

**TOPLAM YAKIT TÜKETİMİNİN ENKÜÇÜKLENMESİ
ve PİST KAPASİTESİNİN EN ETKİN ŞEKİLDE
KULLANIMI İÇİN
BİR YAKLAŞMA SIRALAMA MODELİ**

Yüksek Lisans Tezi

Zekeriya KAPLAN

Eskişehir 2019

**TOPLAM YAKIT TÜKETİMİNİN ENKÜÇÜKLENMESİ ve
PIST KAPASİTESİNİN EN ETKİN ŞEKİLDE KULLANIMI İÇİN
BİR YAKLAŞMA SIRALAMA MODELİ**

Zekeriya KAPLAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hava Trafik Kontrol Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Cem ÇETEK

İkinci Danışman: Doç. Dr. Tuğba SARAÇ

Eskişehir

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Haziran 2019

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Zekeriya KAPLAN'nın “Toplam Yakıt Tüketiminin Enküçüklenmesi ve Pist Kapasitesinin En Etkin Şekilde Kullanımı İçin Bir Yaklaşma Sıralama Modeli” başlıklı tezi 17/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek “Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği”nin ilgili maddeleri uyarınca, Hava Trafik Kontrol Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvanı Adı Soyadı

İmza

Üye (Tez Danışmanı)

: Doç. Dr. Cem ÇETEK

Üye (İkinci Danışman)

: Doç. Dr. Tuğba SARAÇ

Üye

: Prof. Dr. Aydın SİPAHİOĞLU

Üye

: Prof. Dr. Yeliz MERT KANTAF

Üye

: Doç. Dr. Öznur USANMAZ

Enstitü Müdürü

ÖZET

TOPLAM YAKIT TÜKETİMİNİN ENKÜÇÜKLENMESİ ve PİST KAPASİTESİNİN EN ETKİN ŞEKİLDE KULLANIMI İÇİN BİR YAKLAŞMA SIRALAMA MODELİ

Zekeriya KAPLAN

Hava Trafik Kontrol Anabilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran 2019

Danışman: Doç. Dr. Cem ÇETEK

İkinci Danışman: Doç. Dr. Tuğba SARAÇ

Bu çalışmada, terminal hava sahaları içerisinde tek piste sahip bir havalimanına gelen ve giden uçakların sıralanması problemi ele alınmıştır. Bu doğrultuda, pist kapasitesinin etkin kullanımı için hem hava ve yerdeki toplam gecikmenin hem de toplam yakıt tüketiminin enküçüklendiği çok amaçlı karma tamsayılı doğrusal olmayan bir programlama (MINLP) modeli geliştirilmiştir. Modelde kullanılan yakıt tüketim fonksiyonları hava hızı, irtifa, yatış açısı ve uçağın aerodinamik özelliklerini içermektedir. Bu fonksiyonlar ile uçakların uçuş profilleri ve vektör manevralarının daha doğru bir şekilde temsil edilmesi sağlanmıştır. Geliştirilen model Sabiha Gökçen Havalimanı (LTFJ) trafik verilerine dayalı farklı operasyon senaryoları ve zaman pencereleri için GAMS/DICOPT kullanılarak çözülmüştür. Uçakların hedeflenen zamanından önce operasyonlarına izin verilmeden zaman penceresinin genişletilmesi durumunda mevcut ilk gelen ilk hizmet alır (FCFS) prensibine kıyasla toplam gecikmede %26,8 ve toplam yakıt tüketiminde %9,2 oranlarında iyileştirmelerin olduğu görülmüştür. Kalkış operasyonlarına öncelik verilmesi durumunda ise bu iyileşme oranlarının toplam gecikmede %81,6 ve toplam yakıt tüketiminde %5,7'ye ulaştığı saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Terminal Hava Sahası Uçak Sıralama, Çok Amaçlı Doğrusal Olmayan Eniyileme, İniş ve Kalkış Yönetimi, Çakışma Saptama ve Çözümü, Hava Trafik Yönetimi, Gecikme ve Yakıt Tüketiminin Enküçüklenmesi

ABSTRACT

AN APPROACH SEQUENCING MODEL for MINIMUM TOTAL FUEL
CONSUMPTION and MOST EFFICIENT USE OF RUNWAY CAPACITY

Zekeriya KAPLAN

Department of Air Traffic Control

Anadolu University, Graduate School of Sciences, June 2018

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Cem ÇETEK

Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Tuğba SARAÇ

This study addresses to the problem of arrival-departure scheduling for a single-runway airport within the terminal maneuvering areas. In this respect, a multi-objective mixed integer nonlinear programming (MINLP) model is developed to minimize total delay and total fuel consumption. The fuel consumption functions used in the model include airspeed, altitude, bearing angle variations and aerodynamic properties of the aircraft. These functions provide a more accurate representation of flight profiles and vector maneuvers of aircraft. Based on traffic data of Istanbul Sabiha Gökçen Airport (LTFJ), the model has been solved for different operational scenarios and time windows using GAMS/ DICOPT. When the extended time windows are used without allowing any early operations before their estimated arrival/departure times, total delay and total fuel consumption are improved by, 26.8% and 9.2% respectively compared to the first available first service (FCFS) principle. In case departures have priority over arrivals, the improvements reached 81.6% in total delay and 5.7% in total fuel consumption.

Key Words: Terminal Maneuvering Area Aircraft Sequencing, Multi-objective Nonlinear Optimization, Arrival and Departure Management, Conflict Detection and Resolution, Air Traffic Management, Minimization of Delay and Fuel Consumption

TEŞEKKÜR

Değerli hocalarım Doç. Dr. Cem ÇETEK ve Doç. Dr. Tuğba SARAÇ'a tez çalışmam boyunca verdikleri değerli fikirleri ve katkılarından dolayı, planlı çalışma programımda bana düzenli olarak zaman ayırmalarından dolayı teşekkür ediyorum. Bunun yanında olumlu yaklaşımları ve pozitif enerjileri ile çalışma motivasyonuma büyük katkılarının olduğunu belirtmek istiyorum.

Tez çalışmam boyunca görüşlerini bizlerle paylaşan Dr. Öğretim Üyesi Fulya AYBEK ÇETEK'e, sürekli fikir alışverişinde bulunduğum ve tavsiyeler aldığım Dr. Ramazan Kürşat ÇEÇEN'e, havalimanı verileri konusunda yardımını esirgemeyen Onur BAŞTÜRK'e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her döneminde desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, bugünlere gelmemde çok büyük emekleri olan babam Ali KAPLAN'a, annem Dursun KAPLAN'a ve kardeşim Nurşen KAPLAN'a şükranlarımı sunuyorum ve bu çalışmayı onlara ithaf ediyorum.

Zekeriya KAPLAN

17/06/2019

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 programı”yla 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.

Zekeriya KAPLAN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	4
3. YÖNTEM.....	19
3.1. Problemin Tanımlanması.....	19
3.2. Emniyet Ayırmaları.....	21
3.3. Vektör Manevraları.....	23
3.4. Kullanılan Hava Sahası ve Havaalanının Yapısı	24
3.5. Kullanılan Uçak Tipleri	26
3.6. Yakıt Tüketiminin Hesaplanması	28
3.6.1. Geliş uçaklarının alçalma ve düz uçuş sırasındaki yakıt tüketimi.....	28
3.6.2. Geliş uçaklarının vektör manevrası sırasındaki yakıt tüketimi.....	31
3.6.3. Kalkış uçaklarının pist başı yakıt tüketimi	33
3.7. Trafik Verilerinin Analizi	34
4. PROBLEMİN MATEMATİKSEL MODELİ.....	41
4.1. Matematiksel Model	41

4.2. Matematiksel Modelin Test Edilmesi için Senaryo Planlaması	49
5. DENEYSEL SONUÇLAR.....	51
6. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER	69
KAYNAKÇA.....	72
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Son on yıllık Türkiye geneli havalimanları uçak grafiği.....	1
Şekil 3.1. Jenerik bir terminal manevra sahası (TMA) konfigürasyonu	19
Şekil 3.2. Uçakların TMA içerisinde izlediği uçuş profili	20
Şekil 3.3. Sistem akış diyagramı	21
Şekil 3.4. Kesişen rotaların geometrisi	22
Şekil 3.5. Vektör manevrası	23
Şekil 3.6. Son yaklaşma hattına dönüş vektör manevrası.....	24
Şekil 3.7. İstanbul TMA ve Sabiha Gökçen Havalimanı (LTFJ) harita görünümü.....	25
Şekil 3.8. C550 yatış açısına bağlı yakıt tüketimi	31
Şekil 3.9. A320 yatış açısına bağlı yakıt tüketimi	31
Şekil 3.10. B773 yatış açısına bağlı yakıt tüketimi	32
Şekil 3.11. 17 Ağustos 2018 tarihi iniş-kalkış ve toplam operasyonların saatlik dağılımı	35
Şekil 3.12. IAT olasılık yoğunluk fonksiyonu grafiği.....	36
Şekil 3.13. IDT olasılık yoğunluk fonksiyonu grafiği.....	37
Şekil 3.14. 17 Ağustos 2018 tarihinde LTFJ havalimanına inen uçakların görselleştirilmiş rotaları	40
Şekil 3.15. 17 Ağustos 2018 tarihinde LTFJ havalimanından kalkan uçakların görselleştirilmiş rotaları	40
Şekil 5.1. Senaryo 1a FCFS ve etkin çözümleri	52
Şekil 5.2. Senaryo 1a birinci etkin çözüm sonuçları	55
Şekil 5.3. Senaryo 1a beşinci etkin çözüm sonuçları	55
Şekil 5.4. İrtifa – zaman grafiği	56
Şekil 5.5. Senaryo 1b FCFS ve etkin çözümleri.....	56
Şekil 5.6. Senaryo 1b dokuzuncu etkin çözüm sonuçları	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Literatür çalışmaları özet bilgileri	14
Çizelge 3.1. Aynı pist üzerindeki operasyonlar için en küçük emniyet ayırmaları.....	22
Çizelge 3.2. TMA giriş noktaları seviyeleri, rota uzunlukları, baş açıları, sapma açıları	25
Çizelge 3.3. Geliş rotaları arasındaki açı farkı	26
Çizelge 3.4. Uçakların düz uçuş gerçek hava hızları.....	26
Çizelge 3.5. 5000 ft düz uçuş hızları	27
Çizelge 3.6. Uçakların son yaklaşma hattı dönüş seviyesine(5000 ft) alçalma mesafesi	27
Çizelge 3.7. Uçakların son yaklaşma hattı dönüş seviyesine (5000 ft) alçalma süresi ..	27
Çizelge 3.8. Uçakların yaklaşma hattı dönüş seviyesinden (5000 ft) pist eşiğine alçalma mesafesi ve süresi.....	27
Çizelge 3.9. Uçak performans parametreleri	29
Çizelge 3.10. TMA'ya giriş seviyesinden 5000 ft'e alçalırken toplam yakıt tüketimi ...	30
Çizelge 3.11. PAZAR gelişleri orta dönüş yatış açıları ve yakıt tüketimleri	30
Çizelge 3.12. Yaklaşma hattında 5000 ft'den pist eşiğine alçalırken toplam yakıt tüketimi.....	30
Çizelge 3.13. C550 uçağı için seviyelere göre yakıt tüketim katsayıları	32
Çizelge 3.14. A320 uçağı için seviyelere göre yakıt tüketim katsayıları	33
Çizelge 3.15. B773 uçağı için seviyelere göre yakıt tüketim katsayıları	33
Çizelge 3.16. 5000 ft'de uçakların yapacağı vektör manevrasının yakıt tüketim katsayıları	33
Çizelge 3.17. Uçaklarda kullanılan motor tipleri ve yakıt akışı	34
Çizelge 3.18. LTFJ havalimanı uçak trafiği verileri.....	34
Çizelge 3.19. LTFJ havalimanı tarihlere göre gerçekleşen operasyon sayıları	35
Çizelge 3.20. IAT ve IDT dağılımları ve parametreleri	36
Çizelge 3.21. IAT verisi uygunluk iyiliği sonuçları	37
Çizelge 3.22. IDT verisi uygunluk iyiliği sonuçları	38
Çizelge 3.23. TMA giriş noktaları trafik dağılım oranları	38
Çizelge 3.24. LTFJ havalimanı trafik dağılım oranları	39
Çizelge 4.1. Senaryo planlaması.....	50
Çizelge 5.1. Senaryo 1a FCFS ve etkin çözümler için gecikme ve yakıt tüketimleri	52

Çizelge 5.2. Senaryo 1a için FCFS ile etkin çözümlerin kıyaslanması	53
Çizelge 5.3. Senaryo 1b FCFS ve etkin çözümler için gecikme ve yakıt tüketimleri	57
Çizelge 5.4. Senaryo 1b için FCFS ile etkin çözümlerin kıyaslanması.....	57
Çizelge 5.5. Senaryo 1b yedinci etkin çözüm parametre ve karar değişkenleri değerleri	60
Çizelge 5.6. Senaryo 2a FCFS ve etkin çözümler için gecikme ve yakıt tüketimleri	62
Çizelge 5.7. Senaryo 2a için FCFS ile etkin çözümlerin kıyaslanması	62
Çizelge 5.8. Senaryo 2c FCFS ve etkin çözümler için gecikme ve yakıt tüketimleri	63
Çizelge 5.9. Senaryo 2c için FCFS ile etkin çözümlerin kıyaslanması	63
Çizelge 5.10. Senaryo 3a FCFS ve etkin çözümler için gecikme ve yakıt tüketimleri ..	64
Çizelge 5.11. Senaryo 3a için FCFS ile etkin çözümlerin kıyaslanması	64
Çizelge 5.12. Senaryo 3b FCFS ve etkin çözüm için gecikme ve yakıt tüketimleri	65
Çizelge 5.13. Senaryo 3b için FCFS ile etkin çözümlerin kıyaslanması.....	65
Çizelge 5.14. Senaryo 4 FCFS ve etkin çözümler için gecikme ve yakıt tüketimleri	66
Çizelge 5.15. Senaryo 4 için FCFS ile etkin çözümlerin kıyaslanması.....	66
Çizelge 5.16. Senaryo 5 için FCFS prensibi yakıt tüketim ve gecikme sonuçları	67
Çizelge 5.17. Senaryo 5a ayrı amaçların gecikme ve yakıt tüketimleri	67
Çizelge 5.18. Senaryo 5a için FCFS ile ayrı amaçların çözümlerinin kıyaslanması.....	67
Çizelge 5.19. Senaryo 5b FCFS ve etkin çözümler için gecikme ve yakıt tüketimleri ..	68
Çizelge 5.20. Senaryo 5b için FCFS ile etkin çözümlerin kıyaslanması.....	68

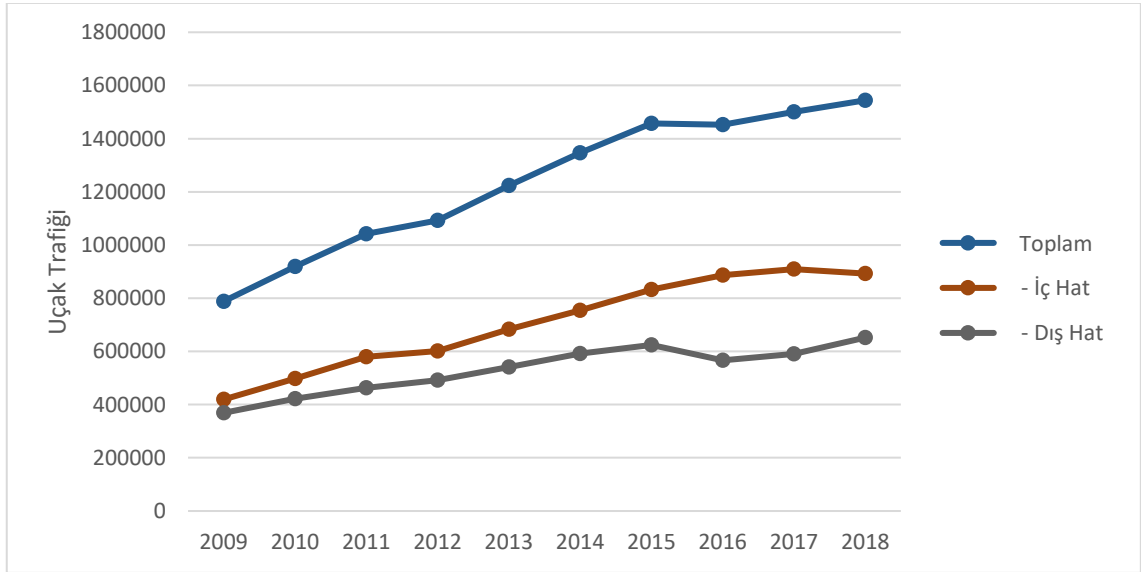
KISALTMALAR DİZİNİ

AATCSR	: Ayırma ve Hazır Olma Süreleri ile Uyarlanmış Görünür Gecikme Maliyeti (Adapted Apparent Tardiness Cost with Separation and Ready Times)
ALNS	: Uyarlanabilir Geniş Komşuluk Arama Ayrıştırması (Adaptive Large Neighborhood Search)
ANSP	: Hava Seyrüsefer Servis Sağlayıcısı (Air Navigation Service Provider)
ATA	: Atanan İniş Zamanı (Assigned Time of Arrival)
ATC	: Hava Trafik Kontrol (Air Traffic Control)
ATD	: Atanan Kalkış Zamanı (Assigned Time of Departure)
BADA	: Uçak Performans Veri Tabanı (Base of Aircraft Data)
CDA	: Devamlı Alçalarak Yaklaşma (Continuous Descent Approach)
CPS	: Sınırlı Yer Değiştirme (Constrained Position Shifting)
DHMİ	: Devlet Hava Meydanları İşletmesi
DP	: Dinamik Programlama (Dynamic Programming)
DQ	: Kalkış Kuyruğu (Departure Queue)
ERT	: En Erken Hazır Olma Zamanı (Earliest Ready Time)
ETA	: Tahmin Edilen İniş Zamanı (Estimated Time of Arrival)
ETD	: Tahmin Edilen Kalkış Zamanı (Estimated Time of Departure)
EUROCONTROL	: Avrupa Hava Seyrüsefer Emniyeti Teşkilatı (European Organization for the Safety of Air Navigation)
FAF	: Son Yaklaşma Hattı Noktası (Final Approach Fix)
FCFS	: İlk Gelen İlk Hizmet Alır (First Come First Served)
FIFO	: İlk Giren İlk Çıkar (First In First Out)
GSYİH	: Gayri Safi Yurtiçi Hâsıla
ICAO	: Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (International Civil Aviation Organization)
IAT	: İniş Zaman Aralıkları (Inter-Arrival Time)
IDT	: Kalkış Zaman Aralıkları (Inter-Departure Time)
LIFO	: Son Giren İlk Çıkar (Last In First Out)
LPT	: En Uzun İşlem Süresi (Longest Processing Time)

Meta-RaPS	: Raslantısal Öncelikli Arama için Meta-sezgisel (Metaheuristic for Randomized Priority Search)
MIP	: Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama (Mixed Integer Programming)
MINLP	: Karma Tam Sayılı Doğrusal Olmayan Programlama (Mixed Integer Non-Linear Programming)
PMS	: Toplama Noktası Sistemi (Point Merge System)
PTD	: Performans Çizelge Verileri (Performance Table Data)
RHC	: Uzaklaşan Ufuk Kontrolü (Receding Horizon Control)
SA	: Tavlama Benzetimi (Simulated Annealing)
SESAR	: Tek Avrupa Gökyüzü Hava Trafik Yönetimi Araştırma Konsorsiyumu (Single European Sky ATM Research)
SPT	: En Kısa İşlem Süresi (Shortest Processing Time)
TMA	: Terminal Manevra Sahası (Terminal Maneuvering Area)

1. GİRİŞ

Hava taşımacılığı sürdürülebilir ekonomik ve sosyal kalkınmanın yönlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Doğrudan ve dolaylı olarak 58.1 milyon kişinin istihdamını desteklemekte, küresel Gayri Safi Yurtiçi Hasıla'ya (GSYİH) 2.4 trilyon doların üzerinde katkıda bulunmaktadır ve yıllık 3.3 milyardan fazla yolcu ve 6.4 trilyon dolarlık kargo taşımaktadır [1]. Dünya genelinde hava trafiğinde 1970'lerin ortasından itibaren görülen bu sürekli artış her 15 yılda bir iki katına çıkmaktadır [1]. Türkiye'deki hava ve yolcu trafiğindeki değişim oranlarını incelemek için Devlet Hava Meydanları İşletmesi (DHMİ) tarafından yayınlanan istatistiksel rakamlara bakmak doğru olacaktır (Şekil 1.1). DHMİ tarafından yayınlanan veriler incelendiğinde son on yıl içerisinde yolcu trafiğindeki artışın iki kattan daha fazla olduğu görülmektedir. Kurumun tahminlerine göre 2021 yılında 2018 yılına göre uçak trafiğinde yaklaşık %14'lük, yolcu trafiğinde ise yaklaşık %17'lik bir artış olacağı öngörülmektedir [2].



Şekil 1.1. Son on yıllık Türkiye geneli havalimanları uçak trafiği [2]

Günümüzde havaalanlarının kapasitesi, Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü'nün (ICAO) 2042 yılına kadar yıllık trafik talebinde ortalama %4,5 oranında öngördüğü artışı karşılamaktan uzak görülmektedir [3]. 2015 yılı itibariyle 47 büyük kentin 39'undaki büyük havaalanlarının mevcut talebin karşılayamadığı ya da ciddi tıkanıkların olduğu saptanmıştır [4]. Buna göre havaalanları küresel hava taşımacılığı ve hava trafik yönetim sistemlerinin darboğazları haline gelmektedir. Bu nedenle, havaalanı operasyonlarının

iyileştirilmesi, hem Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü'nün (ICAO) Küresel Hava Seyrüsefer Planında [1] hem de Tek Avrupa Gökyüzü Hava Trafik Yönetimi Araştırma Konsorsiyumu'nun (SESAR) 2050'lere yönelik vizyonunda kilit araştırma alanlarından biri olarak belirlenmiştir [5].

Havaalanı kapasiteleri, uçuş çizelgeleri, pist tasarım ve kullanım konfigürasyonu, hava sahası tasarımı, uçak performans kategorilerinin trafik dağılımı, iniş ve kalkış operasyonlarının trafik dağılımı, hava trafik kontrol (ATC) tesis ve ekipmanları, pilot ve hava trafik kontrolörlerin performansı, baskın hava koşulları ve çevresel kısıtlamalar gibi çeşitli faktörlere dayanan pist kapasiteleri ile sınırlandırılmaktadır [6]. Teknik kısıtlamalar ve emniyet gereksinimleri sebebiyle hava trafik sisteminin kaynaklarından olan pist sistemi yalnızca saatte belirli sayıda operasyona izin vermektedir. Bu durumda havaalanlarının kapasitesinin geliştirilebilmesi için hem terminal manevra sahası (TMA) içerisinde daha gerçekçi uçak performans modellerini katan yörünge temelli hava trafik operasyonlarına hem de bütüncül iniş ve kalkış sıralaması yoluyla artırılmış pist kapasitesi yönetimine ihtiyaç duyulmaktadır.

Havaalanlarında pist kapasitesinin ve TMA içerisindeki trafik akışının eniyilenmesi için gelen ve giden uçakların trafik akışının mevcut pist ve TMA içerisinde uyumlu şekilde sıralanması gerekmektedir. Dikkatli yapılan sıralama, yeni iniş ve kalkış operasyonları için fırsat sağlarken ardışık uçaklar arasındaki uzun ayırma sürelerini azaltabilir. Eniyilenmiş iniş ve kalkış trafik sıralamaları pist kapasitesinin artması ya da gecikme sürelerinin azalması ve dolayısıyla yakıt tüketimi ve emisyonun azalması anlamına gelmektedir. Bu çalışmanın amacı iniş ve kalkış karma operasyonları için hem hava ve yerdeki toplam gecikmenin hem de toplam yakıt tüketiminin enküçüklendiği gerçekçi çok amaçlı yaklaşıma sahip bir sıralama modeli geliştirmektir. Model havayolları ve havaalanı işletmeleri/hava seyrüsefer servis sağlayıcısı (ANSP) gibi farklı paydaşların ilgisine odaklanan iniş ve kalkış operasyonlarını içermektedir. Bu sebeple de gelişmiş havaalanı operasyonları için mevcuttaki ve gelişmekte olan otomasyon ve karar destek sistemlerini destekleyici kabiliyete sahiptir.

Bu çalışmada, TMA içerisinde hem iniş hem de kalkış operasyonlarının gerçekleştirildiği tek pist konfigürasyonu kullanılmıştır. İniş uçaklarının önceden tanımlanmış giriş noktalarından belirlenmiş seviyelerde TMA'ya giriş yaptıkları kabul edilmiştir. Her bir iniş uçağı vektör manevrası hareketini kullanarak yaklaşma hattı giriş noktasına (FAF) diğer uçaklarla çakışma yaşamaksızın gelmelidir. Uçaklar vektör

manevralarını yakıt tüketimlerinin görece düşük olduğu TMA giriş seviyelerinde gerçekleştirmektedirler. TMA içerisinde iniş uçaklarının devamlı alçalarak yaklaşma (CDA) yaptıkları öngörülmüş ve yakıt tüketim hesaplamaları bu doğrultuda yapılmıştır. Son yaklaşma hattı boyunca uçakların sıralamasının ve baş açılarının değiştirilmesine izin verilmemektedir. TMA içerisinde, son yaklaşma hattında ve pist başında iniş operasyonları arasında ve iniş-kalkış operasyonları arasında kuyruk türbülansı ve radar ayırmasına dayanan standart emniyet ayırmaları kullanılmıştır. TMA içindeki iniş ve kalkış uçaklarının yörüngeleri arasında gerekli seviye ayırmasının sağlandığı kabul edilmiştir. Kalkış uçaklarının pist başındaki kalkış kuyruğuna giriş zamanları bilinmektedir. Kalkış operasyonları arasında da gerekli emniyet ayırmasının sağlanması yine standart zaman ayırmaları ile garanti edilmiştir. Hava trafik kontrolörlerinin iş yükünü artırmamak ve havayolu işletmelerinin arzu ettiği şekilde uçakların hedeflenen zamana yakın operasyonlarını gerçekleştirmelerine olanak sağlamak amacıyla zaman penceresi kısıtı kullanılmıştır.

