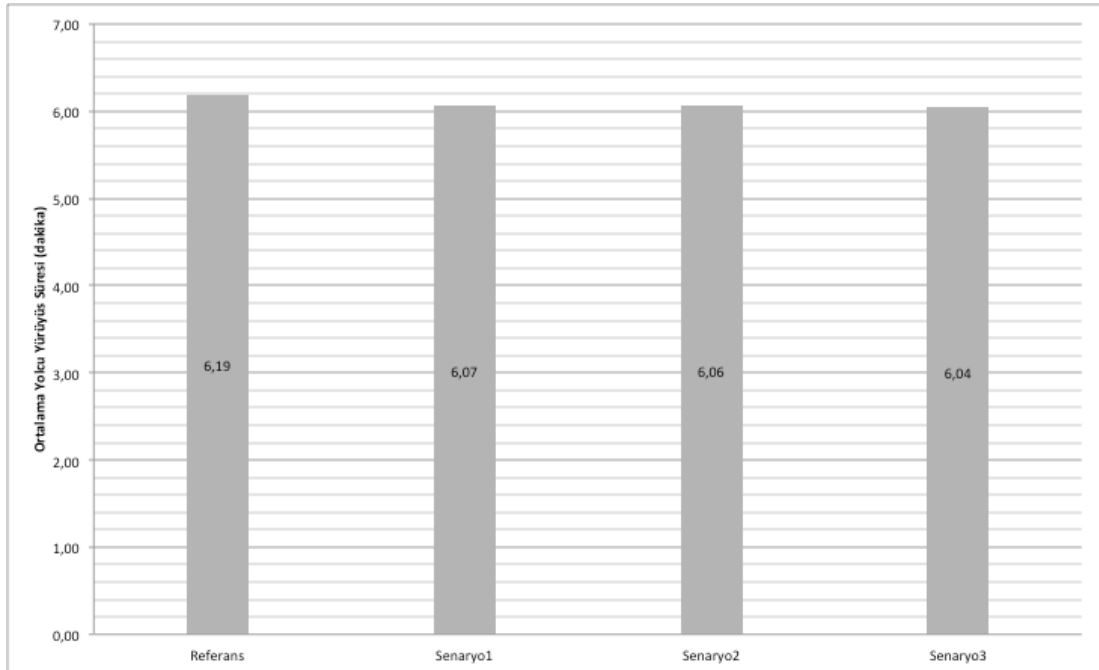
Şekil 7.8 bize önerilen algoritmanın birinci durum yani hareket sahası trafik akışı sürelerinin kısaltılmasının hedeflenmesi karşısında istenen taksi süresinin azaltılmasını sağladığı görülmektedir.



Şekil 7.8. İnen ve kalkan uçak taksi süreleri ortalaması (AXIT-AXOT)

Bu çalışmada yolcu yürüyüş süreleri; ilgili replikasyondaki uçakların yolcu sayılarının atanan park yerinin terminal binasındaki referans noktaya olan yürüyüş mesafesine çarpılıp, Ji T.'nin çalışmasında belirttiği 1,8 km/sa'lık yürüyüş hızına bölünmesi ile bulunmuştur [56].

Şekil 7.9 replikasyonların bütün durum ortalamalarının yolcu yürüyüş süresinin referans yani 8 Ağustos 2014 sonuçları ile karşılaştırması görülmektedir. Bu karşılaştırma grafiğinde önerilen algoritma ile koşturulan bütün senaryoların yolcu yürüyüş mesafelerinin gerçek verideki tahsise göre hesaplanan yolcu başına ortalama yürüyüş süresinin altında kaldığı görülmektedir. Böylelikle yolcu yürüyüş sürelerinin kısaltılmasına ilişkin amaç fonksiyonunun terminal binasında istenilen yolcu bulunma süresini kısaltarak terminal yolcu akışını artırdığı görülmektedir.



Şekil 7.9. Ortalama yolcu yürüyüş süresi karşılaştırması

Ortalama yolcu yürüyüş süresi karşılaştırması grafiğine baktığımızda üçüncü durumda bir yolcunun yürüyüş süresinin diğer durumlardan ortalama 2 saniye daha az olduğu görülmektedir. 2 saniyelik yürüyüş süresinin kısaltılması belki bir yolcu az bir süre olabilir. Lakin terminal binası geneline vurulduğunda bir günde ortalama 90000 yolcuya

hizmet verildiği düşünülürse, günlük toplam 50 saatlik yürüyüş süresinin veya 900 km'lik yürüyüş mesafesinin kısaldığı görülmektedir.

## 8. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Hızlı zamanlı simülasyon modeli üzerindeki Bölüm 7’de analiz edilen sonuçlar ile önerilen sezgisel algoritmanın geleneksel yöntemlere göre daha hızlı sonuç üretebilen ve istenen performans parametrelerinde gerekli iyileştirmeleri sağlayabilen bir sistem olduğu görülebilmektedir. Sistemin getirdiği en büyük avantaj olan havaalanındaki taksi sürelerinin en aza indirilmesinin yanı sıra yolcu yürüyüş sürelerinin artması ve park yeri kullanım oranının homojen dağıtılmaması gibi konvansiyonel atama yöntemlerinde yaşanan problemlerin önüne geçilmiştir. Çünkü algoritmanın karar verme aşamasında çevrimiçi olarak tahsis yapılan park yeri ve taksi yolu bilgisini veriyor olması operatörlerin emek yoğun çalışmalarını en aza indirmektedir.