Çalışmada hem iniş ve hem de kalkış operasyonlarına hizmet eden pistler için birbiriyle çelişen iki amaç ele alınmıştır. Pist çıktısının enbüyüklenmesi (gecikmelerin en küçüklenmesi) amacı tek başına ele alınırsa, kalkış uçaklarına öncelik verilerek pist çıktısı artırılırken, uçaklar arasındaki emniyet ayırmasını sağlamak amacıyla havadaki gecikmelerin ve vektör manevra sayısının artmasına sebebiyet verilmektedir. Toplam yakıt tüketiminin enküçüklenmesi amacı tek başına dikkate alınır ise iniş uçaklarına öncelik verilerek pist çıktısında azalma ve kalkış uçaklarının yerdeki bekleme sürelerinde uzama meydana gelmektedir. Bu sebeple, çalışmada önerilen çok amaçlı matematiksel model kullanılarak çelişen bu iki amaç bir araya getirilmiş ve farklı etkin çözümler elde edilmiştir.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde ele alınan bu problem ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar sınıflandırılarak tartışılmıştır. Ayrıca bu çalışmanın literatüre göre farklı yönleri ortaya konulmuştur. Çalışmanın üçüncü bölümünde ise problemin tanımlanarak kullanılacak yöntem özetlenmiştir. Bunlara ek olarak İstanbul Sabiha Gökçen Havalimanına ilişkin trafik verileri analiz edilmiştir. Dördüncü bölümde oluşturulan matematiksel model açıklanmış, ayrıca modelin sınanması için oluşturulan senaryolar hakkında bilgi verilmiştir. Beşinci bölümde ele alınan senaryoların sonuçları paylaşılmış ve yorumlanmıştır. Altıncı bölümde önerilen model ile elde edilen sonuçlar tartışılmış ve öneriler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Pist kapasitesinin verimli kullanımına yönelik uçak sıralama problemlerin çözümüne yönelik birçok çalışma literatürde mevcuttur. Bu çalışmaların bir bölümü sadece iniş uçaklarının sıralanması problemini [7 - 17] ele alırken, bir diğer bölümü ise sadece kalkış uçaklarının sıralanması problemine odaklanmıştır [18]. Bunun yanında hem iniş hem de kalkış uçaklarının sıralanması problemini ele alan birçok çalışma da literatürde yer almaktadır [19 - 32].

Çalışmaların bir kısmı tek pist uçak sıralama problemini incelerken bir kısmı da birden fazla bağımlı ya da bağımsız pistin yer aldığı uçak sıralama problemi ele almaktadır. Birden fazla pist için yapılan çalışmalarda, her pistte hem iniş hem de kalkış operasyonlarının gerçekleştirildiği karma tip operasyonlara yer verildiği gibi, belli pistin sadece iniş belli pistin de sadece kalkış operasyonları için kullanıldığı ayrık tip operasyonlara da yer verilmiştir.

Literatürde yapılmış olan çalışmalar statik ve dinamik yaklaşımlar olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir. Statik modeller belirli bir uçak seti için çözüm üretilmektedir. İniş ve kalkış operasyon zamanlarına yaklaştıkça bilgiler ya da koşullar artık tahmin edilebilir olduğu için oluşabilecek belirsizlikleri göz ardı etmek mantıklı görülebilmektedir. Statik bir problemi çözdükten sonra sisteme yeni bir uçağın dâhil olması ile önceki çözümlerin yeniden gözden geçirilmesi gerekmektedir. Bu dinamik modelleme yaklaşımlarına duyulan ihtiyacın bir göstergesidir.

Uçak sıralama problemi için oluşturulan modellerin birçoğunda tek bir amaç fonksiyonu ele alınmıştır. Çok amaçlı eniyileme modelinin yer aldığı birkaç çalışma örneği de literatürde mevcuttur [17, 32]. Tüm bu çalışmalarda toplam gecikmenin ya da gecikmeye bağlı doğrusal bir ilişki ile toplam maliyetin enküçüklenmeye çalışıldığı görülmektedir. Bunun yanında toplam operasyon zamanını enküçüklemeyi amaçlayan birkaç çalışmaya da yer verilmiştir.

Çözüm yaklaşımı olarak karma tam sayılı programlama modelleri ve arzu edilen sürelerde eniyiye yakın çözüm elde edebilmek için sezgisel ve meta-sezgisel algoritmalar kullanılmıştır.

Geliştirilen modellerin sınanması amacıyla bazı çalışmalarda rassal olarak veri setleri ve senaryolar oluşturulmuştur. Bunun yanında bazı çalışmalarda, gerçek havaalanı verilerinden faydalanılmış ve oluşturulan modeller gerçek hayat problemleri üzerinde test edilmiştir.

İniş uçaklarının sıralanması problemi için örnek verilebilecek çalışmalardan bir tanesi Lieder, Briskorn ve Stolletz [7] tarafından birden fazla pist için farklı kategorilerdeki iniş operasyonlarının sıralanması üzerine yapılmıştır. Yakıt, bakım, egzoz salınımı ve aktarmalı uçuşlarını kaçıran yolcuların toplam maliyetini zamanın bir fonksiyonu olarak içeren amaç fonksiyonunun enküçüklenmesini sağlayan bir doğrusal tamsayılı model oluşturarak dinamik programlama algoritması önermişlerdir. Geliştirdikleri sezgisel çözüm yaklaşımları ile zaman penceresi kısıtını içeren problemler için kısa sürelerde çözümler elde edilmiştir.

Hong vd. [8] ise iniş uçaklarının havaalanına yaklaşması aşamasında toplama noktası sisteminin (PMS) kullanıldığı bir matematiksel model oluşturmuşlardır. MIP modelleme kullanarak PMS için üç farklı sıralama algoritması geliştirmişlerdir. İlk algoritmada, sistemdeki gecikmeyi azaltmak amacıyla enküçük ayırma sağlanarak sıralama eniyi bir şekilde belirlenmeye çalışılmaktadır. İkinci algoritmada uçak sıralaması ilk gelen ilk hizmet alır (FCFS) prensibine göre belirlenmektedir. Üçüncü algoritmada sınırlı yer değiştirme (CPS) kısıtı hesaba katılmıştır. CPS kısıtı ile bir uçak pozisyonunu belirlenen enbüyük sayıda değiştirebilir. Genellikle uçağın pozisyonunu değiştirme değeri kontrolörlerin iş yükünü olabildiğince azaltmak için 1 ile 3 arasında değer almaktadır. Oluşturulan doğrusal tamsayılı modelde belirlenen zaman penceresinde uçakların toplama noktasına ulaşma zamanlarının enküçüklenmesi amaçlanmıştır. Uçakların PMS sıralama bacakları ve CDA boyunca harcadıkları zamanlar sabit kabul edilmiştir. Geliştirilen model ve algoritmaların performansı Jeju Uluslararası Havalimanı sayısal benzetim çalışmalarında 7 uçak için test edilmiştir.

Zuniga, Delahaye ve Piera [9] farklı rotalardan gelen ve havaalanına iniş yapmayı planlayan uçakların sıralanması problemini incelemişlerdir. Bu çalışmada TMA sektörünün kapasitesini artırmak için meydana gelen çakışmaların sayısını eniyilemeye odaklanılmaktadır. Toplanma noktalarındaki çakışmaları engellemek ve TMA'da aynı yolu kullanan uçaklar arasında ayırmayı devam ettirmek amacıyla, her bir uçak için hız ve yol değişiklikleri yapan stokastik eniyileme algoritması oluşturulmuştur. Bu algoritmanın amacı uçağı yatay seyrüseferde tutarken geliş akışlarını birleştirmektir. Bu da emniyet ayırmasını ve verimli iniş sıralamasını sağlarken taktiksel müdahaleyi ve ATC yükünü azaltacaktır. Genetik algoritma kullanılarak, başlangıçta planlanan yörüngeden enküçük sapma amacıyla eniyi mesafe ve yörünge hesabı yapan bir algoritma geliştirilmiştir. Birbirini takip eden uçaklar arasında ayırma, zaman ayırmasından ziyade

mesafe ayırması olarak sağlanmıştır. Algoritma İspanya'daki Canaria Havalimanı trafik verilerine göre oluşturulan test problemleri için uygulanmıştır.

Hu ve Chen [10], yoğun bir havaalanında CPS temelli geliş uçaklarının sıralanması problemine uzaklaşan ufuk kontrolü (RHC) kavramını dâhil eden bir yaklaşım önermişlerdir. RHC stratejisinde mevcut zamandaki bilgilere dayanarak, her zaman aralığı için sonraki n aralıkları için ilgili problemi eniyilemeye çalışır, ancak sadece mevcut aralığa karşılık gelen çözüm kısmı uygulanır. Bir sonraki aralıkta RHC, yakın gelecekte güncellenen bilgilere dayanarak aynı n eniyileme prosedürünü, yakın bir gelecekteki başka n aralıkları için tekrarlar. Çalışmanın temel amacı, çevrimiçi sıralamada RHC uygulayarak ve havaalanındaki varış trafik akışını dinamik bir ortamda planlayarak, havadaki gecikme ve çevrimiçi hesaplama yüküyle ilgili olası bir faydayı araştırmaktır. RHC'nin havadaki gecikme açısından getirdiği potansiyel faydalar Monte Carlo benzetim çalışmaları ile incelenmiştir.

Beasley vd. [11] tek pist için zaman penceresi sınırlamasının da yer aldığı bir MIP model sunmuşlardır. Çalışmalarının ilk aşamasında zamanla doğrusal toplam maliyetin enküçüklenmesi hedeflenmiştir. Ardışık uçaklar arasındaki ayırmanın sağlanması için zaman pencereleri kontrol edilerek 3 farklı ardışık uçak kümesi tanımlamıştır. Bu çalışmanın ikinci aşamasında ele alınan model birden fazla pistin kullanımı durumu için geliştirilmiş ve çözüm için sezgisel bir algoritma ortaya konulmuştur. Hem MIP hem de sezgisel algoritmalar test problemleri için sınavında 4 piste ve 50 uçağa kadar çözüm üretmiştir.

Kwasiborska [12], operasyonların çizelge süresini enküçükleme amacıyla iniş uçaklarının sıralanması üzerine bir çalışma yapmıştır. En uzun işlem süresinden en kısa işlem süresine doğru sıralama, en kısa işlem süresinden en uzun işlem süresine doğru sıralama, ilk giren ilk çıkar (FIFO), son giren ilk çıkar (LIFO) teorik algoritmalarının uygulanması doğrulanmış ve geliş sıralamasının belirlenmesi için bir algoritma geliştirilmiştir. Yapılan testler sonucunda geliştirilen algoritma sonuçlarında tüm operasyonların tamamlanma zamanının yukarıda bahsedilen teorik algoritma sonuçlarındaki tamamlanma zamanından daha büyük olmadığı görülmüştür.

Lee ve Balakrishnan [13] bir havaalanına gelen uçakların gecikmelerden kaynaklı maliyetlerini enküçükleme amacıyla bir dinamik programlama algoritması geliştirmişlerdir. İniş uçaklarının sıralandığı bu algoritmada uçaklar arasındaki emniyet ayırması, zaman penceresi, CPS kısıtları da dâhil edilmiştir. Zaman penceresinde bir

uçağın tahmin edilen operasyon zamanından 1 saate kadar geç kalmasına ve başlangıç sıralamasına göre en fazla 3 sıra yer değiştirmesine izin verilmiştir. Zaman penceresinde hedeflenen operasyon zamanından önce inişlere, uçakların hızlarının artırıldığı ve ekstra yakıt tükettiği hesaba katılarak izin verilmiştir. Önerilen algoritma Dallas/Fort Uluslararası Havalimanı iniş uçaklarının yakıt tüketim maliyetlerini enküçüklemek amacıyla uygulanmıştır.

Hu ve Paolo [14] tarafından yapılan çalışmada iniş uçaklarının sıralanması probleminde kullanılan genetik algoritmaya farklı bir bakış açısı ile yaklaşarak, permutasyon gösterim temeli yerine 0-1 gösterim temeline dayandırmışlardır. Genetik algoritma için kromozomları oluştururken kuyruktaki her bir uçağın geliş zamanı sıralamasını kullanmaktan ziyade her bir uçak çifti arasındaki komşuluk ilişkisi kullanılmış ve sonuç kromozomu bir 0-1 değer alan matris olmuştur. Genetik algoritmanın performansını iyileştirmek için bazı sezgisel kurallar tanımlanmıştır. Benzetim çalışmaları sonucunda 0-1 gösterim temelli genetik algoritmanın permutasyon gösterim temelli genetik algoritmadan daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca geliş sıralaması problemine dinamiklik katmak adına RHC stratejisine de çalışmada yer verilmiştir.

Briskorn ve Stolletz [15] iniş uçaklarının sıralanması probleminde tek pist ve birden fazla pist seçenekleri için gecikmelerden kaynaklanan maliyeti enküçüklemek amacıyla algoritmalar ve bir MIP model geliştirmişlerdir. Çalışmada tek veya birden fazla pist ve uçak kategorisi için algoritmalar geliştirilmiştir. Modellerde zaman penceresi kısıtına kullanılarak operasyonların gerçekleştirme zamanını sınırlı tutulmuştur.

Vadlamani ve Hosseini [16] tek pist üzerinde geliş uçaklarının sıralanması probleminin çözümü için “uyarlanabilir geniş komşuluk arama ayrıştırması” (ALNS) temelli sezgisel bir algoritma önermişlerdir. Bu algoritma iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada uçakların sıralamasının belirlenmesi için ALNS algoritması uygulanmıştır. İkinci aşamada ise ilk aşamada elde edilen sonuçların uygulanabilirliği MIP model yardımıyla kontrol edilmiştir.

Literatürde yer alan az sayıdaki çok amaçlı çalışmalardan bir tanesi Bennell, Mesgarpour ve Potts [17] tarafından tek pist üzerinde iniş uçaklarının sıralanması üzerine yapılmıştır. Çalışmada zaman penceresi kısıtına yer verilmiştir. Pist çıktısı, erken gelme ve gecikme, uçak manevralarından ve gecikmelerden kaynaklanan yakıt tüketim maliyetini hesaba katan çok amaçlı bir MIP model geliştirilmiştir. Amaçlar ağırlıklı

toplam yöntemi ile birleştirilmişlerdir. Çalışmada, uçuşların önceden bilindiği statik probleme ve uçuş bilgilerinin zamanla elde edildiği dinamik probleme yer verilmiştir. DP ve SA algoritmaları kullanılarak dinamik çerçevede ele alınan problem için çözümler oluşturulmaya çalışılmıştır. Oluşturulan model ve algoritmalar rassal olarak üretilen test verileri ve Heathrow Havalimanı test verileri kullanılarak analiz edilmiştir.

Kalkış operasyonlarının sıralanması problemi literatürde fazla odaklanılan bir konu olmamıştır. Ancak bu problemle ilgili Gupta, Malik ve Jung [18] kapsamlı bir çalışma yapmışlardır. Deterministik kalkış uçaklarının sıralanması problemini dinamik çerçevede ele alarak bir MIP model geliştirmişlerdir. Pist çıktısı, sistem gecikmesi ve enbüyük bireysel gecikme ile ilgili birden fazla amaç fonksiyonu ele alınmıştır. Çalışmada farklı kalkış kuyruğu şemaları ele alınmış, birden fazla kuyruk sıralamasının olduğu modelde ilk gelen ilk hizmet alır prensibine yer verildiği gibi kalkış için hazır olan uçağın diğer uçaklarla olan göreceli sıralamasına bakılmaksızın operasyona başlayabileceği de düşünülmüştür. 15 uçaktan 20 uçağa kadar rassal olarak test verileri üretilerek ilk gelen ilk hizmet alır prensibine karşı modelin sunduğu kalkış sıralaması arasında karşılaştırma yapılmıştır.

İniş ve kalkış operasyonlarının ayrı ayrı düşünüldüğü problemler için literatürde yer alan çalışmalar hakkında bilgilendirme yaptıktan sonra hem iniş hem de kalkış operasyonlarının ele alındığı literatürdeki çalışmalara, Bennell, Mesgarpour ve Potts [33] tarafından yapılan çalışma ile başlamak doğru olacaktır. İniş ve kalkış operasyonlarının sıralanması için kullanılan yöneylem araştırması ve yönetim bilim tekniklerini sunmuşlardır. Temel çözüm teknikleri dinamik programlama, dal-sınır algoritması, sezgiseller ve meta-sezgisellerdir. Çalışmalarında, karar verme, zaman penceresi, FCFS, pist kapasitesi ve ataması, emniyet ayırması, holding ve manevralar, pozisyon değiştirme gibi iniş ve kalkış uçaklarının sıralanması probleminin temel kavramları hakkında gerekli tanımlama ve bilgilendirmeleri yapmışlardır. Sonrasında bu problem için literatürde yapılan çalışmalardaki varsayımlardan, kısıtlardan, amaç fonksiyonlarından, modelleme tekniklerinden bahsetmişlerdir. Ayrıca iniş ve kalkış operasyonları için literatürde var olan yöntembilimleri vererek, yapılmış çalışmaları bu yöntembilim başlıkları altında sınıflandırmışlardır.

Farhadi, Ghoniem ve Al-Salem [19] pist kapasitesinin 3 öncül faktörünü dikkate alınarak birleşik etkisini analiz etmişlerdir. Bu faktörler; pistin fiziksel özelliği ve kullanım tipleri, sezgisel, meta-sezgisel, eniyileme yaklaşımları ile sıralama stratejisi ve

emniyet ayırma standartlarıdır. Zamanın bir fonksiyonu olarak verilen gecikmelerden kaynaklı yakıt tüketim maliyetini enküçükmek amacıyla oluşturulan MIP modelden elde edilen eniyi çözümler ile önerilen sezgisel algoritmalarından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bazı uçakların göreceli sırasını sabitlemek amacıyla, uçaklar ve ayırma zamanlarıyla ilgili giriş parametrelerinin analiz edilmesi olarak tanımlanan ön işleme kısıtları geliştirmişlerdir. Aynı veri seti kullanılarak farklı temel kurallara sahip sezgiseller, pist fiziksel özelliği ve ayırma standartları için Doha Uluslararası Havalimanı üzerinde analizler yaparak çözüm kalitelerini değerlendirmişlerdir. Önerilen sezgisel yaklaşımlardan eniyi ya da eniyiye yakın sonuçlar elde ettiklerini paylaşmışlardır.

Desai ve Prakash [20], dört giriş ve toplanma noktalarından oluşan bir TMA modelinin yanı sıra tek pist üzerinde karma operasyonları çalışmışlar ve bu sistemdeki toplam gecikmeyi enküçükmek amacıyla bir MIP modeli geliştirmişlerdir. İniş uçaklarının aldıkları gecikmenin TMA'ya girmeden önce girişlerdeki bekleme noktalarında ya da hız değişikliği yapılarak sağlandığını, kalkış uçaklarının aldıkları gecikmelerin kalkıştan önce yerde sağlandığını varsaymışlardır. Problemin çözümünü rahatlatmak amacıyla etkili ön işleme ve değişken sabitleme stratejileri türetilmiştir. Deneylerden elde edilen hesaplama sonuçları, sistemdeki genel gecikmenin, varsayılan FCFS politikasına göre yaklaşık %30 ve pist sıralama politikasına göre yaklaşık %10 oranında azaltılabileceğini göstermiştir.

Hançerlioğulları vd. [21] tarafından gerçekleştirilen çalışmada karma operasyon gerçekleştirilen birden fazla pist için toplam ağırlıklı gecikmesinin enküçülenmesi amacıyla iniş ve kalkış operasyonları incelemişlerdir. Amaç fonksiyonunda gecikme cezası uçak kategorisine ve operasyon türüne bağlı olarak değişmektedir. Eniyi çözümler bulmak için zaman penceresi ve hedef operasyon zamanı içeren MIP modeli sağlanmıştır. Ancak büyük ölçekli uçak sıralama problemleri için makul bir sürede çözüm elde edilemediğinden açgözlü algoritmalar ve meta-sezgisel çözüm metotlarını uygulanmıştır.

Lieder ve Stollitz [22] ise, genişletilmiş TMA içindeki bağımlı pist operasyonlarını, dinamik programlama kullanarak gecikmelerden kaynaklanan toplam maliyeti enküçükmek amacıyla incelemiştir. Uçakların belirli zaman aralığında operasyonlarını gerçekleştirmeleri arzu edilmiştir. Büyük ölçekteki problemlerin kısa sürede çözülebilmesi için sezgisel algoritma yaklaşımı önerilmiş ve elde edilen çözümlerin eniyi çözümlere yakın olduğu gösterilmiştir. Geliştirilen algoritmalar ile Frankfurt Havalimanı üzerinde deneysel analizler yapılmıştır.

Balakrishman ve Chandran [23], zaman penceresi ve öncelik kısıtlarının yanında CPS sınırlamasını da göz önünde bulundurarak tek pist sıralaması üzerine dinamik programlama kullanarak yeni algoritmalar sunmaktadır. Temelde yalnızca kalkış ve yalnızca iniş operasyonları için pist çıktısını artırmak amacıyla algoritmaları oluşturduktan sonra tüm uçakların enbüyük gecikmesini enküçükmek ve ortalama gecikmeyi enküçükmek amaçları için algoritmaları genişletmişlerdir. Ortalama gecikmeyi enküçüklemeye çalışırken zaman penceresi hesaba katmada algoritma başarısız olmuştur. Bu sebeple daha karmaşık problemleri ele alabilmek adına ayırık zamanlı CPS algoritmasını oluşturmuşlardır. 10,20,30,40,50 uçak için enbüyük 1,2 ve 3 sayıda pozisyon değiştirmeye izin vererek deneysel analizler yapmışlar ve sonuçları oldukça kısa sürelerde elde edebilmişlerdir.

Bianco, Nicoletti ve Ricciardelli [24] tek pist ile havaalanını 50 millik bir yarıçapla çevreleyen yakın TMA içindeki uçakların sıralaması çalışmasını yapmışlardır. Hem iniş hem de kalkış operasyonları için toplam gecikmeyi enküçüklemeye çalışmışlardır. Yoğun trafik durumuyla baş edebilmek adına da başlangıç çözümü sezgisel bir yaklaşım ile elde edilen dal sınır algoritması uygulamışlardır.

Sölveling ve Clarke [25] çalışmalarında stokastik havaalanı pist sıralama problemi için eniyi ya da eniyiye yakın çözümler bulmak amacıyla stokastik dal-sınır algoritmasına dayanan bir verimli sıralama metodu önermektedirler. Metot iki aşamalı bir stokastik program olarak görülebilir. İlk aşamada, bir uçak sıralaması elde edilmekte, ikinci aşamada ise zaman penceresi ve uçaklar arasındaki ayırmaların uygulandığı pist zamanlaması yapılmıştır. Stokastik dal-sınır algoritmasında, deterministik dal-sınır algoritmasında olduğu gibi çözüm uzayı alt çözüm uzaylarına bölünmekte ve bir dallanma ağacında organize edilmektedir. Geleneksel dal-sınır algoritmalarının aksine, araştırma ağacında deterministik dal-sınır üst ve alt sınırlarını elde etmek zordur. Bu yüzden her noktadaki hedefi tahmin etmek için ve eniyi çözüm içermeyen dalları kesmek için stokastik alt ve üst sınırlar kullanılır. Çalışmada bir tanesi kalkış operasyonları diğeri de iniş operasyonları için kullanılan bağımlı paralel pistler düşünülmüştür. Stokastik pist sıralama algoritması kullanmanın deterministik olana göre yararını göstermişler ve gerçekçi boyuttaki örnekler için önerilen algoritmanın pratikliğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca iniş operasyonlarının sabitlenip sadece kalkış operasyonlarının sıralandığı bir durumu da çalışmalarına eklemişlerdir. Çalışmada önerilen algoritma 14 uçaklı bir problemi 1 dakikadan daha az bir sürede çözebilmektedir.

Sölveling vd. [26] belirsizliğin olması durumunda bağımlı pist operasyonlarının sıralanması için iki aşamalı bir stokastik model geliştirmişlerdir. Pist sıralama problemini iki aşamalı olarak ele almışlardır. İlk aşamada stokastik parametreler üzerinde tam bilgiye sahip olmadan, ikinci aşama için arzu edilen sıralamayı ve aynı zamanda pist çıktısını enbüyükleme amacına hizmet ederek uçak sıralamasını belirleyen iki aşamalı bir stokastik program kullanılmaktadır. İkinci planlama aşamasında belirsizlik durumu ile ilgili parametreler üzerinde tam bir bilgiye sahip olunarak ilk aşamada belirlenen operasyon zamanından enküçük sapma ile yeniden sıralama belirlenmektedir. Kalkış operasyonlarını yolcu almak için beklediği kapılardan itibaren ele almışlardır. Çalışmalarının sonucunda dinamik çevrede stokastik modellerin deterministik olanlara göre daha güzel sonuçlar verdiğini göstermişlerdir.

TMA üzerinde duran Sama, D'Ariano ve Pacciarelli [30] çok sayıda uçağın gecikme aldığı yoğun trafiğe sahip havalimanlarındaki beklenmeyen trafik durumları ile baş edebilmek adına bir dinamik uçak trafik kontrol sistemi çalışması yapmışlardır. Dal sınır algoritması ve haddeleme ufuk yaklaşımının birleşimi anlayışıyla geliştirdikleri algoritma ile Roma Fiumicino ve Milano Malpensa terminal kontrol sahalarındaki trafik akışıyla ilgili gerçek çizelgelerden türetilen örnek problemler için çözümler üretmişler ve FCFS prensibi sonuçları ile karşılaştırmalar yapmışlardır. Deneysel sonuçlara göre uçakların uçuş sürelerinde ve gecikmelerinde azalmaların olduğunu tespit etmişlerdir.