Havaalanlarında operasyonel verimliliğin sağlanabilmesi için ise havaalanı organizasyonunun işleyişinde zayıf halkaların bulunmaması gerekmektedir. Ancak İstanbul Atatürk Havalimanı gibi doygunluk noktasında hizmet veren havaalanlarında son dakika değişikliklerinden kaynaklı problemler park yeri tahsis planlaması ve hareket sahasının etkin ve verimli bir şekilde yapılamamasına neden olmaktadır. Havalimanlarının bir diğer problemi ise taksi yollarında manevra yapan uçakların yaşadığı gecikmeler ve çakışmalardan kaynaklı taksi sürelerinin uzamasıdır. Bu gecikmeler hem park yerine daha geç bir sürede varmasına hem de diğer uçakların taksi sürelerinde de artışa neden olmaktadır. Önerilen model ile park yeri tahsisinin çevrimiçi olarak taksi rotası ile eş zamanlı yapılması hareket sahaslarının etkin kullanımının önünü açtığı görülmüştür.

Uygulama havaalanı olan İstanbul Atatürk Havalimanı’nda sezgisel algoritmanın Bölüm 7’de de görüldüğü gibi hem park yerlerinin dengeli kullanımında hem uçak taksi sürelerinin kısılmasında hem de terminal binasındaki yolcu yürüyüş sürelerinin azalmasında faydası olduğu görülmektedir. Çünkü ortaya konulan algoritmaya havaalanlarına özgü karar kriterleri tanımlanabilmesinin yanı sıra çevrimiçi olarak sonuç üretebilir nitelikte olmasıdır. Dinamik kriterli çok amaçlı sezgisel algoritmanın uyarlanabilir jenerik bir algoritma olduğu görülebilmektedir.

Bu tez çalışmasında elde edilen referans senaryonun önerilen algoritma ile karşılaştırma sonuçlarından ilerleyen süreçte hem yakıt hem de emisyon hesapları yapılması planlanmaktadır. Böylelikle önerilen algoritmanın yakıt ve emisyon hesapları



yapıldığında süre avantajlarının yanı sıra ekolojik çevreye katkıları da ortaya çıkarılmış olacaktır.

Havaalanı hava tarafı kapasitesinin verimli ve etkili kullanımı buradaki uçak operasyonlarına ilişkin kritik süreçlerin seyrüsefer hizmet sağlayıcı, havaalanı işleticisi, havayolu ve yer hizmetleri işletmeleri arasında güncel ve dinamik bilgi paylaşımını içeren bir iş birliğine ve mümkün mertebe otomasyona dayalı şekilde yürütülmesini zorunlu kılmaktadır. Bu zorunluluklar havaalanlarındaki operasyonların yürütülmesinde karar destek sistemlerinin kullanımını yaygın hale getirmektedir. Önerilen algoritmanın havaalanlarında kullanılabilecek karar destek sistemlerine uyarlanabilir olması bu tez çalışmasının çevrimiçi çözüm üretebilir nitelikte olduğunu göstermektedir. Özellikle terminal binası içine, taksi yollarına ve park yerlerine konulacak kamera sistemleri ile karar destek sistemine girdi oluşturulup taksi rotası ve park yeri tahsisi bilgisi gerekli birimleri ulaştırılabileceği düşünülmektedir. İlerleyen süreçte TÜBİTAK ve Avrupa Birliği projeleri ile önerilen algoritmanın gerçek zamanlı sınamalarının yapılması planlanmaktadır. Bu sayede havaalanlarında eniyileme algoritmalarını içeren karar destek sistemlerinin gerçek operasyonlara ne kadar katkısı olacağı görülmüş olacaktır.

## KAYNAKÇA

- [1] Eurocontrol (2017). *EUROCONTROL Seven-Year Forecast February 2017*, Edition Number: 17/01/02-100.
- [2] International Civil Aviation Organization (2004). *Air Traffic Services Annex 14 to the convention of International Civil Aviation: Aerodromes- Volume I Aerodrome Design and Operations*, Fourth edition.
- [3] Wells, T.A. ve Young, S.B. (2004). *Airport Planning and Management (5. Baskı)*. New York: *McGraw-Hill*.
- [4] International Civil Aviation Organization (2001). *Air Traffic Services Annex 11 to the convention of International Civil Aviation*, Thirteenth edition.
- [5] International Civil Aviation Organization (1984). *Air Traffic Services Planning Manual*, Doc. 9426-AN/924, First edition.
- [6] Marks, A. ve Rietsma, K. (2014). Airport Information Systems- Airside Management Information Systems, *Intelligent Information Management*, 6, 149-156.
- [7] Bouras, A., Ghaleb, M.A., Suryahatmaja, U.S. ve Salem, A.M. (2014). The Airport Gate Assignment Problem: A Survey. *Scientific World Journal*. PP. 27.
- [8] Guepet, J., Briant, O., Gayon, J.P. ve Acuna-Agost, R. (2016). The aircraft ground routing problem : Analysis of industry punctuality indicators in a sustainable perspective. *European Journal of Operational Research*. 248, (3), 827-839.
- [9] Cavcar, A. (1998). *Temel Hava Trafik Yönetimi*. Eskişehir. *Anadolu Üniversitesi Yayınları* No:7.
- [10] Wright, P. H. ve Ashford, N. (1992). *Airport Engineering*, *John Wiley and Sons*, New York, 185-229.
- [11] Janic, M. (2000). *Air Transport System Analysis and Modelling*. *G.D. Gordon and Breach Science Publishers*, Netherlands, 9-49.
- [12] Braaksma, J. P. ve Shortreed, J. H. (1971). Improving airport gate usage with critical path method., *Transportation Engineering Journal of ASCE*, 187-203.
- [13] Babic, O., Teodorovic, D. ve Tošic, V. (1984). Aircraft stand assignment to minimize walking, *Journal of Transportation Engineering*, cilt 1, no. 110, 55-66.

- [14] Bandara, S. ve Wirasinghe, S.C. (1992). Walking distance minimization for airport terminal configurations, *Transportation Research Part A*. 59-74.
- [15] Yan, S. ve Huo, C. M. (2001). Optimization of multiple objective gate assignments., *Industrial Engineering*, no. 63, 1135-1144.
- [16] Ruperto, F. ve Francesc R. (2007). Reducing Total Time in the Gate Assignment Problem. *Transportation Research Board 86th Annual Meeting*. Washington DC.
- [17] Neuman, U. M. ve Atkin, J. A. (2013). Airport Gate Assignment Considering Ground Movement, *4th International Conference on Computational Logistics*, Copenhagen.
- [18] Mangoubi, R. S. ve Mathaisel, D. F. (1985). Optimizing gate assignment at airport terminals, *Transportation Science*, 19, (2), 173-178.
- [19] Haghani, A. ve Chen, M.C. (1998). Optimizing gate assignments at airport terminals. *Transportation Research Part A*, 32, (6), 437-454.
- [20] B.A.C.o.E.B TEAM ve A.I.C.o.E. TEAM (2009). Gate assignment solution (GAM) using hybrid heuristic algorithm. *Draft Technical White Paper On Gate Assignment Solution*, Wipro Technologies (WIT).
- [21] Ding J. ve Zhang Y. (2013). A discrete particle swarm optimization algorithm for gate and runway combinatorial optimization problem. *Research Journal of Applied Sciences*, 10, (5), 2997-3003.
- [22] Zhao, H. ve Cheng, L. (2014). Ant colony algorithm and simulation for robust airport gate assignment. *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 804310.
- [23] Cheng, C.H., Ho, S. ve Kwan, C.L. (2012). The use of meta-heuristics for airport gate assignment. *Expert Systems with Applications*, 39, (16), 12430-12437.
- [24] Bouras, A., Ghaleb, M.A. Suryahatmaja, U.S. ve Salem, A.M. 2014. The Airport Gate Assignment Problem: A Survey. *Scientific World Journal*. 27.
- [25] Gu, Y. ve Chung, C.A. (1999). Genetic algorithm approach to aircraft reassignment problem. *Journal of Transportation Engineering*, 125, (5), 384-389.
- [26] Xu, J. ve Bailey, G. (2001). The airport gate assignment problem: Mathematical model and a tabu search algorithm. *Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences*.

- [27] Yan, S., Shieh, C.Y. ve Chen, M. (2002). A simulation framework for evaluating airport gate assignments. *Transportation Research Part A*, 36, (10), 885-898.
- [28] Ding, H., Lim, A, Rodrigues, B. ve Zhu, Y. (2004). Aircraft and gate scheduling optimization at airports. *Proceedings of the 37th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 1185-1192.
- [29] Cheng, C.H., Ho, S. ve Kwan, C.L. (2012). The use of meta-heuristics for airport gate assignment. *Expert Systems with Applications*, 39, (16), 12430-12437.
- [30] Şeker, M. ve Noyan, N. (2012). Stochastic Optimization Models for The Airport Gate Assignment Problem. *Transportation Research Part A.*, 438-459.
- [31] Genç, H. M., Erol, O. K., Eksin, İ., Berber, M. F. ve Güteryüz, B. O. (2012). A stochastic neighborhood search approach for airport gate assignment problem. *Expert Systems with Applications*, 39(1), 316-327.
- [32] Brazile, R.P. ve Swigger, K.M. (1988). GATES: An airline gate assignment and tracking expert system, *IEEE Expert*, 4, (2), 33-39.
- [33] Gossling, G. (1990). Design of an expert system for aircraft gate assignment. *Transportation Research Part A*, 24, (1), 59-69.
- [34] Hamzawi, S.G. (1986). Management and planning of airport gate capacity: a microcomputer-based gate assignment simulation model. *Transportation Planning and Technology*, 11, (3), 189-202.
- [35] Cheng, Y. (1998). Network-based simulation of aircraft at gates in airport terminals. *Journal of Transportation Engineering*, 124, (2), 188-196.
- [36] Atkin, J. A., Burke, E. K. ve Ravizza, S. (2010). The airport ground movement problem: Past and current research and future directions. *In Proceedings of the 4th International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT)*, Budapest, Hungary, 131-138.
- [37] Gerdes, I. ve Temme, A. (2012). Taxi routing for aircraft: Creation and Controlling, Ground movements with time constraints. *SESAR Innovation Days*, Braunschweig.
- [38] Chua, Z. K., Cousy, M., Andre, F. ve Causse, M. (2014). Simulating Air Traffic Control Ground Operations: Preliminary Results from Project Modern Taxiing, *SESAR Innovation Days*, Madrid.
- [39] SINTEF (2015). SINTEF ATC Optimization Library, *SESAR Projects 12.3.3*.

- [40] Zhou, H. ve Jiang, X. (2015). Research on taxiway path optimization based on conflict detection. *PloS one*, 10(7), e0134522.
- [41] Jiang, Y., Xu, X., Zhang, H. ve Luo, Y. (2015). Taxiing route scheduling between taxiway and runway in hub airport. *Mathematical Problems in Engineering*.
- [42] Guépet, J., Briant, O., Gayon, J. P. ve Acuna-Agost, R. (2016). The aircraft ground routing problem: Analysis of industry punctuality indicators in a sustainable perspective. *European Journal of Operational Research*, 248(3), 827-839.
- [43] Kim, S. H., Feron, E. Ve Clarke, J. P. (2013) Gate Assignment to Minimize Passenger Transit Time and Aircraft Taxi Time, *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 36, (2).
- [44] Smeltink, J. W., Soomer, M. J., Waal, P. R. ve Mei, R. D. (2004), An Optimisation Model for Airport Taxi Scheduling, *Citeseer*.
- [45] Pavese, G., Bruglieri, M., Rolando, A. ve Careri, R. (2017), DMAN-SMAN-AMAN Optimisation at Milano Linate Airport, *7<sup>th</sup> SESAR Innovation Days 2017*, Belgrad.
- [46] Chua, Z., Cousy, M., Causse, M. ve Lancelot, F. (2016), Initial Assessment of the Impact of Modern Taxing Techniques on Airport Ground Control, *International Conference on Human-Computer Interaction in Aerospace 2016*, Kanada.
- [47] Güçlü, O. E. (2015). Hava Alanların Uçak Park Yeri Tahsisi ve Taksi Hareketleri Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi.
- [48] Güçlü, O.E. ve Çetek, C. (2017). Analysis of aircraft ground traffic flow and gate utilisation using a hybrid dynamic gate and taxiway assignment algorithm, *The Aeronautical Journal*, 121(1240), 721-745.
- [49] EUROCONTROL, *Base of Aircraft Data V.3 (BADA)*, *EUROCONTROL Publication*.
- [50] Schrijver, A. (2002). Combinatorial optimization: polyhedra and efficiency. Vol. 24. *Springer Science & Business Media*.
- [51] Saaty T. L. (2008). The Analytic Hierarchy and Analytic Network Measurement Processes: Applications to Decisions Under Risk, *European Journal of Pure and Applied Mathematics*, Vol 1, No 1, s. 125.