Sama vd. [31] terminal kontrol sahalarındaki uçakların sıralanması ve rota belirleme problemi üzerine gecikmenin enküçüklenmesi amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Bu problem için sabit rotaların olduğu uçak sıralaması için bir dal sınır algoritması, yeniden rota belirleme ve uçakların sıralanması için dal sınır ve tabu araması algoritmalarının birleştirildiği bir yaklaşım ve eşzamanlı olarak rota belirleme ve sıralamanın yapıldığı bir MIP model geliştirmişlerdir. Milano Malpensa Havalimanı için farklı senaryolar oluşturup rota ve zaman performansları açısından birbirleriyle ve FCFS prensibi ile karşılaştırılmıştır. Gecikmenin enküçüklenmesi amacı için önerilen eniyileme yaklaşımlarının daha iyi sonuçlar verdiği, ancak rota belirleme için bakıldığında pratik uygulamalar için bazı ödünleşmelerin olduğu görülmüştür. Bir sonraki yapmış oldukları çalışmada [32], birden fazla amaç için başlangıçtan bitiş noktasına kadar rota belirleme ve her bir rotada, pistte, bekleme noktasında harcanan zamanın belli olduğu ve rotaların sabit olduğu zaman belirlemenin eş zamanlı olarak yapıldığı model ortaya koyulmuştur. Ağırlıklı toplam yöntemiyle bir araya getirilmiş amaçlardan bir tanesi çakışmalardan

kaynaklı en büyük gecikmenin enküçüklenmesi iken diğeri de TMA’da harcanan toplam seyahat süresinin enküçüklenmesidir. TMA içerisinde iniş uçaklarının TMA’ya giriş noktasından piste ulaşınca kadar standart bir alçalma profiline, kalkış uçaklarının da pistten TMA’yı terk edinceye kadar standart bir yükselme profiline sahip oldukları kabul edilmiştir. Modelin laboratuvar ortamındaki testleri Roma Fiumicino TMA’sı gerçek verileri kullanılarak yapılmıştır.

Rodríguez-Díaz, Adenso-Díaz ve González-Torre [27] iniş ve kalkış operasyonlarının gerçekleştirildiği tek pist uçak sıralama problemini ele alarak, düşük hesaplama sürelerinde toplam gecikmeyi enküçükmek amacıyla, emniyet ayırması ve CPS kısıtlarının yer aldığı bir benzetme tavlama algoritması geliştirmişlerdir. Gerçek senaryolar ile algoritmanın performansını görmek amacıyla Gatwick Havalimanı için aldıkları gerçek verileri kullanarak testler yapmışlar ve toplam gecikmede %33’e yakın iyileştirmeyi kısa sürelerde elde ettiklerini paylaşmışlardır.

Al-Salem vd. [28] birden fazla pist için uçak sıralaması problemini emniyet ayırması kısıtlarına zaman penceresi kısıtını da ekleyerek toplam ağırlıklı gecikmenin enküçüklenmesi amacıyla ele almışlar ve bir MIP model sunmuşlardır. Doğrusal programlamanın gevşemesini güçlendirmek ve eşdeğer ve simetrik tam sayılı çözümleri eleyerek hesaplama çabasını azaltmak amacıyla MIP modele bazı geçerli eşitsizlikler ve simetriyi bozan hiyerarşik kısıtlar eklemişlerdir.

Heidt vd. [29] uçak sıralama problemi için ikinci dereceden toplam gecikmeden kaynaklı maliyetin enküçüklenmesi amaç fonksiyonuna sahip bir karma tam sayılı doğrusal olmayan programlama (MINLP) modeli geliştirmişlerdir. Sonrasında zaman ayırıklaştırma metodunu pist sıralama problemine uyarlayarak zaman endeksli bir model ortaya koymuşlardır. Bu modeli de dinamik çerçevede ele aldıkları başka bir model haline getirmişlerdir. Monte-Carlo benzetimi kullanarak kendi yaklaşımlarının daha iyi sonuçlar verdiğini göstermişlerdir.

Murça ve Müller [34] uçak sıralama problemini kalkış ve belirli geliş rotalarının olduğu iniş operasyonları için ele almışlardır. Amaç fonksiyonları iniş operasyonları için geliş rotalarına bağlı olarak, kalkış operasyonları için bekleme zaman periyodlarının sayısına bağlı olarak meydana gelen gecikmelerden kaynaklanan toplam maliyeti enküçükmektir. Gerçek zaman uygulanabilirliği olması için de modele dinamik bir yaklaşım ilave etmişlerdir. Uçakların iniş zamanı penceresiyle ilgili açık bir kısıtlama olmasa da, modelde kullanılan azami bekleme prosedürü sayısı ve farklı gecikme

kümeleri tarafından uygulanan iniş süresi için bir üst sınır bulunmaktadır. Sao Paulo/Guarulhos Uluslararası Havalimanı için yapılan pratik uygulamalarda gecikmede %35'e kadar iyileştirme elde edebilmişlerdir.

Uçak sıralama problemi için literatürde yapılan çalışmaların genelinin tek amaçlı olduğu, ancak birkaç tane çok amaçlı çalışmaya da yer verildiği görülmektedir. Bu çalışmalarla ilgili gereken anlatımlar yapıldıktan sonra çalışmada ele alınan pist sayısı ve konfigürasyonu, amaç fonksiyonu, zaman penceresi, çözüm yaklaşımı ve bazı diğer önemli görülen özet bilgiler Çizelge 2.1' de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Literatür çalışmaları özet bilgileri

Çalışma	Pist Sayısı ve Konfigürasyonu	Operasyon Tipi	Amaç Fonksiyonu	Zaman Penceresi [en erken, en geç]	Çözüm Yaklaşımı	Notlar
Lieder, Briskorn ve Stolletz (2015)	≥ 1	İniş	$\sum$ gecikmeden kaynaklı maliyet	[ETA, LTA]	MIP, DP, Sezgisel algoritma (Rolling Horizon)	
Hong vd. (2017)		İniş	$\sum$ operasyon süresi	[0,8.ETA, 1,2.ETA]	MIP FCFS ve CPS ayrı ayrı içeren 3 sezgisel algoritma	PMS, Jeju Uluslararası Havalimanı verileri
Zuniga, Delahaye ve Piera (2011)		İniş	TMA çakışmaları enküçükmek		Stokastik eniyileme algoritması, Genetik algoritma	Canaria Havalimanı verileri
Hu ve Chen (2005)		İniş	$\sum$ gecikme		DP, RHC, CPS	Monte Carlo Ben.
Beasley vd. (2000)	1 ve ≥ 1	İniş	$\sum$ gecikmeden kaynaklı maliyet		MIP, Sezgisel algoritma	Statik, 4 pist ve 50 uçağa kadar
Kwasiborska (2017)	1	İniş	$\sum$ operasyon süresi		Uçak sıralama algoritması	LPT, SPT, FIFO, LIFO
Lee ve Balakrishnan (2008)	1	İniş	$\sum$ gecikmeden kaynaklı maliyet $\sum$ operasyon süresi	[ETA, ETA+1sa.]	CPS içeren algoritma	Dallas/Fort Uluslararası Havalimanı verileri
Hu ve Paolo (2008)					DP, RHC, Genetik algoritma	Permutasyon gösterim yerine 0-1 matris gösterim
Briskorn ve Stolletz (2014)	≥ 1	İniş	$\sum$ gecikmeden kaynaklı maliyet	[ETA, LTA]	MIP, farklı pist sayısı ve uçak kategori sayısı için 4 farklı algoritma	
Vadlamani ve Hosseini (2014)	1	İniş	$\sum$ gecikmeden kaynaklı maliyet	[ETA-belirli süre, LTA]	ALNS algoritması	
Gupta, Malik ve Jung (2009)	1	Kalkış	$\sum$ gecikme $\sum$ operasyon süresi Enbüyük gecikme enk.	[ETA, LTA]	MIP, DP	Deterministik, 20 uçağa kadar test verileri

Çizelge 2.1. (Devam) *Literatür çalışmaları özet bilgileri*

Çalışma	Pist Sayısı ve Konfigürasyonu	Operasyon Tipi	Amaç Fonksiyonu	Zaman Penceresi	Çözüm Yaklaşımı	Notlar
Farhadi, Ghoniem ve Al-Salem (2014)	≥ 1 ve bağımsız	Karma	$\sum$ gecikmeden kaynaklı maliyet	[ETA, LTA]	MIP, Sezgisel Algoritmalar	Doha Uluslararası Havalimanı
Desai ve Prakash (2016)	1	Karma	$\sum$ gecikme	[ETA, LTA]	CPS içeren MIP	
Hancerliogullari vd. (2013)	≥ 1 ve bağımsız	Karma	$\sum$ ağırlıklı gecikme	[ETA, LTA]	MIP, Açgözlü sezgisel algoritmalar (AATCSR, ERT), Meta-sezgisel (SA, Meta-RaPS)	
Lieder ve Stolletz (2016)	≥ 1 ve bağımlı	Karma	$\sum$ gecikmeden kaynaklı maliyet	[ETA, LTA]	MIP, DP, RHC	Frankfurt Havalimanı verileri
Balakrishnan ve Chandran (2010)	1	Karma	$\sum$ operasyon süresi Enbüyük gecikme enk. Ortalama gecikmeyi enk.		CPS, DP	10, 20, 30, 40, 50 uçak için test verileri
Bianco, Nicoletti ve Ricciardelli (1978)	1	Karma	$\sum$ gecikme		MIP, Dal sınır algoritması	
Sölveling ve Clarke (2014)	2, bağımlı, ayrılmış mod	Karma	$\sum$ operasyon süresi	[ETA, LTA]	Stokastik dal sınır algoritması	
Sölveling vd. (2011)	2, bağımlı	Karma	$\sum$ gecikmeden kaynaklı maliyet Pist çıktısı enb.		MIP, İki aşamalı stokastik algoritma	
Rodríguez-Díaz, Adenso-Díaz ve González-Torre (2017)	1	Karma	$\sum$ gecikme		CPS, SA algoritması	London Gatwick Havalimanı
Al-Salem vd. (2012)	≥ 1	Karma	$\sum$ ağırlıklı gecikme	[ETA, LTA]	MIP	

Çizelge 2.1. (Devam) *Literatür çalışmaları özet bilgileri*

Çalışma	Pist Sayısı ve Konfigürasyonu	Operasyon Tipi	Amaç Fonksiyonu	Zaman Penceresi	Çözüm Yaklaşımı	Notlar
Heidt vd. (2014)	1	Karma	$\sum$ gecikmeden kaynaklı maliyet	[ETA, LTA]	MINLP, DP, Zaman endeksli eniyileme modeli	Monte Carlo Benzetimi
Sama, D'Ariano ve Pacciarelli (2013)	2	Karma	$\sum$ gecikme		RHC, Dal sınır algoritması	Roma Fiumicino Havalimanı, Milano Malpensa Havalimanı
Sama vd. (2014)	2	Karma	$\sum$ gecikme		MIP, Dal sınır algoritması, Tabu-search	Milano Malpensa Havalimanı
Sama vd. (2015)	2	Karma	$\sum$ gecikme $\sum$ operasyon süresi		MIP	Roma Fiumicino Havalimanı Çok amaçlı
Murça ve Müller (2015)	1	Karma	$\sum$ gecikmeden kaynaklı maliyet		MIP, DP	Sao Paulo/ Guarulhos Havalimanı
Bennell, Mesgarpour ve Potts (2017)	1	İniş	Pist çıktısı $\sum$ gecikme $\sum$ yakıt tüketim maliyeti $\sum$ gecikmeden kaynaklı maliyet	[ETA, LTA]	MIP, DP, SA,	Heathrow Havalimanı Çok amaçlı

Her ne kadar yukarıda belirtilen çalışmalar etkili pist yönetimi ve iniş-kalkış akışı planlaması için önemli ve değerli fikirler verse de gelişmiş havaalanı operasyonları için karar destek sistemlerinde uygulanabilmesi için bazı eksik yönleri bulunmaktadır. Önerilen yaklaşımlar genellikle sorunun yalnızca tek bir boyutuyla ilgilenmektedir. Öyle ki tüm paydaşların kaygılarını benimsemeyen tek bir amaç fonksiyonu ile problemi ele almaktadırlar. Önerilen modeller genellikle, sabit (statik) bir maliyet katsayısına sahip zamanın (veya gecikmenin) doğrusal bir fonksiyonu olarak tanımlanan basitleştirilmiş amaç fonksiyonlarını kullanmaktadırlar. Bu nedenle, operasyonların birçok gerçekçi özelliği amaç fonksiyonlarına ve kısıtlara dâhil edilmemiştir. Ancak, etkili pist yönetimi için gerçek dünya iniş-kalkış sıralama problemleri, doğası gereği farklı operasyon önceliklerini ya da çeşitli paydaşların (havayolları, ANSP, havaalanı işletmecileri gibi) çelişen hedeflerini ele alması gereken çok kriterli eniyileme problemleridir. Literatürde problemin çok amaçlı doğasını benimseyen çok az çalışma vardır. Örneğin Bennell, Mesgarpour ve Potts [17] pist çıktısı, erken gelme ve gecikme, uçak manevralarından ve gecikmelerden kaynaklanan yakıt tüketim maliyeti amaç fonksiyonlarını içeren çok amaçlı bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Öte yandan, bu model atanan iniş zamanlarını elde etmek için uçak vektör manevralarını hesaba katmadan sadece iniş sıralaması problemine odaklanmaktadır. Sama vd. [32] birden fazla amaç için başlangıçtan bitiş noktasına kadar rota belirleme ve her bir rotada, pistte, bekleme noktasında harcanan zamanın belli olduğu ve rotaların sabit olduğu, en büyük gecikmenin ve TMA'da harcanan toplam seyahat süresinin enküçüklenmesi amaçlarını içeren çok kriterli bir model ortaya koymuştur. Bu modelde uçakların gecikmelerinden ya da atanan rota ve pist zamanlarına ulaşmak için yapacakları vektör manevrasından kaynaklanan yakıt tüketimi hesaba katılmamıştır.

Bennell, Mesgarpour ve Potts [17], Sama vd. [32] çalışmalarında çok kriterli amaç fonksiyonlarını ağırlıklı toplam yöntemini kullanılarak bir araya getirmişlerdir. Bu yaklaşımın iki önemli dezavantajı bulunmaktadır. İlk olarak, ağırlıklı toplam yöntemi yalnızca amaç uzayı dışbükey küme olan problemler için tüm pareto çözümleri bulabilme potansiyeline sahiptir. Çalışmalarda amaç fonksiyonu doğrusal bir formül ile tanımlansa da gerçekte uçak vektör manevralarından kaynaklı yakıt tüketimi zamanın doğrusal bir fonksiyonu değildir. Yakıt maliyeti fonksiyonu hava hızı, irtifa, yatış açısı ve uçağın aerodinamik özelliklerinden dolayı birçok doğrusal olmayan bağımlılık içerir. İkinci olarak, gerçek dünya probleminin doğru bir şekilde temsil edilmesini sağlamak için

kullanıcı tarafından verilen ağırlıklar, pareto-eniyi cephede doğru çözümü elde etmek için büyük özenle seçilmelidir [35]. Amaç uzayı dışbükey küme olmayan problem için de tüm pareto çözümleri elde edebilme potansiyeline sahip olması nedeniyle bu çalışmada ϵ -kısıt yönteminin kullanılması tercih edilmiştir.

Sonuç olarak, verimli kapasite kullanımı ve trafik akışı yönetimi açısından gelişmiş havaalanı operasyonlarını desteklemek amacıyla gerçek dünya ATM sistemlerine uygulanabilen etkili bir iniş-kalkış sıralama modelinin aşağıdaki özelliklere sahip olması gerekir:

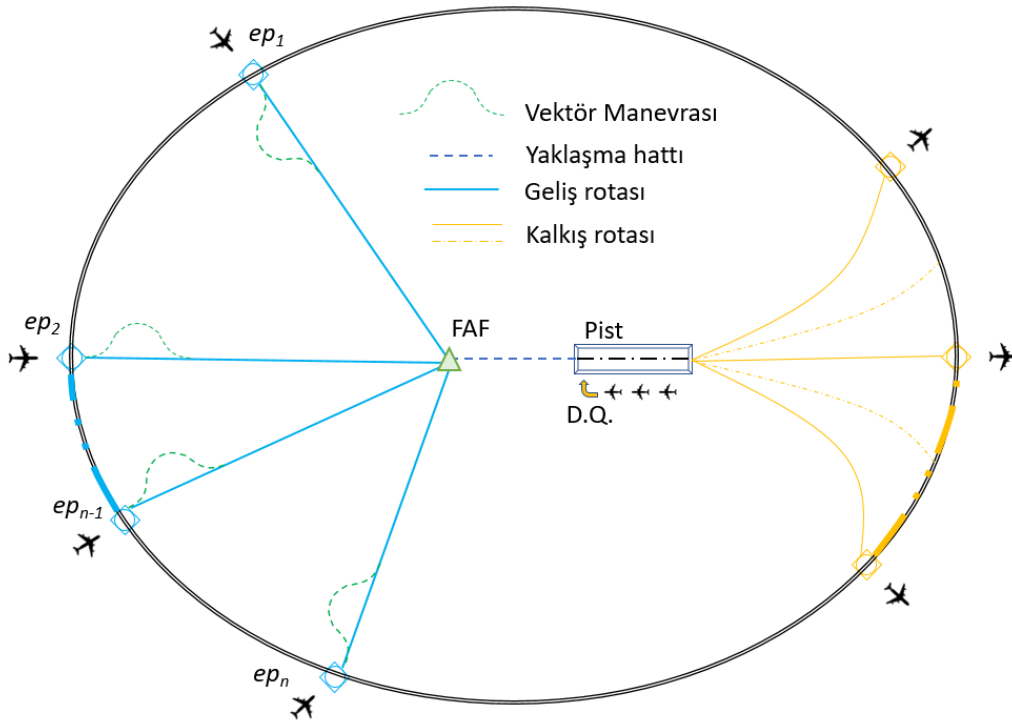
- Farklı paydaşların (havayolları, ANSP, havaalanı işletmecileri gibi) çelişen amaçları gibi gerçek dünya havaalanı operasyonlarının çok kriterli özelliklerini yansıtmalıdır.
- Amaç fonksiyonları, operasyonlarla ilgili karar alma süreçlerinde işletmeciler, planlamacılar ve kural koyucular için doğru sonuçlar sağlamak amacıyla paydaşların kaygılarını olabildiğince gerçekçi temsil etmelidir.
- Uçak performansı gibi operasyonel faktörlerin, amaç fonksiyonundaki ve kısıtlamalardaki parametrelerin tahmini sırasında dikkate alınması gerekmektedir.

Bu çalışmada hem iniş hem de kalkış uçaklarının sıralama problemi gerek seyrüsefer hizmet sağlayıcıları gerek havaalanı işletmecileri ve gerekse havayolu işletmeleri için ayrı derecelerde önemli toplam gecikme ve toplam yakıt tüketimi amaç fonksiyonlarını gerçekçi doğrusal olmayan şekilde ifade eden ϵ -kısıt yöntemini kullanan bir çok amaçlı matematiksel model önerilmiş ve gerçek bir havaalanı için uyarlanan devamlı alçalarak yaklaşma prosedürünün uygulandığı bir terminal hava sahası için sınanmıştır.

3. YÖNTEM

Çalışmada ele alınan problem bu bölümde ayrıntılı olarak verilmiştir. TMA içerisinde uçaklar arasındaki emniyet ayırmaları hakkında bilgi verilmiştir. Çakışmalardan kaynaklı gecikmeler için uçakların yapacakları vektör manevrasının ve son yaklaşma hattına dönüş vektör manevrasının ayrıntıları paylaşılmıştır. Çalışmada farklı kategoriler için seçilen uçak tipleri, geliştirilen matematiksel modelin test edilmesi için seçilen gerçek hava sahası ve pistin özellikleri verilmiştir. Kullanılan hava sahası içerisinde farklı kategorideki uçaklar için yakıt tüketim hesaplamaları yapılmıştır. Kullanılan havaalanı için gerçek trafik verileri ve bu veriler için yapılan analizler paylaşılmıştır.

3.1. Problemin Tanımlanması

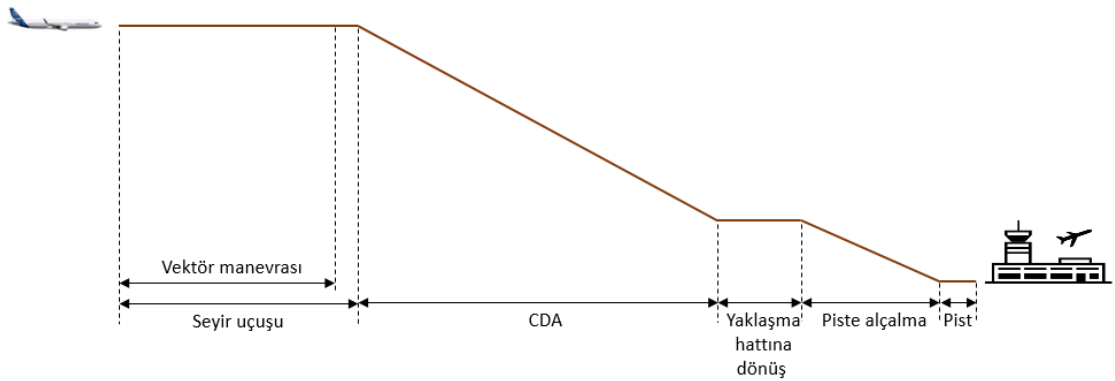


Şekil 3.1. Jenerik bir terminal manevra sahası (TMA) konfigürasyonu

Bu çalışmada pist operasyonlarının sıralanması problemi daha geniş çerçevede ve kapsamlı bir şekilde ele alınarak uçakların TMA'daki sıralamalarının, ayırmalarının, geliş rotalarının ve vektör manevralarının da göz önünde bulundurulduğu bir problem haline gelmiştir. Bu problem Şekil 3.1'de gösterildiği gibi karma pist operasyonlarının gerçekleştirildiği tek piste sahip bir havaalanı ve onu çevreleyen TMA ile birlikte

düşünülmüştür. İniş operasyonlarını gerçekleştiren uçakların önceden tanımlanmış olan $ep_1, ep_2, \dots, ep_n$ noktalarından TMA'ya giriş yaptıkları kabul edilmiştir. Bu giriş noktalarının yerleri ve irtifaları belirlidir. Uçaklar TMA'ya giriş yaptıktan sonra son yaklaşma hattı noktasına doğru yönlendirilmektedir. Kalkış uçakları da pist başında bir kalkış kuyruğu (DQ) oluşturarak operasyonlarını gerçekleştirmeyi beklemektedirler. Kalkıştan sonra uçakların farklı rotalara yönlendirildikleri ve iniş uçakları ile seviye olarak ayrıldıkları kabul edilmiştir. İniş ve kalkış uçaklarının sırasıyla tahmin edilen iniş zamanları (ETA) ve tahmin edilen kalkış zamanları (ETD) üzerinden uçaklar arasındaki gerekli emniyet ayırmalarına bağlı kalınarak gerçekleşen iniş (ATA) ve kalkış (ATD) zamanları ve sıralamaları atanmaktadır. TMA içerisinde de uçaklar arasındaki çakışmaları önlemek amacıyla vektör manevraları kullanılmaktadır. Vektör manevrasına ilişkin mesafe, baş ve yatış açılarının değerleri emniyetli ayırmayı sağlayacak şekilde belirlenmektedir.

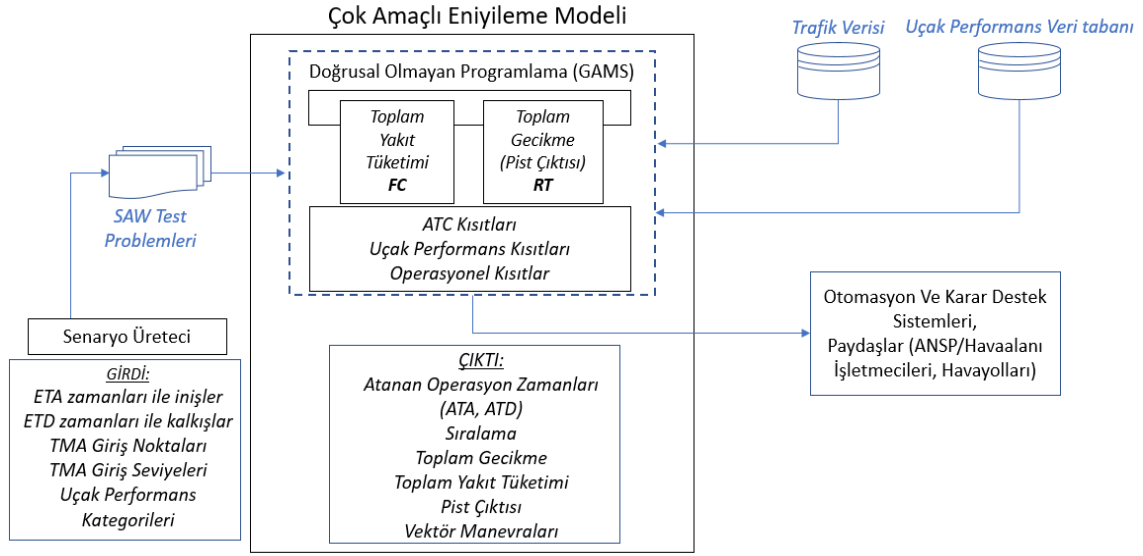
Uçakların TMA giriş irtifasından yaklaşma hattına dönüş irtifasına kadar CDA uyguladıkları kabul edilmiştir. Yaklaşma hattına dönüş irtifasında uçakların yapması gereken vektör manevrası da modellenmiştir. Uçakların alçalmaya, yaklaşma hattına dönüş ve son yaklaşıma başlama zamanları model tarafından belirlenmektedir. Son yaklaşma hattı boyunca uçakların sıralamaları ve baş açıları değişmemektedir. Uçakların TMA içerisinde izleyecekleri uçuş profili Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Uçakların TMA içerisinde izlediği uçuş profili

Çalışmanın genel sistem akış diyagramı Şekil 3.3'de verilmiştir. İncelenen problemde çeşitli paydaşların (havayolları, ANSP, havaalanı işletmecileri gibi) çelişen amaçları ele alınarak ATC, uçak performansı ve operasyonel kısıtların hesaba katıldığı çok amaçlı doğrusal olmayan bir eniyileme modeli geliştirilmiştir. Modelde uçakların

hava ile yerdeki toplam gecikmeleri ve yakıt tüketimleri amaç fonksiyonları olarak ele alınmıştır. Uçakların TMA giriş noktaları ve seviyeleri, ETA ve ETD zamanları ve performans kategorileri modelin girdilerini oluşturmaktadır. Model uçakların atanan ATA ve ATD zamanları, sıralamaları, gecikme süreleri, yakıt tüketimleri ve vektör manevraları da dâhil olmak üzere TMA içindeki yörüngelerini çıktı olarak vermektedir.