- [52] Liberatore, M.J., Nydick, R.L. ve Sanchez, P.M. (1992). The evaluation of research papers, *Interfaces*, 22(2), 92-100.
- [53] Anonim (2014). Aerodromes, Aeronautical Information Publication, AIP, *Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü*, Ankara.
- [54] Cetek, C., Cınar, E., Aybek F. ve Cavcar A. (2014). Capacity and Delay Analysis for Airport Manoeuvring Areas using Simulation, *Aircraft Engineering and Aerospace Technonolgy: An International Journal*, Volume 86/ 1, 43-55.
- [55] ARC (2017). CAST Aircraft Simulation v.4. *Airport Research Centre GMBH*.
- [56] Ji, T. (2005). Frequency and velocity of people walking. *Structural Engineer* 84.3, 36-40.

## **EKLER**

### **EK-1: Analitik Hiyerarşi Süreci**

Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), ilk olarak 1968 yılında Myers ve Alpert ikilisi tarafından ortaya atılmış ve 1977 de ise Saaty tarafından bir model olarak geliştirilerek karar verme problemlerinin çözümünde kullanılabilir hale getirilmiştir [51]. AHP, karar hiyerarşisinin tanımlanabilmesi durumunda kullanılan, kararı etkileyen faktörler açısından karar noktalarının yüzde dağılımlarını veren bir karar verme ve tahminleme yöntemi olarak açıklanabilir. AHP bir karar hiyerarşisi üzerinde, önceden tanımlanmış bir karşılaştırma skalası kullanılarak gerek kararı etkileyen faktörler ve gerekse bu faktörler açısından karar noktalarının önem değerleri açısından, birebir karşılaştırmalara dayanmaktadır. Sonuçta önem farklılıkları, karar noktaları üzerinde yüzde dağılıma dönüşmektedir. Bir karar verme probleminin AHP ile çözümlenebilmesi için gerçekleştirilmesi gereken aşamalar aşağıda her bir aşamada, formülasyon ile birlikte ilgili açıklamalar yapılarak Saaty'nin metodolojisi ile tanımlanmıştır.

#### **Adım 1: Karar Verme Problemi Tanımlanır**

Karar verme probleminin tanımlanması, iki aşamadan oluşturulur. Birinci aşamada karar noktaları saptanır. Diğer bir deyişle karar kaç sonuç üzerinden değerlendirilecektir sorusuna cevap aranır. İkinci aşamada ise karar noktalarını etkileyen faktörler saptanır. Bu çalışmada karar noktalarının sayısı  $m$ , karar noktalarını etkileyen faktör sayısı ise  $n$  ile sembolize edilmiştir. Özellikle sonucu etkileyecek faktörlerin sayısının doğru belirlenmesi ve her bir faktörün detaylı tanımlarının yapılması, ikili karşılaştırmaların tutarlı ve mantıklı yapılabilmesi açısından önemlidir.

#### **Adım 2: Faktörler Arası Karşılaştırma Matrisi Oluşturulur**

Faktörler arası karşılaştırma matrisi,  $n \times n$  boyutlu bir kare matristir. Bu matrisin köşegeni üzerindeki matris bileşenleri 1 değerini alır. Karşılaştırma matrisi aşağıda gösterilmiştir.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

Karşılaştırma matrisinin köşegeni üzerindeki bileşenler, yani  $i = j$  olduğunda, 1 değerini alır. Çünkü bu durumda ilgili faktör kendisi ile karşılaştırılmaktadır. Faktörlerin karşılaştırılması, birbirlerine göre sahip oldukları önem değerlerine göre birebir ve karşılıklı yapılır. Faktörlerin birebir karşılıklı karşılaştırılmasında Tablo 1'deki önem skalası kullanılır.

Örneğin birinci faktör üçüncü faktöre göre karşılaştırmayı yapan tarafından **daha önemli** görünüyorsa, bu durumda karşılaştırma matrisinin birinci satır üçüncü sütun bileşeni ( $i = 1, j = 3$ ), 3 değerini alacaktır. Aksi durumda yani birinci faktörün üçüncü faktörle karşılaştırılmasında, **daha önemli** tercihi üçüncü faktörden yana kullanılacaksa bu durumda karşılaştırma matrisinin birinci satır üçüncü sütun bileşeni 1/3 değerini alacaktır. Aynı karşılaştırmada birinci faktörle üçüncü faktörün karşılaştırılmasında faktörler eşit öneme sahip oldukları yönünde tercih kullanılıyorsa bu durumda bileşen 1 değerini alacaktır.