Şekil 3.3. Sistem akış diyagramı

3.2. Emniyet Ayırmaları

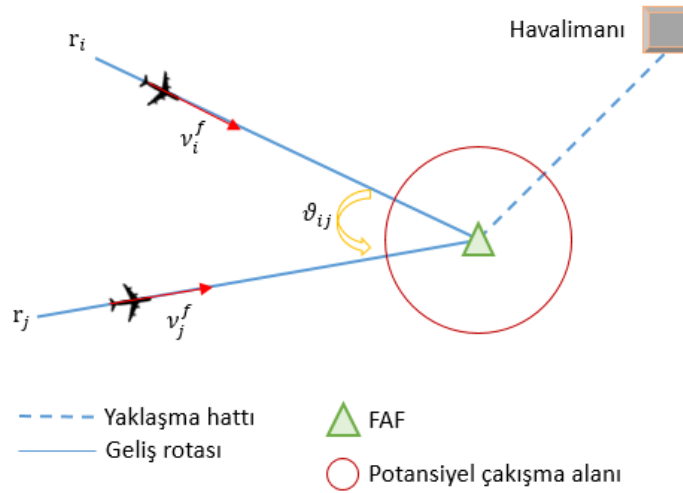
Uçak sıralama problemlerinin birincil kısıtı uçaklar arasındaki gerekli emniyet ayırmalarının sağlanmasıdır. Pist ve TMA içerisinde uçaklar arasındaki kuyruk türbülansı ve radar ayırmalarının korunması emniyet açısından zorunludur.

Çalışmada uçaklar arasındaki zaman esaslı kuyruk türbülansı ayırmaları Çizelge 3.1’de verilmiştir. Çizelgede uçaklar 3 ayrı ağırlık kategorisine göre ayrılmıştır. Hafif (L) kategori 7000 kg veya altı, orta (M) kategori 7000 kg’dan fazla veya 136000 kg’dan az, ağır (H) kategori ise 136000 kg veya üstü olan uçakları göstermektedir [42]. TMA içerisindeki çakışmaları önlemek amacıyla en küçük radar ayırması 3NM olarak alınmıştır.

Çizelge 3.1. Aynı pist üzerindeki operasyonlar için en küçük emniyet ayırmaları(sn) [23]

			Arkadaki uçak					
			İniş			Kalkış		
			L	M	H	L	M	H
Öndeki uçak	İniş	L	82	69	60	75	75	75
		M	131	69	60	75	75	75
		H	196	157	96	75	75	75
	Kalkış	L	60	60	60	60	60	60
		M	60	60	60	60	60	60
		H	60	60	60	120	120	90

TMA içerisindeki farklı rotalardan farklı hızlarla birbirine yaklaşan uçakların rota kesişim noktalarında gerekli en küçük emniyetli ayırmaların sağlanması gerekmektedir. Şekil 3.4’de gösterildiği gibi ϑ_{ij} açısı ile birbirini kesen rotalardan V_i ve V_j hızlarıyla gelen uçaklar için kesişim noktasındaki zaman ayırması Denklem 3.1’de verilmiştir [36]:



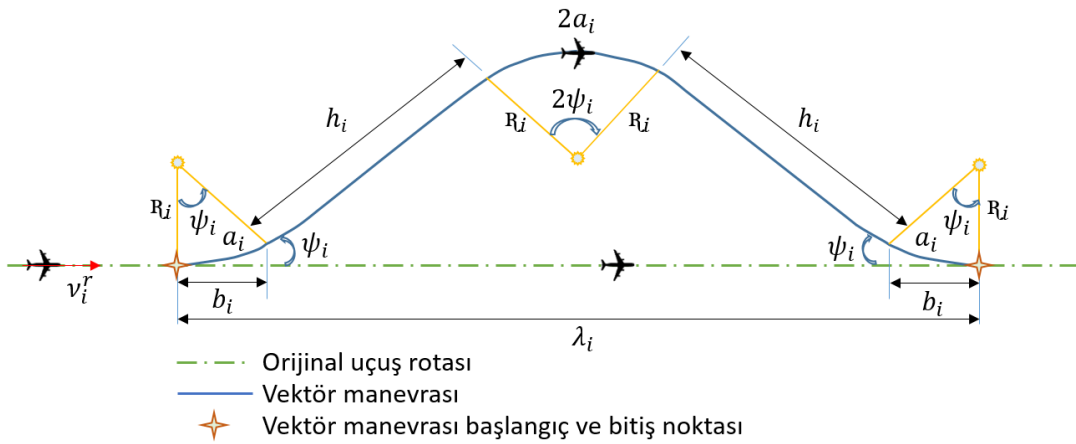
Şekil 3.4. Kesişen rotaların geometrisi

$$\hat{S}_{ij} = \frac{\mathfrak{D}}{v_i^f v_j^f |\sin \vartheta_{ij}|} \sqrt{(v_i^f)^2 + (v_j^f)^2 - 2v_i^f v_j^f \cos \vartheta_{ij}} \quad (3.1)$$

Denklem (3.1)’de verilen $\hat{S}_{ij}$, uçakların kesişme noktasına geliş zamanları arasındaki farkı; $\mathfrak{D}$, radar ayırmasını v_i^f ve v_j^f , uçak hızlarını; ϑ_{ij} , kesişen rotalar arasındaki açı farkını temsil etmektedir.

3.3. Vektör Manevraları

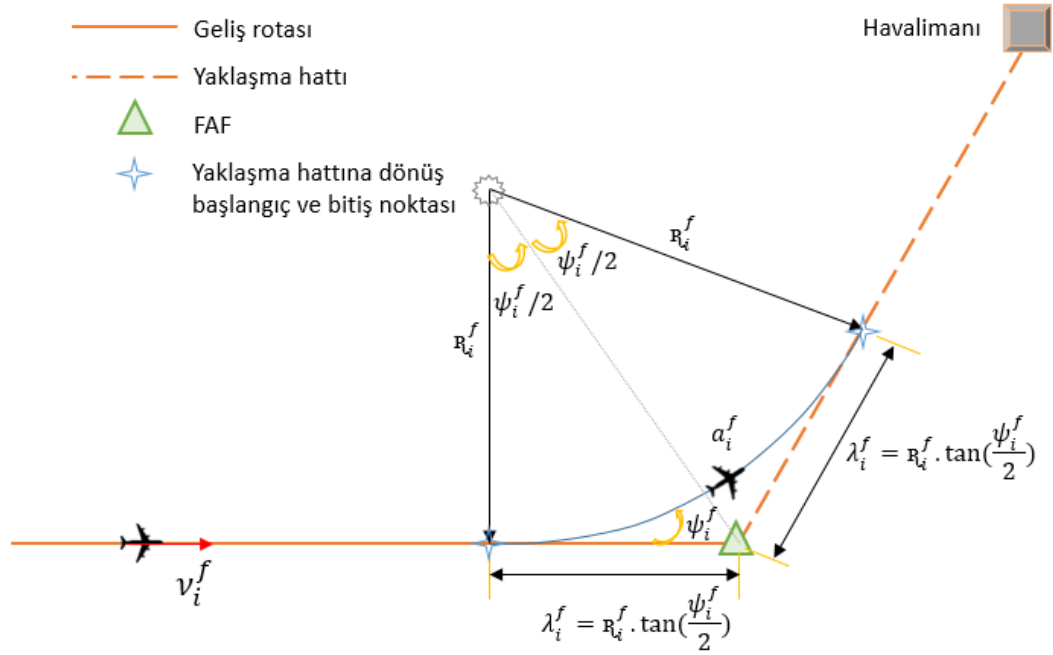
Uçakların birbirleriyle çakışmalarını önlemek amacıyla sağlanan kuyruk türbülansı veya radar ayırması kaynaklı gecikmeler uçağın TMA içerisinde yaptığı vektör manevrası ile karşılanmaktadır (Şekil 3.5). Çeçen ve Çetek tarafından çakışmaları önlemek için önerilen bu vektör manevrası koordine dönüş ve düz uçuş kısımlarından oluşmaktadır [37]. Koordine dönüş kısmında uçağın yatış açısına ve sapma açısına, düz uçuş kısmında uçuş mesafesine, vektör manevrası sırasında orijinal rotasından ne kadarlık ilerleme olacağına model tarafından karar verilmektedir.



Şekil 3.5. Vektör manevrası

R_i , TMA vektör manevrasında uçağın dönüş yarıçapını; ϕ_i , yatış açısını; ψ_i , sapma açısını; a_i , dönüş süresinde kat ettiği mesafeyi; b_i , dönüş süresinde esas yörüngesinde kat ettiği mesafeyi; h_i , sabit baş açısında kat ettiği mesafeyi; λ_i , manevra mesafesini göstermektedir.

Uçakların geliş rotasından son yaklaşma hattına dönüş sırasında yapacakları vektör manevrası Şekil 3.6’da verildiği gibidir. Burada uçağın son yaklaşma hattına dönüş için geliş rotasından ne kadarlık sapma yapacağı belirlidir. Ancak uçağın alacağı yatış açısına, vektör manevra mesafesine model tarafından karar verilmektedir.

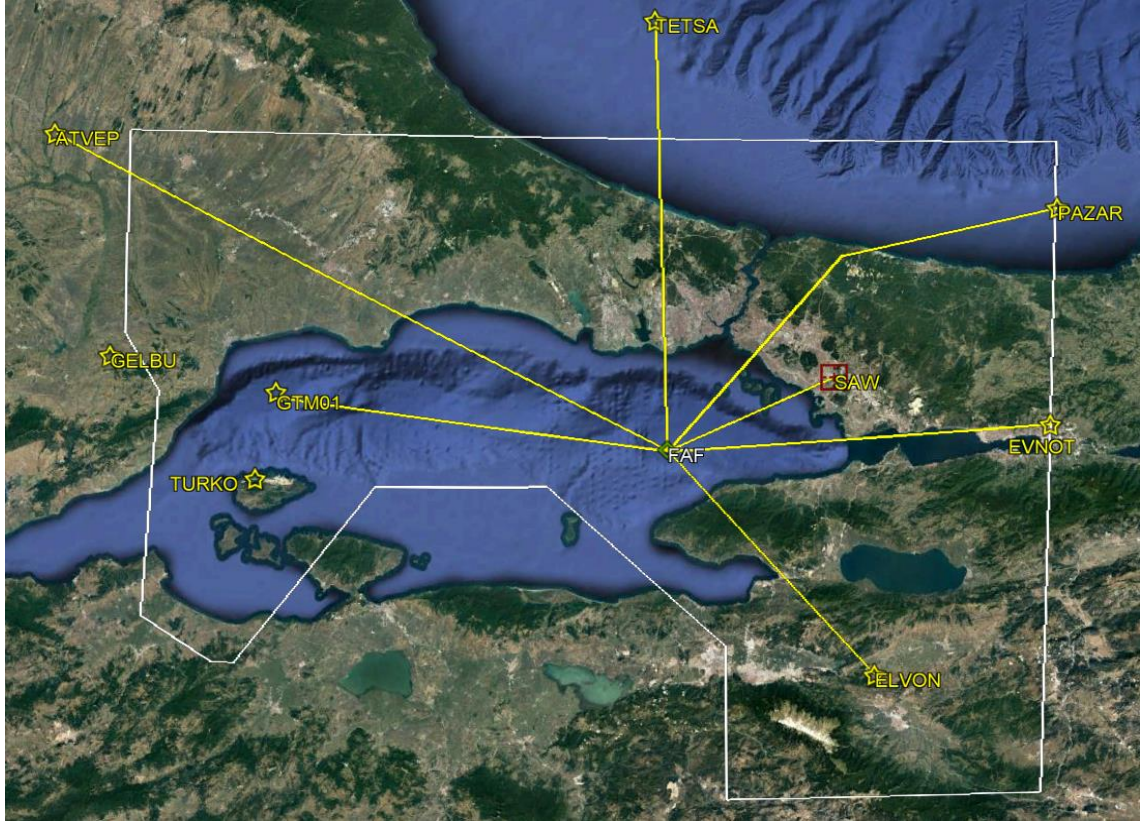


Şekil 3.6. Son yaklaşma hattına dönüş vektör manevrası

R_i^f , FAF vektör manevrasında uçağın dönüş yarıçapını; ψ_i^f , yatış açısını; a_i^f , dönüş süresince kat ettiği mesafeyi; λ_i^f , manevra mesafesini göstermektedir.

3.4. Kullanılan Hava Sahası ve Havaalanının Yapısı

Çalışmada oluşturan çok amaçlı eniyileme modeli İstanbul Sabiha Gökçen Havalimanı (LTFJ) için test edilmiştir. İstanbul TMA içerisinde bulunan LTFJ mevcut durumda tek pist konfigürasyonuna sahiptir. Havalimanına gelişler ATVEP, GELBU, TURKO, ELVON, EVNOT, PAZAR ve TETSA olmak üzere yedi ayrı TMA giriş noktasından yapılmaktadır. [43]. Ancak GELBU geliş oranlarının düşük olması ve TURKO ile yakın olmaları nedeniyle, çalışmada bu iki noktadan gelişler birleştirilerek GTM01 noktasından geldikleri varsayılmıştır. Şekil 3.7’de İstanbul TMA ve LTFJ havalimanı gelişlerinin TMA giriş noktaları gösterilmiştir. Çalışmada yakıt tüketiminin önemli bir etken olması nedeniyle uçakların TMA’ya girdikten sonra yaklaşma hattına direk bir rota ile yönlendirildikleri varsayılmıştır. PAZAR gelişlerinin havaalanı konumundan dolayı direk bir rota ile değil de Şekil 3.7’de gösterilen dolaylı rotayı izledikleri kabul edilmiştir.



Şekil 3.7. *İstanbul TMA ve Sabiha Gökçen Havalimanı(LTFJ) harita görünümü [43]*

LTFJ havalimanına iniş yapmak için TMA'ya giren uçakların noktalara göre giriş seviyeleri, FAF noktasına ulaşınca kadar izleyecekleri direk rotaların uzunlukları, geliş rotalarının baş açıları ve FAF noktasına yaklaşan uçakların son yaklaşma hattına dönüş için kendi rotalarından yapacakları sapma miktarı Çizelge 3.2'de verilmiştir. Çizelgede verilen seviyelerin ne anlama geldiklerini açıklamak gerekirse, örneğin ATVEP için FL230, TMA'ya giriş seviyesinin 23000 feet (ft) olduğunu göstermektedir. Yani verilen sayının yanına iki tane sıfır eklemek bize ft cinsinden seviyeyi vermektedir. Çalışmada FAF noktasının seviyesi 5000 ft, FAF noktasından pist başına olan yatay mesafe 25 NM ve son yaklaşma hattının baş açısı 60° olarak alınmıştır.

Çizelge 3.2. *TMA giriş noktaları seviyeleri, rota uzunlukları, baş açıları, sapma açıları*

Giriş Noktası	Seviyesi	Uzunluk(NM)	Açısı ($^\circ$)	Sapma açısı ($^\circ$)
1-ATVEP	FL230	92,9	115	55
2-GTM01	FL140	55,1	105	45
3-ELVON	FL110	47,0	320	100
4-EVNOT	FL120	54,8	263	157
5-PAZAR	FL150	71,4	215	155
6-TETSA	FL150	62,5	177	117

TMA'ya giriş yapan uçaklar farklı geliş rotalarını kullanarak son yaklaşma hattına ulaşmaktadırlar. Geliş rotaları arasındaki açı farkına bağlı olarak uçaklar arasındaki emniyet ayırması süreleri farklılık göstermektedir. Rotalar arasındaki açı farkı bilgisi Çizelge 3.5'de yer almaktadır.

Çizelge 3.3. *Geliş rotaları arasındaki açı farkı (°)*

Rotalar	1	2	3	4	5	6
1		10	155	148	100	62
2	10		145	158	110	72
3	155	145		57	105	143
4	148	158	57		48	86
5	100	110	105	48		38
6	62	72	143	86	38	

3.5. Kullanılan Uçak Tipleri

Çalışmada farklı performans kategorisine sahip uçaklar kullanılmıştır. Uçak sıralama problemlerinde farklı performans kategorileri arasındaki zorunlu emniyet ayırmalarından yararlanarak yapılan sıralamalar sayesinde toplam gecikme miktarları azaltılabilmekte ve pist çıktısında artış meydana gelmektedir. Hafif (L) kategori için Cessna C550, orta (M) kategori için Airbus A320, ağır (H) kategori için Boeing 777-300 uçak tipleri seçilmiştir. Uçakların TMA'ya giriş seviyelerindeki düz uçuş gerçek hava hızları Çizelge 3.4'de verilmiştir. Bu hızlar aynı zamanda TMA içerisinde uçaklar arasındaki çakışmaları engellemek amacıyla, vektör manevrasının yapılacağı gerçek hava hızlarını temsil etmektedir.

Çizelge 3.4. *Uçakların düz uçuş gerçek hava hızları (kts) [38]*

Uçak tipi	TMA rotası – giriş seviyesi					
	1-FL230	2-FL140	3-FL110	4-FL120	5-FL150	6-FL150
C550	311	270	258	262	275	275
A320	432	378	293	297	384	384
B773	432	378	293	297	384	384

Uçakların dönüş sırasındaki yaklaşma hattı üzerindeki ilerleyiş miktarı, geliş rotasından hatta dönüş için yapacakları vektör manevrası sapma açısına ve yarıçapına bağlı olarak değişmektedir. Bu sebeple piste iniş için alçalmaya başlama anına kadar düz uçuş yapmaları gerekebilmektedir. Bu düz uçuşu ve son yaklaşma hattına dönüş vektör

manevrasını gerçekleştirdikleri 5000 ft'deki gerçek hava hızları Çizelge 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.5. 5000 ft düz uçuş hızları (kts)

Uçak tipi	5000 ft hızı
C550	237
A320	253
B773	253

TMA'ya giriş yaptıktan sonra yaklaşma hattına dönüş yapmadan önce uçakların 5000 ft'e alçalmaları gerekmektedir. Rotalar üzerinde giriş seviyelerinden 5000 ft'e alçalmaları için gereken yatay mesafeler, süreler hesaplatılmış ve sırasıyla Çizelge 3.6'da ve Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.6. Uçakların son yaklaşma hattı dönüş seviyesine (5000 ft) alçalma mesafesi (nm)

Uçak tipi	TMA rotası – giriş seviyesi					
	1-FL230	2-FL140	3-FL110	4-FL120	5-FL150	6-FL150
C550	50,9	24,9	16,6	19,4	27,8	27,8
A320	53,9	28,4	20,1	22,8	31,2	31,2
B773	60,9	30,4	20,5	23,8	33,7	33,7

Çizelge 3.7. Uçakların son yaklaşma hattı dönüş seviyesine (5000 ft) alçalma süresi (sn)

Uçak tipi	TMA rotası - giriş seviyesi					
	1-FL230	2-FL140	3-FL110	4-FL120	5-FL150	6-FL150
C550	577	305	209	241	336	336
A320	547	316	232	261	343	343
B773	608	337	242	274	369	369

Yaklaşma hattına döndükten sonra havaalanına iniş için 5000 ft'den pist başına alçalması için gereken yatay mesafeler, süreler hesaplatılmış Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Uçakların yaklaşma hattı dönüş seviyesinden (5000 ft) pist eşiğine alçalma mesafesi (nm) ve süresi (sn)

Uçak tipi	Yatay Mesafe	Alçalma süresi
C550	14,6	297
A320	15,8	293
B773	16,6	293

3.6. Yakıt Tüketiminin Hesaplanması

3.6.1. Geliş uçaklarının alçalma ve düz uçuş sırasındaki yakıt tüketimi

Uçakların TMA'ya giriş anından itibaren piste ulaşınca kadar harcayacağı toplam yakıt miktarını hesaplamak için kullanılan formüller bu bölümde verilmiştir. Bu formüllerden yararlanarak farklı tiplerdeki uçağın manevra ve dönüş hareketleri de dâhil olmak üzere düz uçuş sırasında harcayacağı yakıt miktarı hesaplatılmıştır. TMA'ya giriş seviyesinden pist başına devamlı alçalarak yaklaşma (CDA) yaparak geldiğini kabul etmiş ve alçalma sırasındaki toplam yakıt tüketim hesapları bu doğrultuda yapılmıştır. Farklı uçak tipleri için yakıt tüketim hesaplarında kullanılan performans parametre değerlerinin belirlenmesinde BADA 3.11 performans modelinden yararlanılmıştır [38]. Yakıt tüketiminin hesaplanması için öncelikle uçaklara etkiyen taşıma ve sürüklenme katsayıları (C_L ve C_D) ile aerodinamik sürüklenme kuvvetinin (D) bulunması gereklidir [38]:

$$C_L = \frac{2W/S}{\sigma \cdot \rho_0 \cdot V^2 \cdot \cos \phi} \quad (3.2)$$

$$C_D = C_{D0} + k \cdot C_L^2 \quad (3.3)$$

$$D = \frac{C_D \cdot \sigma \cdot \rho_0 \cdot V^2 \cdot S}{2} \quad (3.4)$$

Bu denklemlerde W/S , kanat yüklenme oranını; ρ_0 , deniz seviyesindeki hava yoğunluğunu; σ , izafi yoğunluk oranını; V , uçağın gerçek hava hızını; ϕ , yatış açısını; C_{D0} , parazit sürüklenme katsayısını; k , indüklenmiş sürüklenme katsayısını ifade etmektedir. Sürüklenme kuvvetinin hesaplanmasından sonra uçağın gerekli itkisi (D), özgül yakıt sarfıyatı (η) ve yakıt akış debisi (f_{cr}) aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanabilir [38]:

$$T = D \quad (3.5)$$

$$\eta = C_{f1} \cdot \frac{V}{C_{f2}} \quad (3.6)$$

$$f_{nom} = \eta \cdot T \quad (3.7)$$

$$f_{min} = C_{f3} \cdot \left(1 - \frac{h_p}{C_{f4}}\right) \quad (3.8)$$

$$f_{cr} = \eta \cdot T \cdot C_{fcr} \quad (3.9)$$

Uçakların sabit irtifa ve hız ile düz uçuş gerçekleştirdikleri kabul edilmiştir. Düz uçuş sırasında motorların üretmesi gereken toplam itki kuvveti (T) uçağa etkiyen aerodinamik sürüklenme kuvvetine (D) eşit olmalıdır (Denklem 3.5). Uçağın birim zamanda birim itki üretmek için harcadığı özgül yakıt sarfıyatı Denklem (3.6) ile hesaplandıktan sonra her bir uçak için performans parametrelerinde verilen düzeltme katsayısı kullanılarak Denklem (3.9)'da verilen düz uçuş yakıt tüketimi bulunabilmektedir. CDA yapan bir uçağın gaz kolunun enküçük seviyede iken uçuşuna devam ettiği kabul edilmektedir. Denklem (3.8) ile alçalma sırasındaki yakıt tüketimi hesaplanabilmektedir. Denklemlerde geçen T , itki kuvvetini; D , aerodinamik sürüklenme kuvvetini; η , özgül yakıt tüketimini; C_{f1} ve C_{f2} özgül tüketim katsayılarını; V , gerçek hava hızını; f_{nom} , nominal yakıt akışını; f_{min} , enküçük yakıt akışını; C_{f3} ve C_{f4} alçalma yakıt akışı katsayılarını; h_P , basınç irtifasını; f_{cr} , düz uçuş yakıt akışını; C_{fcr} , düz uçuş yakıt akışı düzeltme katsayısını ifade etmektedir.

Çalışmada, L (bölgesel jet), M (dar gövdeli jet) ve H (geniş gövdeli jet) kategorilerini temsil etmek amacıyla sırasıyla C550, A320 ve B773 tipi uçaklar seçilmiştir. Bu uçak tipleri ile ilgili performans parametreleri Çizelge 3.9'da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Uçak performans parametreleri (BADA 3.11) [38]

Parametreler	Uçak Tipleri		
	Cessna C550	Airbus A320	Boeing 777-300
m (kg)	6.000	64.000	237.600
g (m/s^2)	9,81	9,81	9,81
S (m^2)	30	122,6	428,04
C_{D0}	0,0089904	0,026659	0,016943
C_{D2}	0,096331	0,038726	0,048939
C_{f1} (kg/min.kN)	0,63816	0,75882	0,4916
C_{f2} (kts)	169,94	2938,5	487,93
C_{f3} (kg/min)	4,5413	8,9418	26,872
C_{f4} (ft)	1×10^{15}	93865	89777
C_{fcr}	1	0,96358	0,88658

BADA uçak performans modelinde yer alan PTD dosyalarından yararlanarak bir uçağın TMA'ya giriş seviyesinden yaklaşma hattına giriş noktasına (FAF) alçalması sırasındaki yakıt tüketim hesapları yapılmıştır. Her 3 kategori için TMA'ya giriş

seviyelerinden FAF irtifası 5000 ft'e alçalıncaya kadar hesaplatılan değerler Çizelge 3.10'da verilmiştir.