Karşılaştırmalar, karşılaştırma matrisinin tüm değerleri 1 olan köşegeninin üstünde kalan değerler için yapılır. Köşegenin altında kalan bileşenler için ise doğal olarak (1) formülünü kullanmak yeterli olacaktır.

$$a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} \quad (1)$$

Yukarıda verilen örnek dikkate alınırsa karşılaştırma matrisinin birinci satır üçüncü sütun bileşeni ( $i = 1, j = 3$ ) 3 değerini alıyorsa, karşılaştırma matrisinin üçüncü satır birinci sütun bileşeni ( $i=3, j=1$ ), (1) formülünden 1/3 değerini alacaktır.



**Tablo 1.** *Önem Skalası [52]*

<b>Önem Değerleri</b>	<b>Değer Tanımları</b>
1	Her iki faktörün eşit öneme sahip olması durumu
3	1. Faktörün 2. Faktörden daha önemli olması durumu
5	1. Faktörün 2. Faktörden çok önemli olması durumu
7	1. Faktörün 2. Faktöre nazaran çok güçlü bir öneme sahip olması durumu
9	1. Faktörün 2. Faktöre nazaran mutlak üstün bir öneme sahip olması durumu
2,4,6,8	Ara değerler

**Adım 3:** *Faktörlerin Yüzde Önem Dağılımları Belirlenir.*

Karşılaştırma matrisi, faktörlerin birbirlerine göre önem seviyelerini belirli bir mantık içerisinde gösterir. Ancak bu faktörlerin bütün içerisindeki ağırlıklarını, diğer bir deyişle yüzde önem dağılımlarını belirlemek için, karşılaştırma matrisini oluşturan sütun vektörlerinden yararlanılır ve **n adet** ve **n bileşenli** B sütun vektörü oluşturulur.

Aşağıda bu vektör gösterilmiştir:

$$B_i = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ b_{n1} \end{bmatrix}$$

B sütun vektörlerinin hesaplanmasında (2) formülünden yararlanılır.

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (2)$$

Örneğin değerlendirme faktörlerinin birbirleriyle karşılaştırılmalarını gösteren A karşılaştırma matrisi aşağıdaki gibi tanımlanmışsa ve  $B_1$  vektörü hesaplanmak isteniyorsa,

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 5 \\ 3 & 1 & 4 \\ 1/5 & 1/4 & 1 \end{bmatrix}$$

Bu durumda  $B_1$  vektörünün  $b_{11}$  elemanı,  $b_{11} = \frac{1}{1+3+0,2}$  olarak hesaplanacaktır.

Benzer şekilde  $B_1$  vektörünün diğer elemanları hesaplandığında, vektör aşağıdaki gibi elde edilebilir ve sütun vektörünün bileşenleri toplandığında toplamın 1 olduğu görülebilir.

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0,238 \\ 0,714 \\ 0,048 \end{bmatrix}$$

Yukarıda anlatılan adımlar diğer değerlendirme faktörleri içinde tekrarlandığında faktör sayısı kadar B sütun vektörü elde edilecektir.  $n$  adet B sütun vektörü, bir matris formatında bir araya getirildiğinde ise aşağıda gösterilen C matrisi oluşturulacaktır.

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nn} \end{bmatrix}$$

Yukarıdaki örnek göz önüne alındığında C matrisi aşağıdaki gibi oluşur.

$$C = \begin{bmatrix} 0,238 & 0,210 & 0,500 \\ 0,714 & 0,632 & 0,400 \\ 0,048 & 0,158 & 0,100 \end{bmatrix}$$

C matrisinden yararlanarak, faktörlerin birbirlerine göre önem değerlerini gösteren yüzde önem dağılımları elde edilebilir. Bunun için (3) formülünde gösterildiği gibi C matrisini oluşturan satır bileşenlerinin aritmetik ortalaması alınır ve **Öncelik Vektörü** olarak adlandırılan W sütun vektörü elde edilir.

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n c_{ij}}{n} \quad (3)$$

W vektörü aşağıda gösterilmiştir.

$$W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ w_n \end{bmatrix}$$

Yukarıdaki örnek çözüldüğünde öncelik vektörünün elemanları aşağıdaki gibi hesaplanabilir. Bu durumda her üç faktör birlikte değerlendirildiğinde yaklaşık değerlerle, birinci faktör %32, ikinci faktör %58 ve üçüncü faktör %10 öneme sahip olacaktır.

$$W = \begin{bmatrix} \frac{0,238 + 0,210 + 0,500}{3} \\ \frac{0,714 + 0,632 + 0,400}{3} \\ \frac{0,048 + 0,1580 + 0,100}{3} \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} 0,32 \\ 0,58 \\ 0,10 \end{bmatrix}$$

**Adım 4:** *Faktör Kıyaslamalarındaki Tutarlılık Ölçülür.*

AHP kendi içinde ne kadar tutarlı bir sistematığe sahip olsa da sonuçların gerçekçiliği doğal olarak, karar vericinin faktörler arasında yaptığı birebir karşılaştırmadaki tutarlılığa bağlı olacaktır. AHP bu karşılaştırmalardaki tutarlılığın ölçülebilmesi için bir süreç önermektedir. Sonuçta elde edilen **Tutarlılık Oranı (CR)** ile, bulunan öncelik vektörünün ve dolayısıyla faktörler arasında yapılan birebir karşılaştırmaların tutarlılığın test edilebilmesi imkanını sağlamaktadır. AHP, CR hesaplamasının özünü, faktör sayısı ile

**Temel Değer** adı verilen ( $\lambda$ ) bir katsayının karşılaştırılmasına dayandırmaktadır.  $\lambda$ 'nın hesaplanması için öncelikle A karşılaştırma matrisi ile W öncelik vektörünün matris çarpımından D sütun vektörü elde edilir.

$$D = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ w_n \end{bmatrix}$$

(4) formülünde tanımlandığı gibi, bulunan D sütun vektörü ile W sütun vektörünün karşılıklı elemanlarının bölümünden her bir değerlendirme faktörüne ilişkin temel değer (E) elde edilir. Bu değerlerin aritmetik ortalaması ((5) formülü) ise karşılaştırmaya ilişkin temel değeri ( $\lambda$ ) verir.

$$E_i = \frac{d_i}{w_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \quad (5)$$

$\lambda$  hesaplandıktan sonra **Tutarlılık Göstergesi (CI)**, (6) formülünden yararlanarak hesaplanabilir.