Çizelge 3.10. TMA'ya giriş seviyesinden 5000 ft'e alçalırken toplam yakıt tüketimi (kg)

Uçak tipi	TMA'ya giriş rotası - seviyesi					
	1-FL230	2-FL140	3-FL110	4-FL120	5-FL150	6-FL150
C550	43,3	22,9	15,7	18,1	25,2	25,2
A320	71,7	44,1	33,3	37,0	47,5	47,5
B773	230,8	135,1	98,4	111,0	146,7	146,7

PAZAR gelişlerinde (Şekil 3.7) uçakların rotaları üzerinde FL130'da 263° baş açısından 215° baş açısına doğru dönüş gerçekleştirdikleri kabul edilmiştir. Burada yaptıkları dönüş Şekil 3.6'da verilen vektör manevrasıdır. Farklı kategoriler için dönüş sürecinde kat ettikleri düz uçuş mesafesi eşit olarak alınmıştır. Bu kabule göre uçakların almaları gereken yatış açıları ve yakıt tüketimleri hesaplatılmış ve Çizelge 3.11'de verilmiştir.

Çizelge 3.11. PAZAR gelişleri orta dönüş yatış açıları ve yakıt tüketimleri

Uçak tipi	Yatış açısı (°)	Yakıt tüketimi(kg)
C550	14,5	6,2
A320	18,9	35,4
B773	20,0	91,5

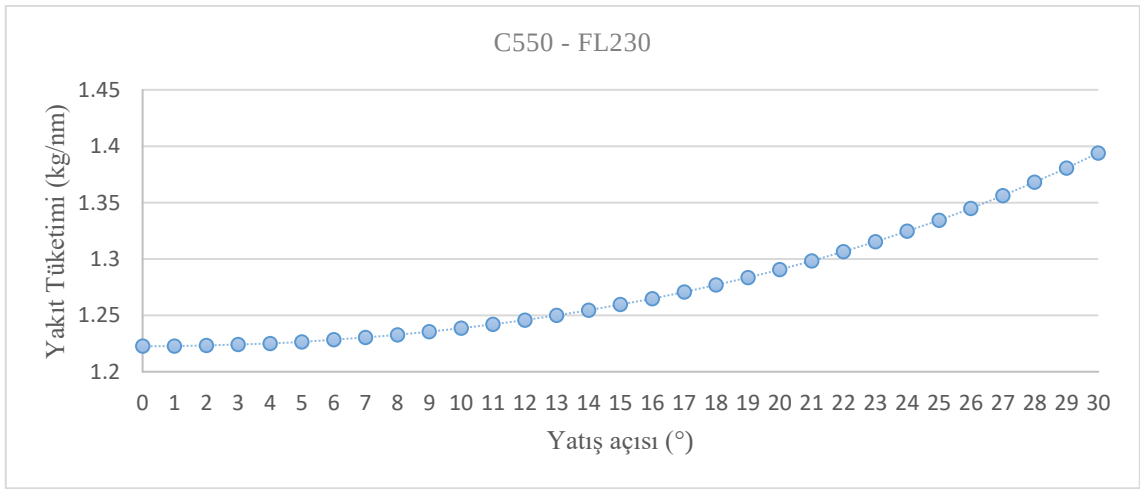
Yaklaşma hattına dönüş manevrasını tamamlayan uçağın 5000 ft'den pist başına alçalma süresince tüketeceği yakıt miktarı da aynı şekilde hesaplatılarak Çizelge 3.12'de verilmiştir.

Çizelge 3.12. Yaklaşma hattında 5000 ft'den pist eşiğine alçalırken toplam yakıt tüketimi

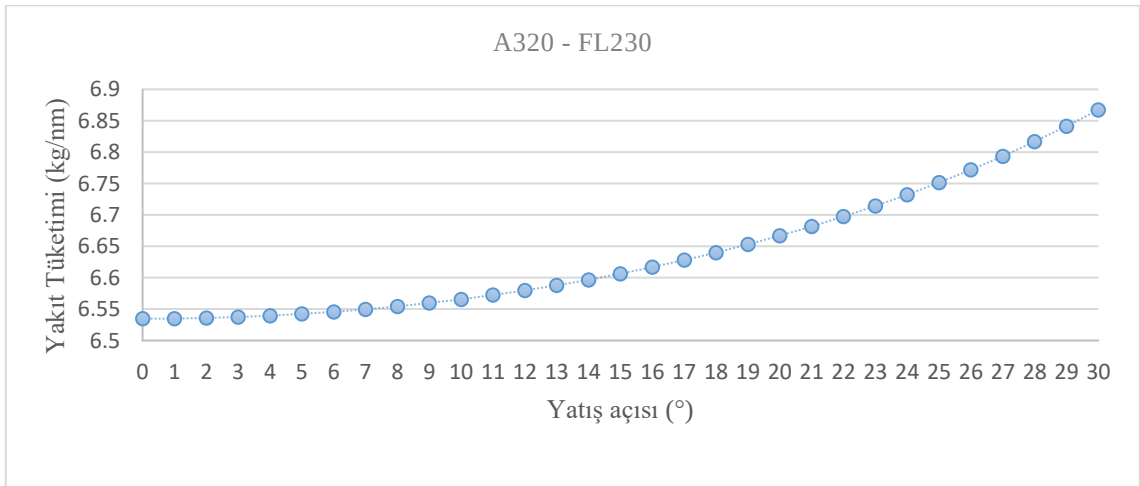
Uçak tipi	Yakıt tüketimi(kg)
C550	22,3
A320	109,4
B773	309,8

3.6.2. Geliş uçaklarının vektör manevrası sırasındaki yakıt tüketimi

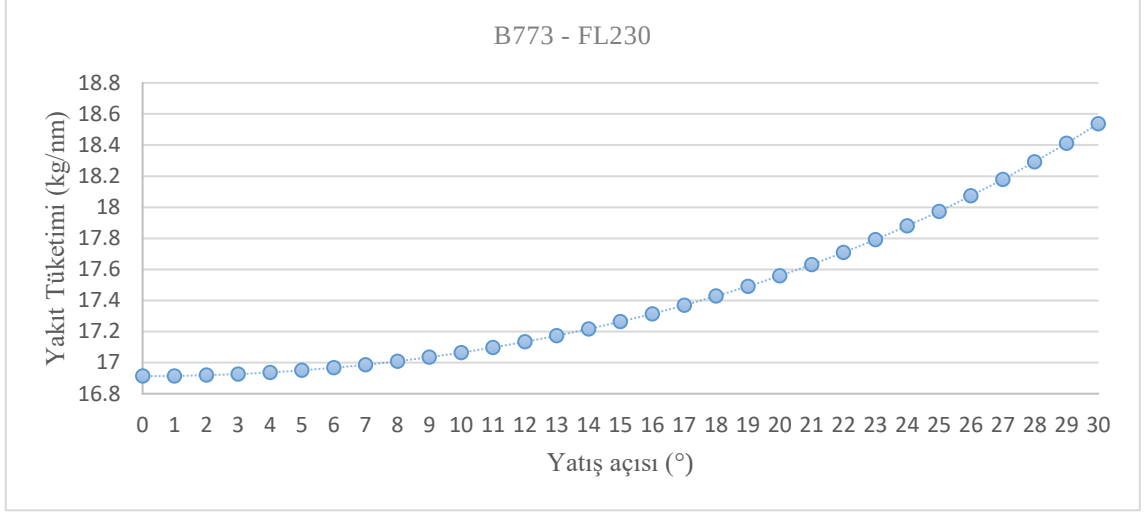
Düz uçuş yapan bir uçak sabit ağırlık, irtifa ve hızla uçuşuna devam ederken yatış açısına bağlı olarak yakıt tüketimi değişmektedir. Sivil uçaklar için BADA 3.11’de tırmanma ve alçalma haricinde nominal yatış açısının 35° ’ye kadar alınabileceği belirtilmiştir [38]. Çalışmada bir uçağın yatış açısı 30° ’ye kadar sınırlandırılmıştır. Yatış açısına bağlı olarak yakıt tüketim hesapları, vektör manevrasının gerçekleştirileceği her bir seviye için MATLAB programında yapılmış ve örnek olarak üç kategorideki uçak için FL230’daki değerler Şekil 3.8, Şekil 3.9, Şekil 3.10’daki grafiklerde verilmiştir.



Şekil 3.8. C550 yatış açısına bağlı yakıt tüketimi



Şekil 3.9. A320 yatış açısına bağlı yakıt tüketimi



Şekil 3.10. B773 yatış açısına bağlı yakıt tüketimi

TMA içerisinde geliş rotalarına bağlı uçuş seviyeleri için farklı kategorilerdeki uçakların düz uçuş sırasında ve vektör manevrası boyunca harcayacağı yakıt tüketim miktarları hesaplatıldıktan sonra modelin atanan yatış açısı doğrultusunda tüketilecek yakıt miktarını hesaplayabilmesi için eğri uydurma yöntemi MATLAB programı kullanılarak yapılmıştır. Hesaplanan değerler için kullanılan eğri uydurma yöntemi ile R^2 belirlilik katsayısı değeri 1 olan Denklem 3.10'daki gibi üçüncü dereceden denklemler elde edilmiştir. R^2 değeri oluşturulan denklemlerin hesaplanmış veri değerlerini hangi doğruluk oranında temsil edebildiğini göstermektedir. Bu durumda R^2 değerinin 1 olması %100 doğruluk oranında hesaplanmış verinin temsil edildiğini göstermektedir ve oluşturulan tüm denklemler bu orana sahiptir.

$$f = \alpha_3 \phi^3 + \alpha_2 \phi^2 + \alpha_1 \phi + \alpha_0 \quad (3.10)$$

Çalışmada kullanılan seviyeler için C550, A320, B773 uçakları yakıt tüketim katsayı değerleri sırasıyla Çizelge 3.13, Çizelge 3.14 ve Çizelge 3.15'de verilmiştir.

Çizelge 3.13. C550 uçağı için seviyelere göre yakıt tüketim katsayıları

Uçuş seviyesi	α_3	α_2	α_1	α_0
FL110	0,000002629	0,0001074	0,0003896	1,316
FL120	0,000002618	0,0001069	0,0003879	1,308
FL140	0,000002598	0,0001061	0,000385	1,292
FL150	0,000002568	0,0001048	0,0003805	1,284
FL230	0,000002512	0,0001026	0,0003722	1,222

Çizelge 3.14. *A320 uçağı için seviyelere göre yakıt tüketim katsayıları*

Uçuş seviyesi	α_3	α_2	α_1	α_0
FL110	0,00001005	0,0004105	0,00149	7,418
FL120	0,000009983	0,0004076	0,001479	7,309
FL140	0,000005294	0,0002162	0,0007845	7,526
FL150	0,000005223	0,0002133	0,0007739	7,42
FL230	0,000004871	0,0001989	0,0007218	6,534

Çizelge 3.15. *B773 uçağı için seviyelere göre yakıt tüketim katsayıları*

Uçuş seviyesi	α_3	α_2	α_1	α_0
FL110	0,00004351	0,001776	0,006447	19,22
FL120	0,00004337	0,001771	0,006427	19,05
FL140	0,00002475	0,001011	0,003668	18,46
FL150	0,00002455	0,001002	0,003637	18,3
FL230	0,00002381	0,0009721	0,003528	16,91

Bir uçağın geliş rotasından yaklaşma hattına dönüş için yapacağı vektör manevrası sırasındaki toplam yakıt tüketimini hesaplamak için 5000 ft'deki yatış açısına bağlı katsayı değerleri eğri uydurma yöntemi kullanılarak hesaplatılmıştır. 5000 ft'de farklı tipteki uçakların yapacağı vektör manevrasının yakıt tüketim katsayıları Çizelge 3.16'da verilmiştir.

Çizelge 3.16. *5000 ft'de uçakların yapacağı vektör manevrasının yakıt tüketim katsayıları*

Uçak tipi	α_3	α_2	α_1	α_0
C550	0,000002681	0,0001095	0,0003973	1,367
A320	0,00001282	0,0005234	0,0019	8,122
B773	0,0000533	0,002176	0,007898	21,07

3.6.3. Kalkış uçaklarının pist başı yakıt tüketimi

Kalkış uçakları için tüketilecekleri yakıt miktarı pist başında beklerken aldıkları gecikme ile doğru orantılı olarak oluşturulan model tarafından hesaplanmaktadır. Çalışmada kullanılan uçak tiplerine ait motor özellikleri ve pist başında beklerken motor başına birim zamanda tükettikleri yakıt miktarı Çizelge 3.17'de verilmiştir.

Çizelge 3.17. Uçaklarda kullanılan motor tipleri ve yakıt akışı [39]

Uçak tipi	Motor sayısı	Motor tipi	Yakıt akışı (kg/s)
C550	2	JT15D-4	0,026
A320	2	V2500-A1	0,124
B773	2	GE90-90B	0,291

3.7. Trafik Verilerinin Analizi

Çalışmada oluşturulan modelin gerçek bir havaalanı üzerinde test edilmesi için seçilen LTFJ havalimanı uçak trafiği verileri için olabildiğince yoğun bir gün seçilmesi gerekmektedir. Bunun için öncelikli olarak 2018 yılı boyunca aylık uçak trafiği verileri incelenmiştir [2]. Bu veriler Çizelge 3.18’de verilmiştir. Aylık bazda veriler incelendikten sonra en yoğun aylar belirlenmiştir. Bu aylar Temmuz, Ağustos ve Eylül olarak alınabilir. Temmuz, Ağustos ve Eylül ayları için günlük ortalama uçak trafiği sayısı yaklaşık 696 olarak hesaplanmıştır. En yoğun ayların ortalama uçak trafiği sayısına göre 2018 yılı içerisinde yoğun günler olarak dini bayram arifesi olan 17-20 Ağustos tarihleri belirlenmiştir.

Çizelge 3.18. LTFJ havalimanı uçak trafiği verileri [2]

Ay	Uçuş sayısı	Ay	Uçuş sayısı
Ocak	18.314	Temmuz	21.809
Şubat	16.585	Ağustos	21.709
Mart	18.698	Eylül	20.490
Nisan	19.021	Ekim	19.830
Mayıs	19.134	Kasım	18.026
Haziran	19.888	Aralık	18.763

17-20 Ağustos günleri için trafik verisi EUROCONTROL’ün veri tabanından sağlanmıştır. EUROCONTROL tarafından sağlanan veriler SAAM ve NEST üzerinde benzetim ve analiz çalışmalarının yapılacağı şekilde düzenlenmiştir [40]. Bu veriler *Excel Makro* programı ile yeniden düzenlenerek çalışma için kullanışlı hale getirilmiştir.

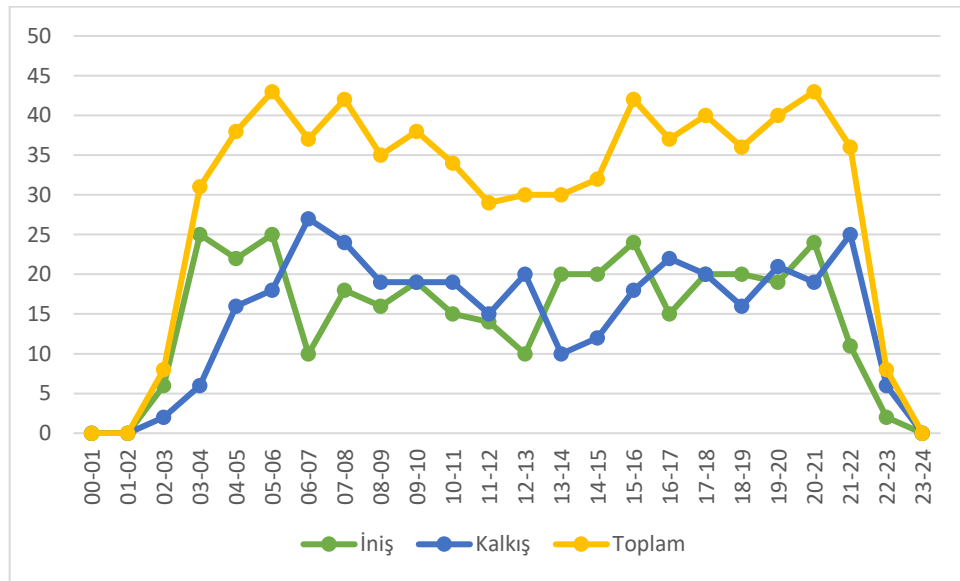
Excel Makro ile düzenlenmiş verilerden elde edilen gerçekleşen iniş, kalkış ve toplam uçuş sayıları günlere göre Çizelge 3.19’da verilmiştir. Düzenleme yapılırken ardışık günler için bir önceki gün başlamış olan gece uçuşları her iki günün verilerinde

de yer aldığından dolayı LTFJ havalimanına inişlerin tamamlandığı gün, kalkışların ise başladığı gün dikkate alınmıştır.

Çizelge 3.19. LTFJ havalimanı tarihlere göre gerçekleşen operasyon sayıları

Tarih	İniş	Kalkış	Toplam
17 Ağustos	355	354	709
18 Ağustos	346	352	698
19 Ağustos	355	348	703
20 Ağustos	335	345	680

Havaalanı üzerinde gerçekleşen operasyonların zaman bilgileri verilerden çekilerek saatlik dilimlerde gerçekleşen iniş, kalkış ve toplam operasyon sayıları belirlenmiştir. 17 Ağustos tarihi için bu bilgiler grafik halinde Şekil 3.11’de verilmiştir. Bu grafikten yararlanarak havaalanının yoğun saatleri belirlenebilir.



Şekil 3.11. 17 Ağustos 2018 tarihi iniş-kalkış ve toplam operasyonların saatlik dağılımı

Grafik incelendiğinde saat 15.00 ile 21.00 arası trafik verileri kullanılarak uygun bir dağılım elde edilebileceğine karar verilmiştir. Elde edilen bu dağılım kullanılarak farklı senaryoların türetilmesi sağlanabilmektedir. İniş uçaklarının geliş zaman aralıkları (IAT) ve kalkış uçaklarının ayrılma zaman aralıkları (IDT) için dağılımlar ayrı ayrı ele alınmıştır. EasyFit programı kullanılarak elde edilen dağılımlar ve parametreleri Çizelge 3.20’de verilmiştir. Hem IAT hem de IDT verilerinin Log-Logistic dağılıma uyduğu

görülmüştür. α , şekil (shape) parametresini; β , ölçek (scale) parametresini; γ , konum (location) parametresini göstermektedir. Verilerin dağılıma uygunluğu için oluşturulan hipotezler şu şekildedir:

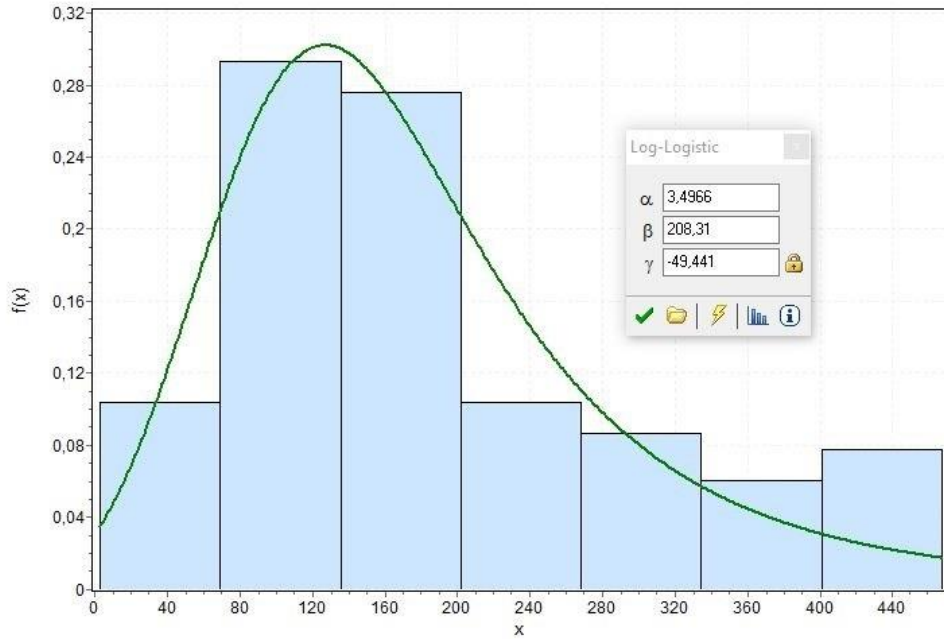
H_0 : IAT(IDT) verisi Log-Logistic dağılımına uygunluk sağlamaktadır.

H_1 : IAT(IDT) verisi Log-Logistic dağılımına uygunluk sağlamamaktadır.

IAT verisi H_0 hipotezi Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling ve Ki-kare testleri için %95 güven seviyesinde ($\alpha=0,05$) reddedilmemiştir. IDT verisi H_0 hipotezi ise Kolmogorov-Smirnov ve Anderson-Darling testleri için %95 güven seviyesinde ($\alpha=0,05$) reddedilmemiştir. Bu sebeple IAT ve IDT verileri Log-Logistic dağılımına uygunluk sağlamaktadır. IAT ve IDT verileri için olasılık yoğunluk fonksiyonu grafikleri sırasıyla Şekil 3.12 ve Şekil 3.13’de verilmiştir. Çizelge 3.21 ve Çizelge 3.22’de EasyFit programından elde edilen test sonuçları paylaşılmıştır.

Çizelge 3.20. IAT ve IDT dağılımları ve parametreleri

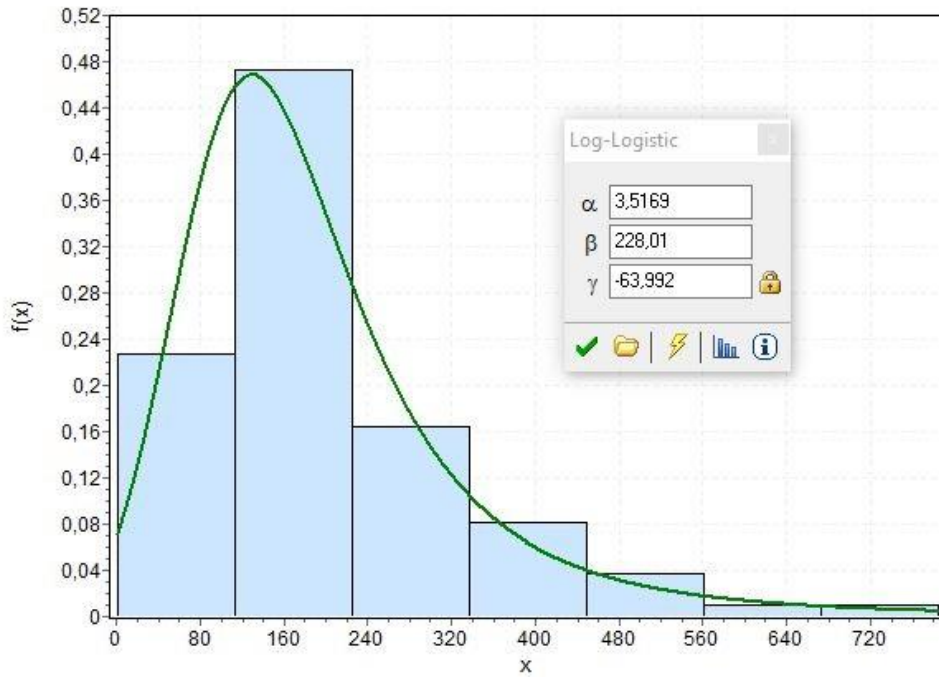
İniş operasyonları	Kalkış operasyonları
Log-Logistic	Log-Logistic
$\alpha = 3,4966$ $\beta = 208,31$ $\gamma = -49,441$	$\alpha = 3,5169$ $\beta = 228,01$ $\gamma = -63,992$



Şekil 3.12. IAT olasılık yoğunluk fonksiyonu grafiği

Çizelge 3.21. IAT verisi uygunluk iyiliği sonuçları

Log-Logistic (3P)					
Kolmogorov-Smirnov					
Örneklem büyüklüğü	116				
İstatistik	0,05058				
P-Değeri	0,91317				
Rank	1				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Kritik değer	0,09963	0,11355	0,12609	0,14094	0,15125
Reddedildi mi?	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır
Anderson-Darling					
Örneklem büyüklüğü	116				
İstatistik	0,48123				
Rank	1				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Kritik değer	1,3749	1,9286	2,5018	3,2892	3,9074
Reddedildi mi?	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır
Ki-kare					
Serbestlik derecesi	6				
İstatistik	4,7212				
P-Değeri	0,58003				
Rank	4				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Kritik değer	8,5581	10,645	12,592	15,033	16,812
Reddedildi mi?	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır



Şekil 3.13. IDT olasılık yoğunluk fonksiyonu grafiği

Çizelge 3.22. IDT verisi uygunluk iyiliği sonuçları

Log-Logistic (3P)					
Kolmogorov-Smirnov					
Örneklem büyüklüğü	110				
İstatistik	0,0903				
P-Değeri	0,31211				
Rank	2				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Kritik değer	0,10231	0,11661	0,12948	0,14474	0,15532
Reddedildi mi?	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır
Anderson-Darling					
Örneklem büyüklüğü	110				
İstatistik	0,43653				
Rank	1				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Kritik değer	1,3749	1,9286	2,5018	3,2892	3,9074
Reddedildi mi?	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır
Ki-kare					
Serbestlik derecesi	6				
İstatistik	15,528				
P-Değeri	0,01653				
Rank	11				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Kritik değer	8,5581	10,645	12,592	15,033	16,812
Reddedildi mi?	Evet	Evet	Evet	Evet	Hayır

Veriler düzenlenerek elde edilen önemli bir bilgi de uçakların TMA'ya giriş yaptıkları noktalardaki trafik dağılımıdır. Gün içerisinde iniş uçaklarının hangi noktalardan giriş yaptıkları verilen enlem ve boylam bilgilerinden belirlenerek toplam uçuş sayısına göre giriş noktalarının kullanım yüzdelik (%) dağılımı elde edilmiştir. Bu değerler Çizelge 3.23'de verilmiştir.