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (6)$$

Son aşamada ise CI, **Random Gösterge (RI)** olarak adlandırılan ve Tablo 2'de gösterilen standart düzeltme değerine bölünerek ((7) formülü) CR elde edilir. Tablo 2' den faktör sayısına karşılık inen değer seçilir. Örneğin 3 faktörlü bir karşılaştırmada kullanılacak RI değeri Tablo 2' den 0.58 olacaktır.

**Tablo 2.** *RI Değerleri*

<b>N</b>	<b>RI</b>	<b>N</b>	<b>RI</b>
1	0	8	1,41
2	0	9	1,45
3	0,58	10	1,49
4	0,90	11	1,51
5	1,12	12	1,48
6	1,24	13	1,56

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

Hesaplanan CR değerinin 0.10 dan küçük olması karar vericinin yaptığı karşılaştırmaların tutarlı olduğunu gösterir. CR değerinin 0.10' dan büyük olması ya AHP' deki bir hesaplama hatasını ya da karar vericinin karşılaştırmalarındaki tutarsızlığını gösterir.

**Adım 5:** *Her Bir Faktör İçin, m Karar Noktasındaki Yüzde Önem Dağılımları Bulunur.*

Bu aşama yukarıda anlatılan şekilde ancak bu kez, her bir faktör açısından karar noktalarının yüzde önem dağılımları belirlenir. Diğer bir deyişle birebir karşılaştırmalar ve matris işlemleri faktör sayısı kadar (n kez) tekrarlanır. Ancak bu kez her bir faktör için karar noktalarında kullanılacak G karşılaştırma matrislerinin boyutu m x m olacaktır. Her bir karşılaştırma işleminden sonra mx1 boyutlu ve değerlendirilen faktörün karar noktalarına göre yüzde dağılımlarını gösteren S sütun vektörleri elde edilir. Bu sütun vektörleri aşağıda tanımlanmıştır:

$$S_i = \begin{bmatrix} s_{11} \\ s_{21} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ s_{m1} \end{bmatrix}$$

**Adım 6:** *Karar Noktalarındaki Sonuç Dağılımının Bulunması.*

Bu aşamada öncelikle, yukarıda anlatılan n tane m x 1 boyutlu S sütun vektöründen meydana inen ve m x n boyutlu K karar matrisi oluşturulur. Karar matrisi aşağıda tanımlanmıştır:

$$K = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2n} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ s_{m1} & s_{m2} & \dots & s_{mn} \end{bmatrix}$$

Sonuçta karar matrisi W sütun vektörü (öncelik vektörü) ile aşağıdaki gibi çarpıldığında ise m elemanlı L sütun vektörü elde edilir. L sütun vektörü karar noktalarının yüzde dağılımını verir. Diğer bir deyişle vektörün elemanlarının toplamı 1'dir. Bu dağılım aynı zamanda karar noktalarının önem sırasını da gösterir.

$$L = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2n} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ s_{m1} & s_{m2} & \dots & s_{mn} \end{bmatrix} \begin{matrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ w_n \end{bmatrix} \\ \times \end{matrix} = \begin{bmatrix} l_{11} \\ l_{21} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ l_{m1} \end{bmatrix}$$

**Örnek:** Bir çoklu karar probleminde 3 karar noktası ve 4 değerlendirme faktörü bulunmaktadır. Karar verici karar matrisini aşağıdaki gibi oluşturmuş ve değerlendirme faktörlerine ilişkin ağırlıkları ise  $w_1 = 0,20$ ,  $w_2 = 0,15$ ,  $w_3 = 0,40$  ve  $w_4 = 0,25$  şeklinde belirlemiştir.

$$A = \begin{bmatrix} 25 & 20 & 15 & 30 \\ 10 & 30 & 20 & 30 \\ 30 & 10 & 30 & 10 \end{bmatrix}$$

*Karar verici, AHP yöntemini kullanarak karar noktalarının önem sırasını nasıl oluşturacaktır?*

Bu örnekte değerlendirme faktörlerine ilişkin ağırlıklar veri olarak verildiğinden AHP yönteminin yukarıda tanımlanan ilk dört adımı atlanmıştır. Diğer bir deyişle W öncelik vektörü (değerlendirme faktörlerine ilişkin ağırlıklar vektörü),

$$W = \begin{bmatrix} 0,20 \\ 0,15 \\ 0,40 \\ 0,25 \end{bmatrix}$$

olarak kabul edilmiştir. Daha sonra her bir değerlendirme faktörü için, karar noktalarının önem dağılımları hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda Tablo 1' deki önem tanımları kullanılmıştır.

1. Değerlendirme faktörü için karar noktaları önem dağılımı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır,

	$A_1$	$A_2$	$A_3$
$A_1$	1	4	1/2
$A_2$	1/4	1	1/5
$A_3$	2	5	1
	3,25	10	1,7

Burada karar noktalarının kıyaslamalarında örnekte verilen A matrisinin 1. sütunu kullanılmıştır. Köşegen üzerindeki 1 değerleri aynı karar noktasını göstermektedir. Tablo 1' deki önem tanımları örneğe uyarlanırken, A matrisinin sütun değerlerindeki her on farkın tablodaki tek sayılara, her beş farkın çift sayılara karşılık geldiği kabulü yapılmıştır. A matrisinin 1. sütunundaki 25  $A_1$  karar noktasının, 10  $A_2$  karar noktasının, 30 ise  $A_3$  karar noktasının değerini göstermektedir. Bu durumda  $A_1$  ve  $A_2$  1. değerlendirme faktörü için kıyaslandığında Tablo 1'e göre  $A_1$ ,  $A_2$  den 4 kadar daha önemli olacaktır. Benzer mantıkla yukarıdaki karşılaştırma matrisinin diğer hücreleri doldurulmuştur. Sonrasında ise karşılaştırma matrisinin sütun toplam değerleri elde edilmiştir.