Çizelge 3.23. TMA giriş noktaları trafik dağılım oranları (%)

	17 Ağustos	18 Ağustos	19 Ağustos	20 Ağustos	Ortalama
ATVEP	14,3	14,3	13,6	13,9	14,0
GELBU	2,6	1,8	2,3	2,1	2,2
TURKO	13,4	12,6	12,3	13,9	13,0
ELVON	24,9	26,0	26,1	23,8	25,2
EVNOT	32,8	32,7	33,5	33,7	33,2
PAZAR	8,6	9,4	9,9	9,9	9,5
TETSA	3,4	3,2	2,3	2,7	2,9

Havaalanında operasyon gerçekleştiren uçakların tiplerine göre kategorileri belirlenmiş ve trafik dağılım verisi türetilmiştir. Günlere göre trafik bilgisi ve trafik dağılım oranları (%) Çizelge 3.24’de verilmiştir.

Çizelge 3.24. LTFJ havalimanı trafik dağılım oranları (%)

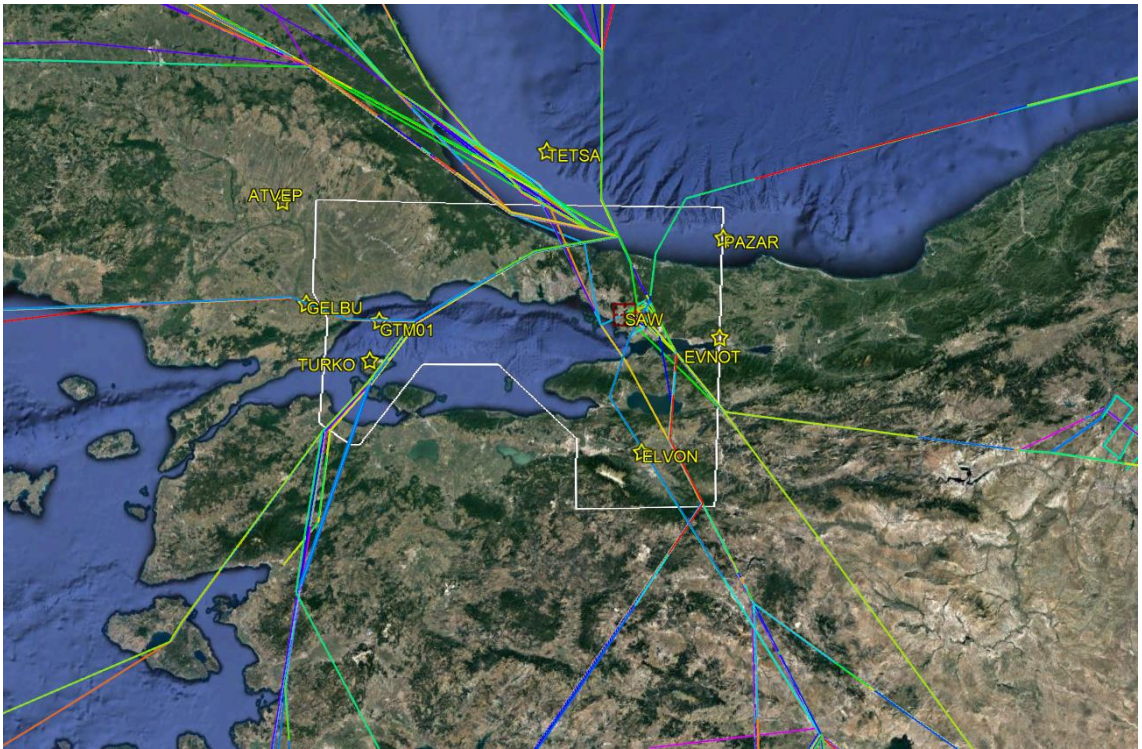
	17 Ağustos	18 Ağustos	19 Ağustos	20 Ağustos
L	0,3	0,0	0,0	0,0
M	98,6	98,6	99,1	99,1
H	1,1	1,4	0,9	0,9

EUROCONTROL verilerinde bir uçuşun zamanlara göre enlem, boylam ve irtifa bilgisi yer almaktadır. Bu verilerden yararlanarak uçuşların *Google Earth* üzerinde görselleştirmesi yapılmıştır. *Google Earth* uygulamasına enlem, boylam ve irtifa bilgilerinin aktarılması için *GPS Visualizer* uygulamasından yararlanılmıştır. *GPS Visualizer*, *Google Earth* üzerinde rota bilgilerinin görselleştirilmesini sağlayan bir uygulamadır [41]. Her bir uçuşun enlem, boylam ve irtifa bilgisinin *GPS Visualizer* tarafından okunacak şekilde gerekli düzenlemeleri yapılmıştır. 17 Ağustos tarihinde LTFJ havalimanına için iniş ve kalkış yapan uçakların görselleştirilmiş rotaları sırasıyla Şekil 3.14’de ve Şekil 3.15’de yer almaktadır. Görseller incelendiğinde özellikle TMA içerisinde her uçuş birebir aynı rota üzerinden gerçekleşmiş gibi gözükmemektedir. Bunun sebebi EUROCONTROL tarafından sağlanan verilerde, uçağın gerçekteki enlem, boylam ve zaman bilgisinin havaalanı iniş ve kalkış prosedürlerinde yer alan rotalara uyarlanmış şekilde verilmesidir.

Sabiha Gökçen Havalimanı (LTFJ) için trafik verileri elde edildikten sonra Monte Carlo benzetimi kullanılarak farklı test problemleri elde edilmiştir. Monte Carlo benzetimi ile iniş ve kalkış operasyonu gerçekleştiren uçakların ataması, geliş oranlarına uygun olarak uçakların rota atamaları, trafik dağılımına uygun oranda farklı kategoride uçak ataması, IAT ve IDT dağılımlarına uygun olarak ETA ve ETD zaman atamaları yapılmıştır.



Şekil 3.14. 17 Ağustos 2018 tarihinde LTFJ havalimanına inen uçakların görselleştirilmiş rotaları



Şekil 3.15. 17 Ağustos 2018 tarihinde LTFJ havalimanından kalkan uçakların görselleştirilmiş rotaları

4. PROBLEMİN MATEMATİKSEL MODELİ

Bölüm 3.1’de tanımlanmış olan problem için oluşturulan matematiksel model verilecektir. Öncelikli olarak modelde kullanılan kümeler, indisleri parametreler ve karar değişkenleri tanımlandıktan sonra modelin kısıtları ve amaç fonksiyonları denklemler halinde verilip açıklamaları yapılacaktır.

4.1. Matematiksel Model

Geliştirilen modelde yapılan kabuller ise şöyledir:

- Her uçağın TMA’ya giriş noktası bellidir.
- Uçaklar havaalanı son yaklaşma hattına direk bir rota ile yönlendirilmektedirler.
- Uçaklar TMA içerisinde CDA yapmaktadırlar.
- Son yaklaşma hattı boyunca uçakların baş açıları değişmemektedir.
- Uçakların TMA ve FAF vektör manevraları sırasında irtifaları ve hızları sabittir.
- Uçakların ağırlıklarının TMA içerisinde değişmediği kabul edilmiştir.
- Uçakların koordine dönüş sırasında gerekli yatış açısına anlık olarak ulaştıkları kabul edilmiştir.
- Çalışmada standart atmosferik koşulların geçerli olduğu kabul edilmiştir.
- TMA içerisinde rüzgâr hızı ve ivmesi sıfırdır.
- Ardışık kalkış uçaklarının farklı rotaları kullandıkları kabul edilmiştir.
- İniş ve kalkış uçakları TMA içerisinde seviye olarak ayrılmışlardır.

Kümeler

$A = \{1, 2, 3, \dots, n\}$; Uçak kümesi

$O = \{o_i | o_i = 1 \text{ ise iniş}, o_i = 2 \text{ ise kalkış}, i \in A\}$; Uçak operasyon tipi kümesi

$C = \{c_i | c_i = 1 \text{ ise } L, c_i = 2 \text{ ise } M, c_i = 3 \text{ ise } H, i \in A\}$; Uçak kategori kümesi

$R = \{1, 2, \dots, 6\}$; TMA rota kümesi

İndisler

$i, j \in A$: Uçakları numaralandırmak için kullanılan indistir.

$k \in A$: Uçakların sıralamasını göstermek için kullanılan indistir.

Parametreler

o_i : i . uçağın operasyon tipi

c_i : i . uçağın kategorisi

r_i : i . uçağın rotası

s_i : i . uçağın hedeflenen pist başı operasyon zamanı

e_i : i . uçağın en erken pist başı operasyon zamanı

l_i : i . uçağın en geç pist başı operasyon zamanı

sep_{ij} : ardışık i . uçak ile j . uçak arasındaki kuyruk türbülansı ayırması

$\mathcal{D}$: Radar ayırması

$\mathcal{L}_i^r$: i . uçağın TMA giriş noktasından FAF noktasına kadar geliş rotasının uzunluğu

v_i^r : i . uçağın geliş rotasında TMA'ya giriş seviyesindeki hızı

$\mathcal{L}_i^d$: i . uçağın TMA'ya giriş seviyesinden 5000 ft'e CDA için gereken yatay mesafe

$\mathcal{C}_i^d$: i . uçağın TMA'ya giriş seviyesinden 5000 ft'e CDA için gereken süre

$\mathcal{F}_i^d$: i . uçağın TMA'ya giriş seviyesinden 5000 ft'e CDA süresince yakıt tüketimi

$\mathcal{L}^{course}$: son yaklaşma hattı uzunluğu

v_i^f : i . uçağın FAF noktası 5000 ft hızı

$\mathcal{L}_i^f$: i . uçağın son yaklaşma hattında 5000 ft'den pist başına CDA için gereken yatay mesafe

$\mathcal{C}_i^f$: i . uçağın yaklaşma hattında 5000 ft'den pist başına CDA için gereken süre

$\mathcal{F}_i^f$: i . uçağın son yaklaşma hattında 5000 ft'den pist başına CDA süresince yakıt tüketimi

$\mathcal{F}_i^{dep}$: i . kalkış uçağının birim zamandaki yakıt tüketimi

ϑ_{ij} : i . uçağın geliş rotası ile j . uçağın geliş rotası arasındaki açı farkı

ψ_i^f : i . uçağın son yaklaşma hattına dönüşte kendi rotasından sapma açısı

$\alpha_i^3, \alpha_i^2, \alpha_i^1, \alpha_i^0$: i . uçağın TMA giriş seviyesinde vektör manevrası yakıt tüketimi regresyon katsayıları

$\beta_i^3, \beta_i^2, \beta_i^1, \beta_i^0$: i . uçağın 5000 ft son yaklaşma hattına dönüş vektör manevrası yakıt tüketimi regresyon katsayıları

M : çok büyük pozitif sayı

g : yer çekimi ivmesi

Karar Değişkenleri

x_{ik} : $\begin{cases} 1, i. \text{ uçak } k. \text{ sıraya atanmışsa} \\ 0, \text{ diğer durum} \end{cases}$

$y_i: \begin{cases} 1, i. \text{ uçak gecikme almışsa} \\ 0, \text{ diğer durum} \end{cases}$

t_i : i . uçağın pist başı operasyona başlama zamanı

t_i^{faf} : i . uçağın FAF noktasında bulunma zamanı

t_i^{tma} : i . uçağın TMA'ya giriş zamanı

s_i^{faf} : i . uçağın FAF noktasında hedeflenen bulunma zamanı

t_i^{cda} : i . uçağın TMA'da CDA başlama zamanı

t_i^{course} : i . uçağın son yaklaşma hattında alçalmaya başlama zamanı

d_i : i . uçağın pist başında almış olduğu gecikme

d_i^{faf} : i . uçağın FAF noktasında almış olduğu gecikme

Uçakların hedeflenen FAF noktasında bulunma zamanları ve TMA'ya giriş zamanları model tarafından hesaplatılmıştır. Bunun sebebi hedeflenen zamanları ile atanan zamanlar hesaplanırken FAF noktasında birebir aynı vektör manevrasının yapılmasını sağlamaktır. Bu durumda TMA'ya giriş zamanında herhangi bir değişiklik olmazken FAF noktasında bulunma zamanı ile atanan zaman arasında kıyas yapmak daha adil olacaktır.

TMA vektör manevrası karar değişkenleri

R_i : i . uçağın TMA vektör manevrası dönüş yarıçapı

ϕ_i : i . uçağın TMA vektör manevrası yatış açısı

ψ_i : i . uçağın TMA vektör manevrası sapma açısı

a_i : i . uçağın TMA vektör manevrası dönüş süresinde kat ettiği mesafe

b_i : i . uçağın TMA vektör manevrası dönüş süresinde esas yörüngesinde kat ettiği mesafe

h_i : i . uçağın TMA vektör manevrası sabit baş açısında kat ettiği mesafe

λ_i : i . uçağın TMA vektör manevrası mesafesi

FAF vektör manevrası karar değişkenleri

R_i^f : i . uçağın FAF vektör manevrası dönüş yarıçapı

ϕ_i^f : i . uçağın FAF vektör manevrası yatış açısı

a_i^f : i . uçağın FAF vektör manevrası dönüş süresince kat ettiği mesafe

λ_i^f : i . uçağın FAF vektör manevrası mesafesi

Yakıt tüketimi karar değişkenleri

f_i^1 : i . uçağın TMA vektör manevrası dönüş süresince harcayacağı yakıt

f_i^2 : i . uçağın TMA vektör manevrası dönüş süresince sabit baş açısı ile harcayacağı yakıt

f_i^3 : i . uçağın FAF vektör manevrası süresince harcayacağı yakıt

f_i^4 : i . uçağın TMA düz uçuş süresince harcayacağı yakıt

f_i^5 : i . uçağın son yaklaşma hattında düz uçuş süresince harcayacağı yakıt

f_i^{arr} : i . iniş uçağının toplam yakıt tüketimi

f_i^{dep} : i . kalkış uçağının toplam yakıt tüketimi

Kısıtlar

Denklem (4.1) ile ilk sıraya atanan uçağın pist operasyon zamanı belirlenmektedir. Denklem (4.2)'de diğer sıralara atanan uçakların pist operasyon zamanları belirlenirken aralarında gerekli kuyruk türbülansı ayırması da sağlanmaktadır. Uçakların en erken ve en geç operasyonlarını gerçekleştirebilecekleri zaman penceresi Denklem (4.3)'de verilmiştir. Pist üzerinde ve FAF noktasında meydana gelen gecikmeler sırasıyla Denklem (4.4) ve Denklem (4.7) ile hesaplanmaktadır. Uçakların FAF noktasında hedeflenen ve atanan bulunma zamanları sırasıyla Denklem (4.5) ve (4.6); son yaklaşma hattında ve TMA'da alçalmaya başlama zamanları sırasıyla Denklem (4.8) ve (4.9); TMA'ya giriş zamanları (4.10) ile hesaplanmaktadır. Denklem (4.11) ve (4.12)'de verilen kısıtlar sırasıyla her sıraya bir uçağın ve her uçağın bir sıraya atanmasını sağlayan kısıtlardır.

$$t_i \geq -M.(1 - x_{ik}) \quad \forall i, k \quad k = 1 \quad (4.1)$$

$$t_j \geq t_i + sep_{ij} - M.(2 - x_{ik-1} - x_{jk}) \quad \forall i, j, k \quad i \neq j, k > 1 \quad (4.2)$$

$$e_i \leq t_i \leq l_i \quad \forall i \quad (4.3)$$

$$d_i \geq t_i - s_i \quad \forall i \quad (4.4)$$

$$s_i^{faf} \geq s_i - C_i^f - (\mathcal{L}^{course} - \mathcal{L}_i^f)/v_i^f \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.5)$$

$$t_i^{faf} \geq t_i - C_i^f - (\mathcal{L}^{course} - \mathcal{L}_i^f)/v_i^f \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.6)$$

$$d_i^{faf} \geq t_i^{faf} - s_i^{faf} - d_i \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.7)$$

$$t_i^{course} = t_i - C_i^f \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.8)$$

$$t_i^{cda} = t_i^{faf} - C_i^d - \frac{\lambda_i^f}{v_i^f} \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.9)$$

$$t_i^{tma} = t_i^{faf} - C_i^d - \frac{\mathcal{L}_i^r - \mathcal{L}_i^d - \lambda_i^f}{v_i^r} - \frac{\lambda_i^f}{v_i^f} \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.10)$$

$$\sum_i x_{ik} = 1 \quad \forall k \quad (4.11)$$

$$\sum_k x_{ik} = 1 \quad \forall i \quad (4.12)$$

Son yaklaşma hattı üzerinde ardışık iniş uçakları arasında ayırmalar sağlanırken uçakların hızlarına bağlı olarak iki farklı durum ile karşılaşmaktayız. Bunlar; arkadaki uçağın hızının öndeki uçağın hızından büyük olması ve tam tersi şekilde öndeki uçağın hızının arkadaki uçağın hızından büyük olmasıdır. Uçaklar arasındaki kuyruk türbülansı ayırmasının ilk durumda son nokta olan pist başında (Denklem 4.13), ikinci durumda ilk nokta olan FAF noktasında (Denklem 4.19) sağlanması yeterli olacaktır. İlk durum için pist başı, ikinci durum için FAF noktası zamanları atandıktan sonra sırasıyla FAF noktasında bulunma zamanı Denklem (4.14) ve pist başında bulunma zamanı Denklem (4.18) ile belirlenmektedir.

FAF noktasında radar ayırmasının hem aynı rota üzerinden hem de farklı rota üzerinde gelen uçaklar arasında sağlanması gerekmektedir. Aynı rota üzerinden gelen ardışık uçaklar için radar ayırması Denklem (4.15) ile sağlanırken farklı rota üzerinden gelen ardışık uçaklar arasındaki radar ayırması Denklem (4.17) ile sağlanmaktadır. Uçakların atanan FAF zamanları üzerinden TMA'ya giriş zamanları arkadaki ya da öndeki uçağın daha hızlı olması durumlarına göre sırasıyla Denklem (4.16) ve (4.20) ile hesaplanmaktadır.

$$t_j \geq t_i + sep_{ij} - M. (2 - x_{ik-1} - x_{jk}) \quad (4.13)$$

$$\forall i, j, k \quad i \neq j, o_i = 1, o_j = 1, v_i^f \leq v_j^f, k > 1$$

$$t_j^{faf} \geq t_i^{faf} + sep_{ij} - M. (2 - x_{ik-1} - x_{jk}) + C_i^f - C_j^f \quad (4.14)$$

$$+ \frac{\mathcal{L}^{course} - \mathcal{L}_i^f}{v_i^f} - \frac{\mathcal{L}^{course} - \mathcal{L}_j^f}{v_j^f}$$

$$\forall i, j, k \quad i \neq j, o_i = 1, o_j = 1, v_i^f \leq v_j^f, k > 1$$

$$t_j^{faf} \geq t_i^{faf} + \frac{D}{v_j^f} - M. (2 - x_{ik-1} - x_{jk}) \quad (4.15)$$

$$\forall i, j, k \quad i \neq j, o_i = 1, o_j = 1, r_i = r_j, k > 1$$

$$t_j^{tma} \geq t_i^{tma} + \frac{\mathcal{D}}{v_j^f} - M. (2 - x_{ik-1} - x_{jk}) + \mathcal{C}_i^d - \mathcal{C}_j^d \quad (4.16)$$

$$+ \frac{\mathcal{L}_i^r - \mathcal{L}_i^d - \lambda_i^f}{v_i^r} - \frac{\mathcal{L}_j^r - \mathcal{L}_j^d - \lambda_j^f}{v_j^r} + \frac{\lambda_i^f}{v_i^f} - \frac{\lambda_j^f}{v_j^f} \quad \forall i, j, k \quad i \neq j, o_i = 1, o_j = 1, v_i^f \leq v_j^f, r_i = r_j, k > 1 \quad (4.17)$$

$$t_j^{faf} \geq t_i^{faf} + \frac{\mathcal{D}}{v_i^f \cdot v_j^f \cdot |\sin \vartheta_{ij}|} \sqrt{(v_i^f)^2 + (v_j^f)^2 - 2 \cdot v_i^f \cdot v_j^f \cdot \cos \vartheta_{ij}} - M. (2 - x_{ik-1} - x_{jk}) \quad \forall i, j, k \quad i \neq j, o_i = 1, o_j = 1, r_i \neq r_j, k > 1 \quad (4.18)$$

$$t_j \geq t_i + sep_{ij} - M. (2 - x_{ik-1} - x_{jk}) + \mathcal{C}_j^f - \mathcal{C}_i^f + \frac{\mathcal{L}^{course} - \mathcal{L}_j^f}{v_j^f} - \frac{\mathcal{L}^{course} - \mathcal{L}_i^f}{v_i^f} \quad \forall i, j, k \quad i \neq j, o_i = 1, o_j = 1, v_i^f > v_j^f, k > 1 \quad (4.19)$$

$$t_j^{faf} \geq t_i^{faf} + sep_{ij} - M. (2 - x_{ik-1} - x_{jk}) \quad \forall i, j, k \quad i \neq j, o_i = 1, o_j = 1, v_i^f > v_j^f, k > 1 \quad (4.20)$$

$$t_j^{tma} \geq t_i^{tma} + \frac{\mathcal{D}}{v_j^f} - M. (2 - x_{ik-1} - x_{jk}) + \mathcal{C}_j^d - \mathcal{C}_i^d + \frac{\mathcal{L}_j^r - \mathcal{L}_j^d - \lambda_j^f}{v_j^r} - \frac{\mathcal{L}_i^r - \mathcal{L}_i^d - \lambda_i^f}{v_i^r} + \frac{\lambda_j^f}{v_j^f} - \frac{\lambda_i^f}{v_i^f} \quad \forall i, j, k \quad i \neq j, o_i = 1, o_j = 1, v_i^f > v_j^f, r_i = r_j, k > 1$$

Gecikme alan uçaklar TMA içerisinde yapacakları vektör manevrası ile bu gecikme süresini karşılamakta ve TMA'ya giriş zamanları değişmemektedir. Modelin sadece gecikme alan uçaklar için vektör manevrası hesaplarını yapmasını sağlamak için Denklem (4.21) ve (4.22) kullanılarak y_i , 0-1 karar değişkeninin değer alması sağlanmaktadır.

$$d_i + d_i^{faf} \geq 0.0001 - M. (1 - y_i) \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.21)$$

$$d_i + d_i^{faf} \leq M. y_i \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.22)$$

Gecikme alan iniş uçaklarının vektör manevrası değişkenleri Denklem (4.23)-(4.35) ile belirlenmektedir. Vektör manevrası yatış açısı ve yarıçapı Denklem (4.23)-(4.25), uçağın sapma açısına ve yarıçapa bağlı olarak dönüş süresinde kat ettiği mesafe Denklem (4.26), dönüş süresinde esas yörüngesinde kat ettiği mesafe Denklem (4.27),

sabit baş açısında kat ettiği mesafe Denklem (4.28)-(4.30) kullanılarak hesaplanmaktadır. Vektör manevrası boyunca orijinal rotada izdüşümü ilerlemenin vektör manevrası mesafesinden büyük olmaması Denklem (4.31) ile sağlanmaktadır. Denklem (4.32)'de uçağın aldığı gecikmenin vektör manevrası mesafesi ile karşılanmasını sağlamaktadır. Denklem (4.33), (4.34) ve (4.35) sırasıyla yatış açısının, sapma açısının ve manevra mesafesinin alt ve üst limitlerini göstermektedir.

$$R_i \geq \frac{(v_i^r)^2}{g \cdot \tan \phi_i} - M \cdot (1 - y_i) \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.23)$$

$$R_i \leq \frac{(v_i^r)^2}{g \cdot \tan \phi_i} + M \cdot (1 - y_i) \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.24)$$

$$R_i \leq M \cdot y_i \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.25)$$

$$a_i = 8 \cdot \pi \cdot R_i \cdot \frac{\psi_i}{2\pi} \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.26)$$

$$b_i = 4 \cdot R_i \cdot \sin \psi_i \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.27)$$

$$h_i \geq \frac{\lambda_i - b_i}{\cos \psi_i} - M \cdot (1 - y_i) \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.28)$$

$$h_i \leq \frac{\lambda_i - b_i}{\cos \psi_i} + M \cdot (1 - y_i) \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.29)$$

$$h_i \leq M \cdot y_i \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.30)$$

$$b_i \leq \lambda_i \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.31)$$

$$a_i + h_i = \lambda_i + (d_i + d_i^{faf}) \cdot v_i^r \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.32)$$

$$0 \leq \phi_i \leq \pi/6 \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.33)$$

$$0 \leq \psi_i \leq \pi/2 \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.34)$$

$$0 \leq \lambda_i \leq 20 \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.35)$$

Son yaklaşma hattına dönüş hareketi değişkenleri Denklem (4.36)-(4.40) ile hesaplanmaktadır. Dönüş sırasında geliş rotasından ve son yaklaşma hattından kat edilen mesafe birbirine eşittir ve manevra mesafesi kadardır. Yarıçap hesabı Denklem (4.36), dönüş süresince kat edilen mesafe Denklem (4.37), geliş rotasından ve son yaklaşma hattından kat edilen mesafe Denklem (4.38) kullanılarak hesaplanmaktadır. Ayrıca bu denklemlerde yer alan yatış açısına da karar verilmektedir. Denklem (4.39) ve (4.40) sırasıyla yatış açısının ve manevra mesafesinin alt ve üst limitlerini göstermektedir.

$$R_i^f = \frac{(v_i^f)^2}{g \cdot \tan \phi_i^f} \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.36)$$

$$\alpha_i^f = 2 \cdot \pi \cdot R_i^f \cdot \frac{\psi_i^f}{2\pi} \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.37)$$

$$\lambda_i^f = R_i^f \cdot \tan(\psi_i^f / 2) \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.38)$$

$$0 \leq \phi_i^f \leq \pi/6 \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.39)$$

$$0 \leq \lambda_i^f \leq 10 \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.40)$$

Her bir uçağın yakıt tüketim hesapları Denklem (4.41)-(4.50) kullanılarak yapılmaktadır. TMA vektör manevrasında dönüş süresince yatış açısına bağlı yakıt tüketimi (4.41), düz uçuş süresinde yakıt tüketimi Denklem (4.42) kullanılarak hesaplanmaktadır. Son yaklaşma hattına dönüş vektör manevrası süresinde yakıt tüketimi Denklem (4.43) ile yatış açısına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Uçakların TMA'ya girdikten sonra alçalmaya başlayıncaya kadarki düz uçuş kısmında ve son yaklaşma hattında alçalmaya başlayıncaya kadarki düz uçuş kısmında harcadıkları yakıt miktarı sırasıyla Denklem (4.44) ve (4.45) ile hesaplanmaktadır.

$$f_i^1 = (\alpha_i^3 \cdot (\phi_i)^3 + \alpha_i^2 \cdot (\phi_i)^2 + \alpha_i^1 \cdot \phi_i + \alpha_i^0) \cdot \alpha_i \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.41)$$

$$f_i^2 = \alpha_i^0 \cdot h_i \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.42)$$

$$f_i^3 = (\beta_i^3 \cdot (\phi_i^f)^3 + \beta_i^2 \cdot (\phi_i^f)^2 + \beta_i^1 \cdot \phi_i^f + \beta_i^0) \cdot \alpha_i^f \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.43)$$

$$f_i^4 = \alpha_i^0 \cdot (\mathcal{L}_i^r - \lambda_i^f - \mathcal{L}_i^d - \lambda_i) \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.44)$$

$$f_i^5 = \beta_i^0 \cdot (\mathcal{L}^{course} - \mathcal{L}_i^f - \lambda_i^f) \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.45)$$

İniş uçaklarının TMA'ya girişten piste ulaşınca kadar farklı fazlardaki yakıt tüketim hesaplamalarını verdikten sonra gecikme alıp almamaları durumuna göre toplam yakıt tüketimlerinin hesaplanması amacıyla Denklem (4.46)-(4.49) tanımlanmıştır. Kalkış uçaklarının aldıkları gecikmeye bağlı olarak pist başı yakıt tüketim hesapları da Denklem (4.50) ile yapılmaktadır.

$$f_i^{arr} \geq f_i^1 + f_i^2 + f_i^3 + f_i^4 + f_i^5 + f_i^d + f_i^f - M \cdot (1 - y_i) \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.46)$$

$$f_i^{arr} \leq f_i^1 + f_i^2 + f_i^3 + f_i^4 + f_i^5 + f_i^d + f_i^f + M \cdot (1 - y_i) \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.47)$$

$$f_i^{arr} \geq f_i^3 + f_i^4 + f_i^5 + f_i^d + f_i^f - M \cdot y_i \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.48)$$

$$f_i^{arr} \leq f_i^3 + f_i^4 + f_i^5 + f_i^d + f_i^f + M \cdot y_i \quad \forall i \quad o_i = 1 \quad (4.49)$$

$$f_i^{dep} = f_i^{dep} \cdot d_i \quad \forall i \quad o_i = 2 \quad (4.50)$$

Amaç Fonksiyonları

Çalışmada hem iniş ve hem de kalkış operasyonlarına hizmet eden pistler için birbiriyle çelişen iki amaç ele alınmıştır. Uçakların toplam gecikme sürelerinin enküçüklenmesi (Denklem 4.51) ve toplam yakıt tüketiminin enküçüklenmesi (Denklem 4.52) amaç fonksiyonları ayrı ayrı kullanılmaları durumunda sırasıyla kalkış ve iniş uçaklarına öncelik verilmesi durumu oluşmaktadır. Bizim çalışmamızda önerilen çok amaçlı matematiksel model ile çelişen bu iki amacın birlikte değerlendirilmesi ve eniyilenmiş bir ödünleşme sağlanması mümkün olabilmektedir. Amaç fonksiyonları ϵ -kısıt yöntemi kullanılarak bir araya getirilmişlerdir. ϵ -kısıt yönteminde amaçlardan bir tanesi kısıtlara eklenerek diğer amaç fonksiyonunun eniyilenmesi sağlanır.

$$\sum_i d_i + d_i^{faf} \quad (4.51)$$

$$\sum_i f_i^{arr} + f_i^{dep} \quad (4.52)$$

4.2. Matematiksel Modelin Test Edilmesi için Senaryo Planlaması

Çalışma kapsamında oluşturulan çok amaçlı matematiksel model oluşturulan farklı senaryolar ile test edilmiştir. Senaryolar farklı zaman pencereleri ile test edilerek elde edilen çözümler arasındaki farklılıklar gösterilmiştir. 5 farklı senaryo için toplam uçak sayısı, geliş rotalarını kullanan uçak sayısı, kategorilere göre uçak sayısı ve zaman penceresi bilgilerinin yer aldığı planlama cetveli Çizelge 4.1’de verilmiştir. LTFJ verilerine göre gelen ve giden uçak dağılım oranı yarı yarıyadır. Bu sebeple çizelgede verilen toplam uçak sayısının yarısını iniş diğer yarısını da kalkış operasyonları oluşturmaktadır. Çalışmada her bir senaryo FCFS prensibine göre de koşturulmuştur. Bu prensip için modele Denklem (4.53)’ de verilen kısıt eklenmiştir.

$$t_j \geq t_i \quad \forall i \neq j, s_i \geq s_j \quad (4.53)$$

Senaryolar için elde edilen çözümler Bölüm 5’de ayrıntılı olarak verilmiştir. Farklı zaman penceresi için test edilen senaryoların sonuçları FCFS sonuçları ile kıyaslanmıştır.

Çizelge 4.1. Senaryo planlaması

Senaryo	Zaman penceresi (sn)	Uçak sayısı	Geliş rotalarına göre uçak dağılımı						Kategorilere göre uçak dağılımı		
			1	2	3	4	5	6	L	M	H
1	1a	[ETA, ETA+180]	20	2	3	2	1	-	-	18	2
	1b	[ETA, ETA+200]									
2	2a	[ETA, ETA+180]	16	2	1	3	1	-	1	14	1
	2b	[ETA, ETA+200]									
	2c	İniş [ETA, ETA+100]									
		Kalkış [ETA-100, ETA+100]									
3	3a	[ETA, ETA+180]	16	2	1	2	2	1	-	-	14
	3b	İniş [ETA, ETA+150] Kalkış [ETA-100, ETA+150]									
4		[ETA, ETA+180]	20	2	1	3	3	1	-	1	17
5	5a	[ETA, ETA+180]	22	2	3	2	3	-	1	1	18
	5b	[ETA, ETA+170]									

Senaryo 1 ve 4’de 20, senaryo 2 ve 3’de 16, senaryo 5’de 22 uçak ele alınmıştır. Bu uçakların yarısını iniş operasyonu diğer yarısını da kalkış operasyonu oluşturmaktadır. Senaryo 1,4 ve 5’de zaman penceresinde uçakların yalnızca hedeflenen zamandan sonra operasyonlarını gerçekleştirmelerine izin verilmiştir. Senaryo 2 ve 3’de hem iniş hem de kalkışlar için zaman penceresinde gecikmeye izin verildiği gibi sadece kalkış uçakları için hedeflenen zamandan önce operasyonlarını gerçekleştirmelerine izin verilmiştir. Çizelgede geliş rotalarının kaç uçak tarafından kullanıldığı ve uçak kategori dağılım bilgisi paylaşılmıştır.

5. DENEYSEL SONUÇLAR

Bölüm 3.7’de verilmiş olan Sabiha Gökçen Havalimanı (LTFJ) trafik verilerinden yararlanılarak Monte Carlo benzetimi ile farklı test senaryoları oluşturulmuştur. Senaryolarda farklı sayıda uçak ele alınmış ve elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak paylaşılmış ve FCFS prensibine göre elde edilen sonuçlar ile de kıyaslaması yapılmıştır.

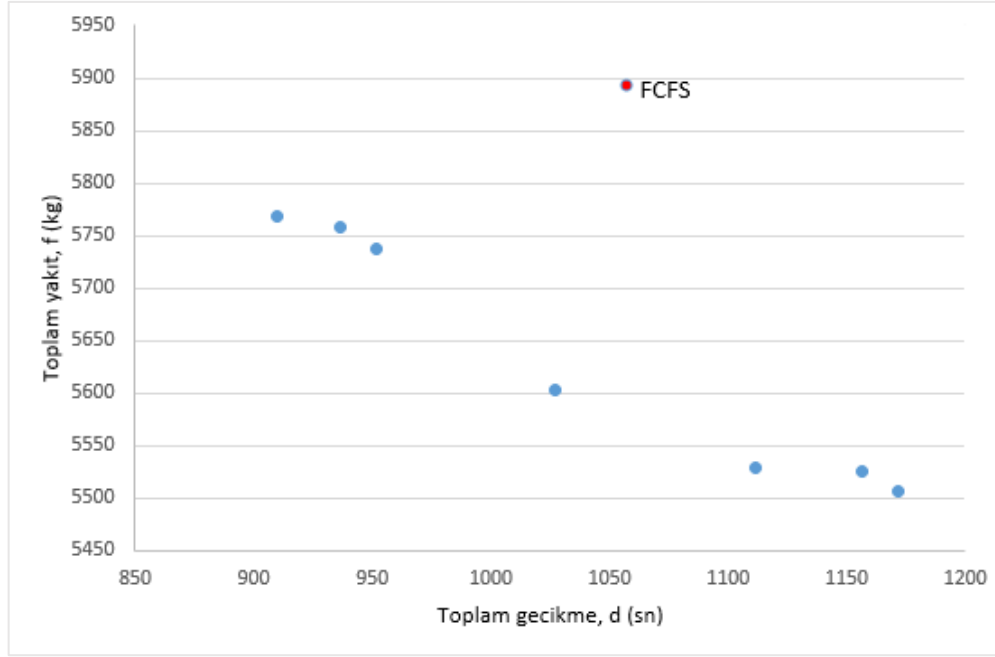
Benzetim çalışmalarında farklılık gösteren parametreler şu şekilde sıralanabilir:

- Uçak sayısı
- Uçakların operasyon türleri
- Uçakların hedeflenen operasyon zamanları
- Uçakların performans kategorileri
- Uçakların TMA giriş noktaları ve rotaları

Oluşturulan çok amaçlı doğrusal olmayan matematiksel model GAMS ortamında kodlanmış ve çeşitli senaryolarla yarım saatlik operasyon aralığı için test edilmiştir. Programda MIP kısmı için GAMS/CPLEX, NLP kısmı için GAMS/CONOPT, MINLP kısmı için GAMS/DICOPT çözücülerini kullanılmıştır. Tüm testlerde 2.7 GHz Intel Core i7 işlemcili 8 GB bellekli 64-bit bir bilgisayar ve GAMS 23.3.3 programı kullanılmıştır.

Senaryo 1

Senaryo 1’de 10 iniş uçağı ve 10 kalkış uçağı olmak üzere toplam 20 uçağın operasyonu ele alınmıştır. İlk aşamada (Senaryo 1a) zaman penceresinde uçakların hedeflenen zamandan (ETA) önce operasyon yapmalarına olanak tanınmazken 180 saniyeye kadar gecikmelerine izin verilmiştir. Operasyonların tamamlanma zamanı 1659 saniyedir (27.65 dk.). 20 uçaklık ilk senaryo için FCFS prensibi ve çok amaçlı model etkin çözümleri Şekil 5.1’de, çözüm ayrıntıları da Çizelge 5.1’de paylaşılmıştır. Çizelgede d , toplam gecikme miktarını; f , toplam yakıt tüketimini; f_1 , TMA vektör manevrası koordine dönüş sırasında toplam yakıt tüketimini; f_2 , TMA vektör manevrası düz uçuş süresince toplam yakıt tüketimini; f_3 , son yaklaşma hattına dönüş vektör manevrası toplam yakıt tüketimini; f_4 , TMA düz uçuş süresince yakıt tüketimini; f_5 , son yaklaşma hattı düz uçuş süresince toplam yakıt tüketimini; f_{arr} , iniş uçaklarının toplam yakıt tüketimini; f_{dep} , kalkış uçaklarının gecikmelerden kaynaklı toplam yakıt tüketimini göstermektedir.



Şekil 5.1. Senaryo 1a FCFS ve etkin çözümleri

Çizelge 5.1. Senaryo 1a FCFS ve etkin çözümler için gecikme(sn) ve yakıt tüketimleri(kg)

		d	f	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_{arr}	f_{dep}
	FCFS	1.056,8	5.893,8	908,9	776,1	457,2	1.182,4	423,3	5.686,4	105,4
Etkin Çözümler	1	909,8	5.767,9	1.419,2	524,9	829,5	851,6	147,4	5.710,8	57,1
	2	936,8	5.757,8	1.397,7	517,6	829,5	851,6	147,4	5.682,1	75,7
	3	951,78	5.737,5	1.357,0	519,5	829,5	851,6	147,4	5.643,2	94,3
	4	1.026,8	5.603,9	1.270,8	463,8	829,5	851,6	147,4	5.501,4	102,4
	5	1.111,8	5.528,5	921,4	344,6	829,5	1.217,6	147,4	5.398,8	129,7
	6	1.156,8	5.525,8	905,9	335,8	829,5	1.217,6	147,4	5.374,5	151,3
	7	1.171,8	5.507,0	879,3	325,0	829,5	1.217,6	147,4	5.337,1	169,9

Çizelge 5.1’de verilen sonuçlarda toplam gecikme (d) sn, toplam yakıt tüketimleri kg olarak verilmiştir. 7 farklı etkin çözümün ortalama çözüm süresi 90.53 saniyedir. Bu etkin çözümlerin FCFS çözümü ile kıyaslamaları yapılmış gecikme ve yakıt tüketimlerinde meydana gelen yüzdelik (%) iyileşme oranlarının yanı sıra ilk sıralamasından sapan toplam uçak (ND), toplam ilk sıralamadan sapma (TD), gecikme alan iniş uçağı D_{arr} ve kalkış uçağı sayısı D_{dep} Çizelge 5.3’de paylaşılmıştır. Negatif işaretli değerler verilen oranda kötüleşme olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.2. Senaryo 1a için FCFS ile etkin çözümlerin kıyaslanması

% İyileşme							Uçak Sayısı			
Toplam Gecikme	Toplam Yakıt	Giriş İrtifasındaki Yakıt	FAF Dönüş Yakıtı	Geliş Yakıtı	Gidiş Yakıtı		ND	TD	D_{arr}	D_{dep}
1	13,9	2,1	2,5	-10,9	-0,4	45,9	5	6	7	4
2	11,4	2,3	3,5	-10,9	0,1	28,2	3	4	7	4
3	9,9	2,7	4,9	-10,9	0,8	10,6	5	6	7	4
4	2,8	4,9	9,8	-10,9	3,3	2,8	5	6	7	4
5	-5,2	6,2	13,4	-10,9	5,1	-23,0	6	6	6	5
6	-9,5	6,3	14,2	-10,9	5,5	-43,5	5	6	6	5
7	-10,9	6,6	15,5	-10,9	6,1	-61,2	6	6	6	5

Çizelge 5.2’de verilen etkin çözümler incelendiğinde; birinci etkin çözümde toplam gecikmede en yüksek oranda iyileşme olurken toplam yakıt tüketiminde de bir iyileşmenin olduğu görülmektedir. Yedinci etkin çözümde ise toplam yakıt tüketiminde en yüksek oranda iyileşmenin olduğu görülmektedir. Ancak bu durumda toplam gecikmeden ödün verildiği görülmektedir. Diğer çözümler incelendiğinde toplam gecikmenin iyileşme oranının artması durumunda toplam yakıt tüketiminde belirli oranda ödün verildiği, tam tersi olarak toplam yakıt tüketiminde iyileşme oranının artması durumunda toplam gecikmeden ödün verildiği görülmektedir.

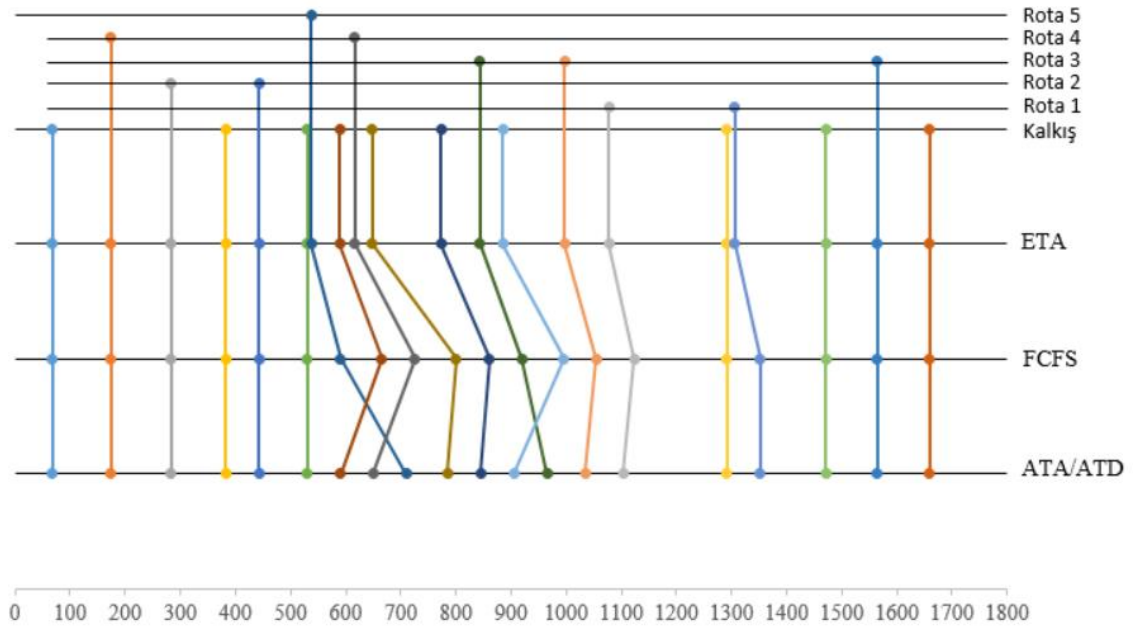
Çizelgede iniş ve kalkış uçaklarının toplam yakıt tüketim değerlerinin ayrı ayrı verilmesinin sebebi, toplam gecikme ve toplam yakıt tüketimi amaçları için iniş ve kalkış operasyonlarının nasıl etkilendiğini göstermektir. Toplam yakıt tüketimi iyileşme oranının artmasının iniş operasyonlarına öncelik verilmesine bağlı olduğu yorumu yapılabilir. İniş operasyonlarının yakıt tüketimi iyileşme oranında artış meydana geldikçe kalkış operasyonlarının yakıt tüketiminden ödün verilmiştir. Tersî durum düşünüldüğünde ise toplam gecikmede iyileşme oranı arttıkça kalkış operasyonlarına öncelik verilmiş ve kalkış operasyonlarının yakıt tüketiminde iyileşme oranı arttıkça iniş operasyonlarının yakıt tüketiminden ödün verilmiştir.

TMA vektör manevrası ve düz uçuş yakıt tüketimi ($f_1 + f_2 + f_4$) ile son yaklaşma hattına dönüş vektör manevrası ve son yaklaşma hattı düz uçuş yakıt tüketimi ($f_3 + f_5$) değerleri ayrı ayrı verilmiştir. Bunun sebebi modelin vermiş olduğu etkin çözümlerde FCFS prensibi yakıt tüketim değerlerine göre son yaklaşma hattına dönüş hareketi ve düz

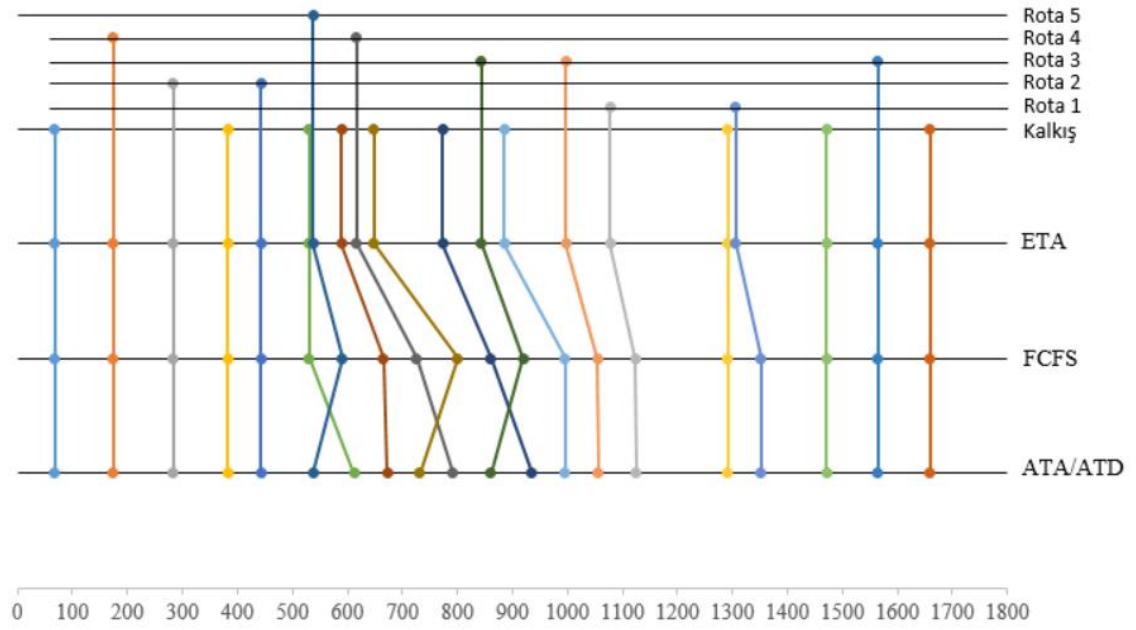
uçuş toplamında bir kötüleşmenin olmasıdır. Sonuçlar ayrıntılı olarak incelenerek bunun sebebi araştırılmıştır. FCFS çizelgesindeki değerler ile kıyas yapıldığında (f_3 ve f_5) yakıt tüketim değerleri arasında, yani son yaklaşma hattına dönüş vektör manevrası ile son yaklaşma hattı düz uçuş yakıt tüketimleri arasında bir ödünleşme meydana gelmektedir. Denklem (4.43) ile (4.45) incelenirse f_5 , son yaklaşma hattı düz uçuş süresince yakıt tüketiminin $\mathcal{L}^{course}$, $\mathcal{L}_i^f$ mesafelerinin ve β_i^0 yakıt tüketim katsayısının sabit olmasından dolayı yalnızca λ_i^f , vektör manevrası mesafesine bağlı olduğu görülmektedir. Model f_5 değerini enküçüklemek amacıyla λ_i^f mesafesini artırmakta dolayısıyla düz uçuş mesafesini olabildiğince kısaltmaktadır. Denklem (4.36) – (4.38) incelenirse λ_i^f mesafesinin artması R_i^f , son yaklaşma hattına dönüş vektör manevrası yarıçapının artması, ϕ_i^f , yatış açısının azalması, α_i^f , dönüş süresince kat edilen mesafenin artması demektir. Ayrıca f_i^5 yakıt tüketiminin azalması için ϕ_i^f , yatış açısının azalması gerekmektedir. Ancak α_i^f , dönüş süresince kat edilen mesafenin artmasından dolayı f_i^5 yakıt tüketiminde artış meydana gelmektedir.

Farklı etkin çözümler için birbirinden farklı uçak sıralamaları elde edilmiştir. Çizelge 5.3’de Senaryo 1 için elde edilen etkin çözümlerdeki sıralamalara bağlı olarak ilk sıralamadan sapan uçak sayısı (ND) ve ilk sıralamadan toplamdaki sapma sayısı (TD) verilmiştir. Bu değerlerin her ikisinin de verilmesinin sebebi bazı uçakların ilk sıralamaya göre birden fazla yer değiştirdiğinin gösterilmek istenmesidir. Bunun yanında çizelgede iniş ve kalkış operasyonlarından gecikme alan uçak sayıları da paylaşılmıştır.

Senaryo 1a için elde edilen etkin çözümlerden birinci ve beşinci çözümlerin rota bilgileri ile birlikte iniş operasyonları, kalkış operasyonları, FCFS sıralamaları, çözümlerden elde edilen sıralamalar, hedeflenen operasyon zamanları, FCFS için atanan operasyon zamanları ve çözümler için atanan operasyon zamanları bilgilerini içeren grafikler sırasıyla Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’de verilmiştir.