1. değerlendirme faktörü açısından karar noktalarının önem dağılımları için  $S_1$  sütun vektörü hesaplanmıştır. Bunun için öncelikle karşılaştırma matrisinin sütunlarındaki sütun toplamlarına bölünmüş, satır toplamları bulunmuş ve bu değerlerin aritmetik ortalamaları alınarak  $S_1$  sütun vektörünün elemanları elde edilmiştir. Hesaplamalar aşağıda gösterilmiştir.

$$0,3077 + 0,4 + 0,2941 = 1,0018 \rightarrow 1,0018 / 3 = 0,33$$

$$0,0769 + 0,1 + 0,1177 = 0,2946 \rightarrow 0,2946 / 3 = 0,10$$

$$0,6154 + 0,5 + 0,5882 = 1,7036 \rightarrow 1,7036 / 3 = 0,57$$

$$S_1 = \begin{bmatrix} 0,33 \\ 0,10 \\ 0,57 \end{bmatrix}$$

Bu vektörden 1. değerlendirme faktörü açısından  $A_1$  'in %33,  $A_2$  'nin %10,  $A_3$  'ün ise %57 öneme sahip olduğu söylenebilir.

Benzer şekilde diğer değerlendirme faktörleri için karar noktalarının önem dağılımları aşağıda hesaplanmıştır.

2. değerlendirme faktörü için karar noktalarının önem dağılımı:

	$A_1$	$A_2$	$A_3$
$A_1$	1	1/3	3
$A_2$	3	1	5
$A_3$	1/3	1/5	1
	4,33	1,53	9



$$0,2309 + 0,2157 + 0,3333 = 0,7799 \Rightarrow 0,26$$

$$0,6929 + 0,6536 + 0,5556 = 1,9021 \Rightarrow 0,63$$

$$0,0762 + 0,1307 + 0,1111 = 0,3180 \Rightarrow 0,11$$

$$S_2 = \begin{bmatrix} 0,26 \\ 0,63 \\ 0,11 \end{bmatrix}$$

### 3. değerlendirme faktörü için karar noktalarının önem dağılımı

	$A_1$	$A_2$	$A_3$
$A_1$	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$
$A_2$	2	1	$\frac{1}{3}$
$A_3$	4	3	1
	7	4,5	1,58

$$0,1429 + 0,1111 + 0,1582 = 0,4122 \Rightarrow 0,14$$

$$0,2857 + 0,2222 + 0,2089 = 0,7168 \Rightarrow 0,24$$

$$0,5714 + 0,6667 + 0,6329 = 1,8710 \Rightarrow 0,62$$

$$S_3 = \begin{bmatrix} 0,14 \\ 0,24 \\ 0,62 \end{bmatrix}$$

4. değerlendirme faktörü için karar noktalarının önem dağılımı

	$A_1$	$A_2$	$A_3$
$A_1$	1	1	5
$A_2$	1	1	5
$A_3$	1/5	1/5	1
	2,2	2,2	11

$$0,4546 + 0,4546 + 0,4546 = 1,3638 \Rightarrow 0,46$$

$$0,4546 + 0,4546 + 0,4546 = 1,3638 \Rightarrow 0,46$$

$$0,0908 + 0,0908 + 0,0908 = 0,2724 \Rightarrow 0,08$$

$$S_4 = \begin{bmatrix} 0,46 \\ 0,46 \\ 0,08 \end{bmatrix}$$

Daha sonra yukarıda bulunan S sütun vektörleri matris formatında bir araya getirilmiş ve W vektörü ile çarpılmıştır.

$$\begin{bmatrix} 0,33 & 0,26 & 0,14 & 0,46 \\ 0,10 & 0,63 & 0,24 & 0,46 \\ 0,57 & 0,11 & 0,62 & 0,08 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,20 \\ 0,15 \\ 0,40 \\ 0,25 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,28 \\ 0,32 \\ 0,40 \end{bmatrix}$$

Elde edilen sütun vektöründeki 0,28 1. karar noktasının ( $A_1$ ) önem seviyesini, 0,32 2. karar noktasının ( $A_2$ ) önem seviyesini, 0,40 ise 3. karar noktasının ( $A_3$ ) önem seviyesini göstermektedir. Diğer bir deyişle karar noktalarının önem dizilimi  $A_3$ ,  $A_2$  ve  $A_1$  şeklinde olacaktır.

## EK-2: AHP Katılımcılarına Uygulanan Karşılaştırma Matrisi Anketi

### İstanbul Atatürk Havalimanında Park Yeri Tahsisi ve Uçak Taksi Rotası Tahsisi İçin Geliştirilen Algoritmadaki Uzman Görüşleri

Bu çalışma havalimanlarında uçak park yeri tahsisi ve taksi rotası tahsisinin entegre yapılabilmesi için geliştirilecek olan karar destek sistemi algoritmasındaki faktörlerin birbirleri ile olan karşılaştırma oranlarının belirlenmesi için yapılmaktadır. Vereceğiniz yanıtlar ile ilerleyen süreçte İstanbul Atatürk Havalimanı'nda kullanılması planlanan uçak park yeri ve taksi rotası tahsisi karar destek sisteminin oluşturulmasına katkıda bulunacaktır.

Faktörler için girilen değerler o faktörün önem derecesini göstermektedir. 10 değer oranında en yüksek önem derecesini belirtirken 1 en düşük önem derecesini belirtmektedir.

Örnek olarak;

	Yolcu Yoğunluğu	Trafik Yoğunluğu
Değer Oranı	3	9

Bu örnek matriste verilen değerlerde yolcu yoğunluğu faktör 3. seviye önem derecesine sahip iken, trafik yoğunluğu 9. seviye önem derecesine sahiptir. Bir başka deyişle trafik yoğunluğu faktörü yolcu yoğunluğu faktöründen 3 kat daha önemlidir.

Hangi görevde çalışıyorsunuz?

İş Tecrübeniz ne kadar?

Havaalanında park yeri tahsisinde göz önünde bulundurulacak kriterlerinden terminaldeki yolcu yoğunluğunun hareket sahasındaki uçak trafik yoğunluğu ile karşılaştırması

	Yolcu Yoğunluğu	Trafik Yoğunluğu
Değer Oranı	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Havaalanında park yeri tahsisinde göz önünde bulundurulacak kriterlerinden hareket sahasındaki trafik yoğunluğunun park yeri işgaliye süresi ile karşılaştırması

	Trafik Yoğunluğu	Park Yeri İşgaliye Süresi
Değer Oranı	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Havaalanında park yeri tahsisinde göz önünde bulundurulacak kriterlerinden terminal binası yolcu yoğunluğunun park yeri işgaliye süresi ile karşılaştırması

	Yolcu Yoğunluğu	Park Yeri İşgaliye Süresi
Değer Oranı	<input type="text"/>	<input type="text"/>







Havaalanında park yeri tahsisi algoritması kriterlerinden yolcu yoğunluğu göz önünde bulundurulurken yolcu akış yönünün ve yolcu yürüyüş rotası çakışması karşılaştırması

	Yolcu Akış Yönü	Yürüyüş Rotası Çakışması
Değer Oranı	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Havaalanında park yeri tahsisi algoritması kriterlerinden terminal binası yolcu yoğunluğu göz önünde bulundurulurken terminaldeki yolcu yürüyüş rotalarının çakışmasının yolcu sayısının fazla olması ile karşılaştırması

	Yürüyüş Rotaları Çakışması	Yolcu Sayısı Fazla Olması
Değer Oranı	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Havaalanında park yeri tahsisi algoritması kriterlerinden terminal binası yolcu yoğunluğu göz önünde bulundurulurken terminaldeki yolcu akış yönünün çakışmasının yolcu sayısının fazla olması ile karşılaştırması

	Yolcu Akış Yönü	Yolcu Sayısı Artması
Değer Oranı	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Havaalanında park yeri tahsisinde göz önünde bulundurulan kriterlerden yolcu yoğunluğu kriterinin alt kriterleri olan terminal binasının belirli bölgelerindeki yolcu sayısının artışlarının karşılaştırması

	Dış Hatlardaki Yolcu Artışı	İç Hatlardaki Yolcu Artışı
Değer Oranı	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Havaalanında park yeri tahsisinde göz önünde bulundurulan kriterlerden yolcu yoğunluğu kriterinin alt kriterleri olan terminal binasının belirli bölgelerindeki yolcu sayısının artışlarının karşılaştırması

	İç Hatlardaki Yolcu Artışı	Pasaport Kontrol Noktasındaki Yolcu Artışı
Değer Oranı	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Havaalanında park yeri tahsisinde göz önünde bulundurulacak kriterlerden yolcu yoğunluğu kriterinin alt kriterleri olan terminal binasının belirli bölgelerindeki yolcu sayısının artışlarının karşılaştırılması**

Dış Hatlardaki Yolcu Artışı      Pasaport Kontrol Noktasındaki Yolcu Artışı

Değer Oranı

**Havaalanında hava tarafında (Apron ve taksi yolları) uçak yoğunluğu kriterinin alt-kriterlerinin karşılaştırılması**

Taksi Yolundaki Uçak Sayısı      Push-backlerin Gecikmesi

Değer Oranı

**Havaalanında hava tarafında (Apron ve taksi yolları) uçak yoğunluğu kriterinin alt-kriterlerinin karşılaştırılması**

Taksi Yolundaki Uçak Sayısı      Yer Hizmetleri Araçlarının Beklemesi

Değer Oranı

**Havaalanında hava tarafında (Apron ve taksi yolları) uçak yoğunluğu kriterinin alt-kriterlerinin karşılaştırılması**

Taksi Yolundaki Uçak Sayısı      De-icing ve Anti-icing yoğunluğu

Değer Oranı

**Havaalanında hava tarafında (Apron ve taksi yolları) uçak yoğunluğu kriterinin alt-kriterlerinin karşılaştırılması**

Push-backlerin Gecikmesi      Yer Hizmetleri Araçlarının Beklemesi

Değer Oranı

**Havaalanında hava tarafında (Apron ve taksi yolları) uçak yoğunluğu kriterinin alt-kriterlerinin karşılaştırılması**

Push-backlerin Gecikmesi      De-icing ve Anti-icing yoğunluğu

Değer Oranı

**Havaalanında hava tarafında uçak yoğunluğu kriterinin alt-kriterlerinin karşılaştırılması**

Yer Hizmetleri Araçlarının Beklemesi      De-icing ve Anti-icing yoğunluğu

Değer Oranı

**Havaalanında park yeri kullanımının apron bölgelerine göre tercih karşılaştırılması**

Terminal Bağlantılı Park Yeri Tercihî      Açık Apron Park Yeri Tercihî

Değer Oranı

**Havaalanında park yeri kullanımının apron bölgelerine göre tercih karşılaştırılması**

Açık Apron Park Yeri Tercihî      Uzak Açık (Y) Apronu Park Yeri Tercihî

Değer Oranı

**Havaalanında park yeri kullanımının apron bölgelerine göre tercih karşılaştırılması**

Terminal Bağlantılı Park Yeri Tercihî      Uzak Açık (Y) Apronu Park Yeri Tercihî

Değer Oranı