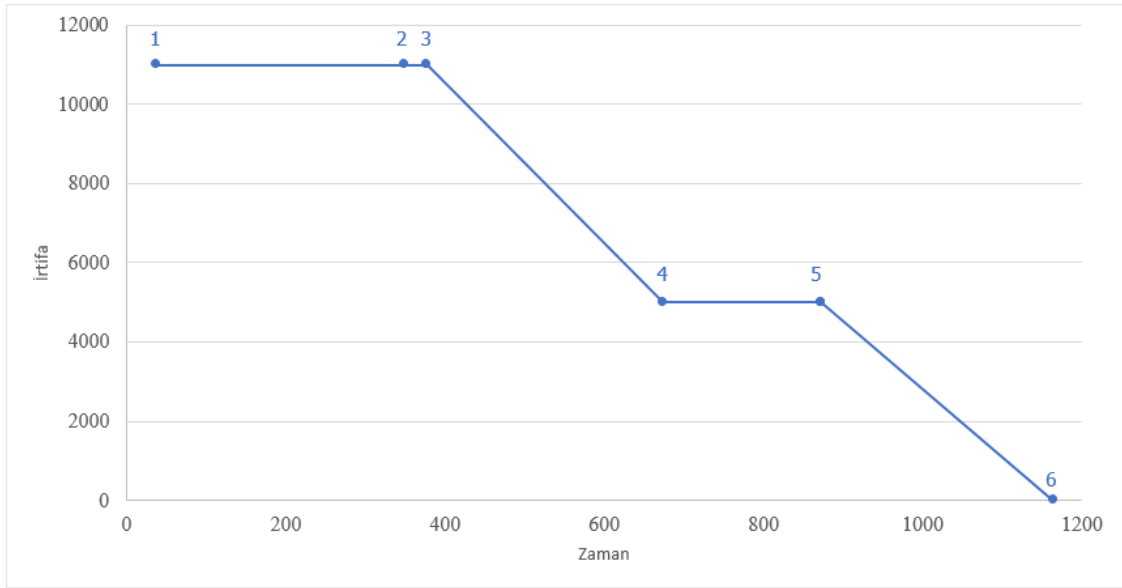


Şekil 5.2. Senaryo 1a birinci etkin çözüm sonuçları



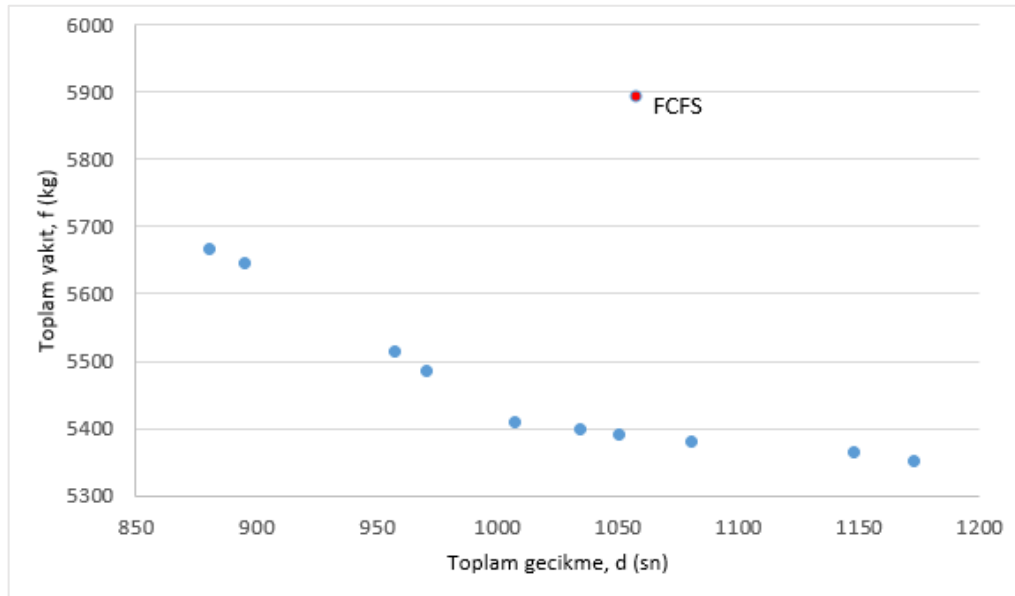
Şekil 5.3. Senaryo 1a beşinci etkin çözüm sonuçları

Çözümlerden örnek bir uçak için irtifa-zaman grafiği Şekil 5.4'de verilmiştir. Grafikte nokta-1, uçağın TMA'ya giriş zamanını ve seviyesini; nokta-2 gecikmelerden kaynaklı TMA vektör manevrası bitiş zamanını; nokta-3 alçalmaya başlama zamanını; nokta-4 5000 ft'e ulaşma ve son yaklaşma hattına dönüş başlama zamanını; nokta-5 son yaklaşma hattında alçalmaya başlama zamanını; nokta-6 piste ulaşma zamanını göstermektedir.



Şekil 5.4. İrtifa – zaman grafiği

Senaryo 1'in ikinci aşamasında uçakların 200 sn. gecikmesine izin verilmiştir (Senaryo 1b). Çok amaçlı modelden elde edilen etkin çözümler Şekil 5.5'de, ayrıntıları da Çizelge 5.3'de paylaşılmıştır. Bu sonuçlar için ortalama çözüm süresi 70.19 saniyedir.



Şekil 5.5. Senaryo 1b FCFS ve etkin çözümleri

Çizelge 5.3. Senaryo 1b FCFS ve etkin çözümler için gecikme(sn) ve yakıt tüketimleri(kg)

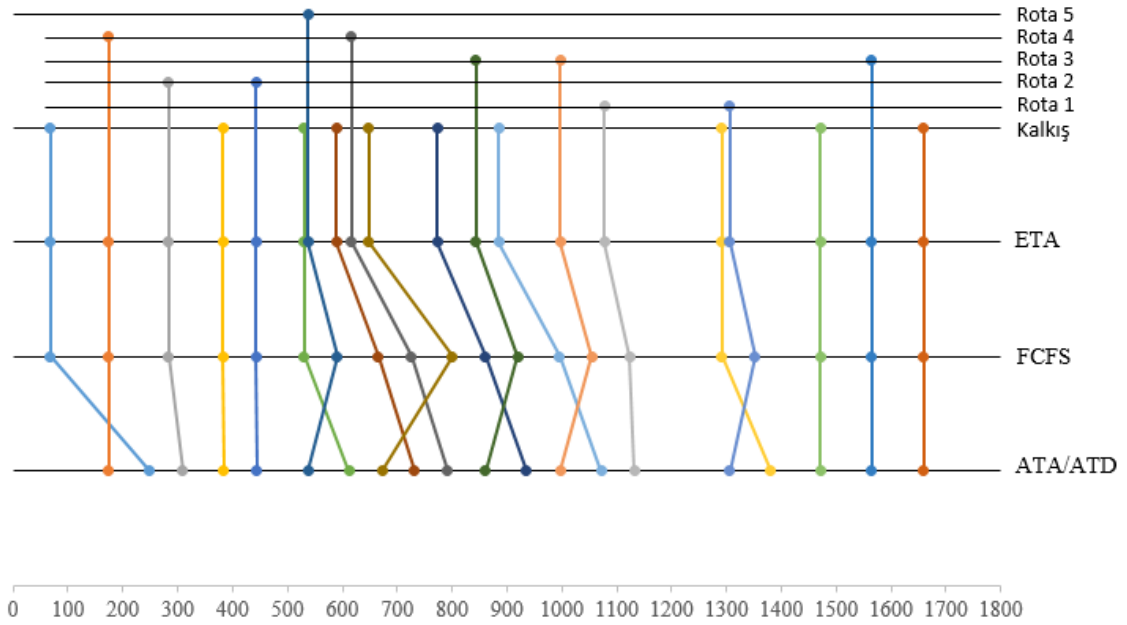
		d	f	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_{arr}	f_{dep}
	FCFS	1.056,8	5.893,8	908,9	776,1	457,2	1.182,4	423,3	5.686,4	105,4
Etkin Çözümler	1	880,2	5.666,8	1.221,7	448,2	829,5	983,2	147,4	5.568,3	98,5
	2	895,2	5.646,5	1.181,0	450,0	829,5	983,2	147,4	5.529,4	117,1
	3	957,2	5.513,7	1.279,0	444,3	1.064,4	642,2	21,0	5.389,2	124,5
	4	970,2	5.485,0	1.064,8	378,7	829,5	983,2	147,4	5.341,9	143,1
	5	1.007,2	5.410,8	729,2	268,7	829,5	1.349,2	147,4	5.262,2	148,6
	6	1.034,2	5.398,8	709,6	256,2	829,5	1.349,2	147,4	5.230,2	168,6
	7	1.050,2	5.391,2	602,4	223,1	829,5	1.479,9	147,4	5.220,5	170,6
	8	1.080,2	5.381,4	751,6	321,8	829,5	1.202,1	147,4	5.190,7	190,7
	9	1.148,0	5.366,3	814,6	349,6	829,5	1.070,8	147,4	5.150,3	216,0
	10	1.173,0	5.352,9	1.416,8	522,1	829,5	851,6	147,4	5.705,7	49,6

Senaryo 1b etkin çözümlerinin FCFS çözümü ile kıyaslamaları yapılmış ve toplam gecikme ve toplam yakıt tüketiminde meydana gelen iyileşme oranları, vektör manevraları yakıt tüketimi iyileşme oranları, iniş kalkış operasyonları yakıt tüketim iyileşme oranları, ilk sıralamasından sapan toplam uçak sayısı, ilk sıralamadan toplam sapma sayısı ve iniş-kalkış uçaklarından gecikme alan uçak sayısı Çizelge 5.4’de verilmiştir.

Çizelge 5.4. Senaryo 1b için FCFS ile etkin çözümlerin kıyaslanması

% İyileşme							Uçak Sayısı			
	Toplam Gecikme	Toplam Yakıt	Giriş İrtifasındaki Yakıt	FAF Dönüş Yakıtı	Geliş Yakıtı	Gidiş Yakıtı	ND	TD	D_{arr}	D_{dep}
1	16,7	3,9	7,5	-10,9	2,1	6,6	5	6	6	4
2	15,3	4,2	8,8	-10,9	2,8	-11,1	7	8	6	4
3	9,4	6,5	17,5	-23,3	5,2	-18,1	2	2	6	4
4	8,2	6,9	15,4	-10,9	6,1	-35,8	4	4	6	4
5	4,7	8,2	18,2	-10,9	7,5	-40,9	8	8	5	5
6	2,1	8,4	19,3	-10,9	8,0	-60,0	6	6	5	5
7	0,6	8,5	19,6	-10,9	8,2	-61,9	11	12	4	6
8	-2,2	8,7	20,7	-10,9	8,7	-80,9	8	8	4	6
9	-8,6	9,0	22,1	-10,9	9,4	-104,9	13	14	5	8
10	-11,0	9,2	2,7	-10,9	-0,3	52,9	6	6	7	4

Çizelge 5.4’de verilen sonuç değerleri incelendiğinde toplam gecikmeden ödün verdikçe toplam yakıt tüketiminde iyileşme olduğu, toplam yakıt tüketiminden ödün verdikçe toplam gecikmede iyileşme olduğu ve buna bağlı olarak iniş ve kalkış operasyonlarına öncelik verildiği görülmektedir. Farklı çözümler için farklı sıralamalar elde edilmekte ve uçakların ilk rotalarından sapma sayıları, gecikme alan uçak sayıları değişiklik göstermektedir. Örnek olarak 9. etkin çözüm için iniş operasyonlarının rota bilgilerinin de olduğu uçakların operasyon tipi bilgilerinin, hedeflenen operasyon zamanlarının, FCFS operasyon zamanlarının, model tarafından atanan operasyon zamanlarının ve sıralamalarının yer aldığı grafik Şekil 5.6’da verilmiştir.



Şekil 5.6. Senaryo 1b dokuzuncu etkin çözüm sonuçları

Zaman penceresinde uçakların enbüyük 180 saniyelik ve 200 saniyelik gecikmelerine izin verildiği Senaryo 1a ve Senaryo 1b için Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.5’de verilmiş olan FCFS prensibine göre iyileşmeler arasında bir kıyas yapmak gerekirse; 200 saniyelik zaman penceresinde toplam yakıt tüketimi ve toplam gecikme değerlerinde daha yüksek oranlarda iyileştirmelerin olduğu görülmektedir. Zaman penceresi genişletildiğinde özellikle iniş uçaklarının gecikmelerden kaynaklı yakıt tüketimi ve toplam yakıt tüketimi açısından daha etkili iyileştirmeler meydana gelmiştir. Bu durumda öncelik tanınan iniş uçağı sayısında artış, gecikmelerinde azalma ve kalkış uçaklarının gecikmelerinden kaynaklanan yakıt tüketimlerinde artış meydana gelmiştir.

Çizelge 5.6’da verildiği gibi tüm çözümlerin ayrıntılı bilgileri tüm çözümler için tek bir dosya halinde elde edilebilmektedir. Çizelgede verilen parametre ve karar değişkenlerinin değerleri Senaryo 1b yedinci etkin çözüme aittir. Bu ayrıntılı bilgilere dayanarak da senaryonun tüm çözümleri arasında ayrıntılı kıyaslama yapılabilmektedir.

Çizelge 5.5. Senaryo 1b yedinci etkin çözüm parametre ve karar değişkenleri değerleri

i	k	o_i	c_i	r_i	s_i	s_i^{faf}	t_i	d_i	t_i^{course}	t_i^{ILS}	t_i^{faf}	d_i^{faf}	t_i^{cda}	t_i^{tma}
1	1	2	2		2.068		2.068	0						
2	2	1	2	4	2.174	1.750,46	2.174	0	1.881,48	1.881,48	1.750,46	0	1.358,94	1.082,78
3	3	1	2	2	2.283	1.859,46	2.283	0	1.990,48	1.954,12	1.974,62	115,16	1.564,31	1.281,61
4	4	2	2		2.382		2.382	0						
5	5	1	2	2	2.442	2.018,46	2.442	0	2.149,48	2.149,48	2.018,46	0	1.571,79	1.405,6
6	7	2	2		2.530		2.612	82						
7	6	1	3	5	2.537	2.125,24	2.537	0	2.244,43	2.244,43	2.125,24	0	1.637,41	1.361,8
8	9	2	2		2.589		2.732	143						
9	10	1	2	4	2.617	2.193,46	2.792	175	2.499,48	2.499,48	2.368,46	0	1.976,94	1.525,78
10	8	2	2		2.648		2.672	24						
11	12	2	2		2.773		2.936	163						
12	11	1	2	3	2.843	2.419,46	2.861	18	2.568,48	2.568,48	2.437,46	0	2.074,09	1.838,13
13	14	2	2		2.885		3.072	187						
14	13	1	2	3	2.997	2.573,46	2.997	0	2.704,48	2.704,48	2.573,46	0	2.210,09	1.992,13
15	15	1	2	1	3.078	2.654,46	3.132	54	2.839,48	2.728,31	2.708,46	0	2.141,37	1.958,84
16	17	2	2		3.292		3.381	89						
17	16	1	2	1	3.306	2.882,46	3.306	0	3.013,48	2.902,31	2.882,46	0	2.315,37	2.001,61
18	18	2	2		3.471		3.471	0						
19	19	1	2	3	3.565	3.141,46	3.565	0	3.272,48	3.272,48	3.141,46	0	2.778,09	2.560,13
20	20	2	3		3.659		3.659	0						

Çizelge 5.5.(Devam) Senaryo 1b yedinci etkin çözüm parametre ve karar değişkenleri değerleri

[illegible]

Senaryo 2

Senaryo 2’de 8 iniş ve 8 kalkış operasyonundan oluşan 16 uçak için çözümler üretilmiştir. Operasyonların tamamlanma zamanı 1434 saniyedir (23.9 dk.). Zaman penceresinde uçakların 180 sn. gecikmesine izin verilmiştir (Senaryo 2a).

Senaryo 2a için ortalama çözüm süresi 143.57 sn. olan iki etkin çözüm elde edilmiştir. Bu çözümlerdeki ve FCFS prensibindeki toplam gecikme, toplam yakıt tüketimleri Çizelge 5.6’ de verilmiştir. FCFS sonuçları ile kıyaslaması yapılan etkin çözümlerin gecikme ve yakıt tüketimi açısından iyileşme oranları, ilk sıralamasından sapan uçak sayısı, ilk sıralamadan toplam sapma sayısı ve gecikme alan iniş-kalkış operasyon sayısı bilgileri Çizelge 5.7’de verilmiştir.

Çizelge 5.6. Senaryo 2a FCFS ve etkin çözümler için gecikme(sn) ve yakıt tüketimleri(kg)

		d	f	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_{arr}	f_{dep}
	FCFS	480,6	4.409,1	631,1	233,7	307,9	1.289,8	332,9	4.359,8	49,3
Etkin	1	352,0	4155,7	913,1	420,7	627,4	550,6	152,0	4.132,8	22,9
	2	373,0	4128,5	863,0	406,1	576,4	550,6	126,7	4.087,1	41,5

Çizelge 5.7. Senaryo 2a için FCFS ile etkin çözümlerin kıyaslanması

% İyileşme							Uçak Sayısı			
Toplam Gecikme	Toplam Yakıt	Giriş İrtifasındaki Yakıt	FAF Dönüş Yakıtı	Geliş Yakıtı	Gidiş Yakıtı		ND	TD	D_{arr}	D_{dep}
1	26,8	5,8	12,6	-21,6	5,2	53,7	5	6	7	5
2	22,4	6,4	15,6	-9,7	6,3	15,9	3	4	7	5

Senaryo 2 için zaman penceresinde 200 sn. uçakların gecikmesine izin verilmesi durumunda (Senaryo 2b), 180 sn. izin verilmesi durumu (Senaryo 2a) ile aynı sonuçlar elde edilmiştir.

Uçakların hedeflenen zamandan önce operasyonlarını gerçekleştirmelerine izin verilmesi pist kapasitesi ve yakıt tüketimi açısından incelenerek yaşanacak olan gelişmeler tartışılabilir. Bu durumda elde edilecek sonuçlar hem FCFS durumu hem de hedeflenen zamandan önce operasyona izin verilmemesi durumu sonuçları ile karşılaştırılabilir. İniş uçaklarının hedeflenen zamandan önce operasyonlarını gerçekleştirmelerine izin verilmesi durumunda, uçakların hedeflenen zamandan önce

atanan operasyon zamanlarına ulaşabilmeleri için hızlanmaları gerekmektedir. Bu da daha fazla yakıt tüketimi anlamına gelirken gecikmeler açısından iyileştirmeler yapılabileceği çıkarımını doğurabilir. Çalışmamızda modele koyulan yakıt tüketim hesaplarında uçakların hızlanması durumu ele alınmamıştır. Uçaklar Bölüm 3.1’de belirtildiği şekilde operasyonlarını gerçekleştirmekte ve Bölüm 3.6’ da verildiği şekilde yakıt tüketim hesaplamaları yapılmaktadır. Kalkış uçakları için yakıt tüketim hesapları gecikmelerden kaynaklanmaktadır. Bu sebeple bu modelde yalnızca iniş uçaklarının hedeflenen zamandan önce operasyonlarını gerçekleştirmelerine izin vererek çözümler üzerindeki etkileri incelenebilir.

Senaryo 2c için sadece iniş uçaklarının hedeflenen zamandan önce operasyonlarını gerçekleştirmeleri durumunda elde edilen sonuçlar Çizelge 5.8’de verildiği gibidir. Bu durumda zaman penceresinde iniş uçaklarının 100 saniyeye kadar hedeflenen zamandan önce operasyonlarını gerçekleştirmelerine izin verilirken hem iniş hem de kalkış operasyonları için hedeflenen zamandan 100 saniye sonrasına kadar operasyonlarını gerçekleştirmelerine izin verilmiştir. Uçakların zaman penceresinde gecikme sürelerinde azaltma yapılmasının sebebi arzu edilen sürelerde çözümlerin elde edilememesidir. Elde edilen çözümler için ortalama çözüm süresi 135 saniyedir.

Çizelge 5.8. Senaryo 2c FCFS ve etkin çözümler için gecikme(sn) ve yakıt tüketimleri(kg)

		d	f	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_{arr}	f_{dep}
	FCFS	480,6	4.409,1	631,1	233,7	307,9	1.289,8	332,9	4.359,8	49,3
Etkin	1	243,6	4205,9	930,3	339,4	536,8	681,3	147,4	4199,4	6,5
	2	285,6	4191,4	872,2	325,9	576,4	699,0	126,7	4164,4	27,0

Çizelge 5.9. Senaryo 2c için FCFS ile etkin çözümlerin kıyaslanması

% İyileşme							Uçak Sayısı			
Toplam Gecikme	Toplam Yakıt	Giriş İrtifasındaki Yakıt	FAF Dönüş Yakıtı	Geliş Yakıtı	Gidiş Yakıtı		ND	TD	D_{arr}	D_{dep}
1	49,31	4,61	9,46	-6,76	3,68	86,92	8	8	5	1
2	40,57	4,94	11,96	-9,71	4,48	45,16	4	4	5	3

Kalkış uçaklarına hedeflenen zamandan önce operasyonlarını gerçekleştirmelerine izin verilmesi durumunda, toplam gecikme açısından daha yüksek oranda iyileşme

olurken, toplam yakıt tüketimi açısından iyileşme oranında düşüş meydana gelmiştir. Bunun sebebi modelin sıralamada kalkış uçaklarına öncelik vermesidir. Çizelge 5.7 ve 5.9'daki iniş ve kalkış operasyonlarının yakıt tüketimlerdeki iyileşme oranlarına bakıldığında da kalkış operasyonlarındaki iyileşme oranındaki artıştan da bu sonuç çıkarılabilir. Buna karşın iniş uçaklarındaki yakıt tüketim iyileşme oranlarında düşüş yaşanmış ve toplamdaki yakıt tüketim iyileşme oranını etkilemiştir.

Senaryo 3

Senaryo 3'de tamamlanma zamanı 1388 sn. (23.13 dk.) olan 16 uçak ele alınmıştır. Zaman penceresinde hedeflenen operasyon zamanından gecikmeye 180 sn. izin verilmiştir (Senaryo 3a). FCFS prensibine göre elde edilen çözüm ile 3 farklı etkin çözüm ayrıntıları Çizelge 5.10'da verilmiştir. Bu çözümlerin FCFS sonuçları ile kıyaslamasının yapıldığı bilgiler Çizelge 5.11'de verilmiştir.

Çizelge 5.10. Senaryo 3a FCFS ve etkin çözümler için gecikme(sn) ve yakıt tüketimleri(kg)

		d	f	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_{arr}	f_{dep}
	FCFS	305	4.344,1	396,8	415,4	444,6	1.121,0	350,1	4.305,4	62,5
Etkin Çözümler	1	290	4336,9	745,0	277,6	479,3	947,0	266,5	4293,0	43,9
	2	305	4228,3	655,8	239,6	479,3	947,0	266,5	4165,8	62,5
	3	436	4196,6	324,3	129,9	479,3	1316,2	266,5	4094,0	102,6

Çizelge 5.11. Senaryo 3a için FCFS ile etkin çözümlerin kıyaslanması

% İyileşme							Uçak Sayısı			
Toplam Gecikme	Toplam Yakıt	Giriş İrtifasındaki Yakıt	FAF Dönüş Yakıtı	Geliş Yakıtı	Gidiş Yakıtı		ND	TD	D_{arr}	D_{dep}
1	4,92	0,17	-1,88	6,14	0,29	29,78	2	2	4	6
2	0,00	2,67	4,70	6,14	3,24	0,00	0	0	4	6
3	-42,95	3,40	8,42	6,14	4,91	-64,36	3	4	3	7

Senaryo 3a'nın etkin çözümleri arasında FCFS sıralamasının olduğu bir çözüm de yer almaktadır. Çizelge 5.11 etkin çözüm 2'ye bakıldığında gecikmelerden kaynaklanan vektör manevrasında iyileştirmelerden dolayı yakıt tüketiminde bir azalma meydana geldiği anlaşılmaktadır. Bu oluşturulan modelin, yakıt tüketimi açısından daha iyi sonuç

elde etmek amacıyla, vektör manevrası karar değişkenlerini eniyileştirmeye çalışıldığının örneğidir. Ayrıca bu senaryoda son yaklaşma hattına dönüş vektör manevrası yakıt tüketimi ile son yaklaşma hattı düz uçuş süresince yakıt tüketimi toplamalarında bir iyileşme olduğu da görülmektedir. Model bu durumda, dönüş yarıçapını daha sınırlı bir şekilde değiştirerek toplamdaki yakıt tüketimini olumlu yönde etkileyecek şekilde yakıt tüketimleri arasında ödünleşme sağlamıştır.

Senaryo 3b’de kalkış uçaklarının zaman penceresinde hedeflenen operasyon zamanından 100 sn. öncesine kadar, iniş ve kalkış uçaklarının hedeflenen operasyon zamanından 150 sn. sonrasına kadar operasyonlarını gerçekleştirmelerine izin verilmiştir. Bu durumda tek bir çözüm elde edilmiştir. Çizelge 5.12’de çözüm ayrıntıları, Çizelge 5.16’da iyileşme oranları, ilk sıralamadan sapma sayıları ve geciken uçak sayıları verilmiştir.

Çizelge 5.12. *Senaryo 3b FCFS ve etkin çözüm için gecikme(sn) ve yakıt tüketimleri(kg)*

		d	f	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_{arr}	f_{dep}
	FCFS	305	4.344,1	396,8	415,4	444,6	1.121,0	350,1	4.305,4	62,5
	1	56,0	4094,6	83,0	367,7	375,6	1411,7	371,2	4186,8	6,2

Çizelge 5.13. *Senaryo 3b için FCFS ile etkin çözümlerin kıyaslanması*

% İyileşme							Uçak Sayısı			
Toplam Gecikme	Toplam Yakıt	Giriş İrtifasındaki Yakıt	FAF Dönüş Yakıtı	Geliş Yakıtı	Gidiş Yakıtı		ND	TD	D_{arr}	D_{dep}
1	81,64	5,74	3,66	6,03	2,75	90,07	6	6	3	2

Senaryo 4

Senaryo 4’de ele alınan 20 uçak için FCFS prensibine göre ve modelden elde edilen etkin çözümlerin ayrıntıları Çizelge 5.14’de, etkin çözümlerdeki iyileşme oranları, ilk rotadan sapan toplam uçak sayısı, ilk rotadan toplam sapma sayısı ve gecikme alan uçak sayıları Çizelge 5.15’de verilmiştir. Etkin çözümler için ortalama çözüm süresi 59.64 saniyedir.

Çizelge 5.14. Senaryo 4 FCFS ve etkin çözümler için gecikme(sn) ve yakıt tüketimleri(kg)

		d	f	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_{arr}	f_{dep}
	FCFS	788,6	5.329,2	745,1	248,7	570,3	1.429,4	357,6	5.218,0	111,2
Etkin Çözümler	1	743,6	5.216,3	914,7	334,6	639,2	1.092,2	266,5	5114,0	102,3
	2	788,6	5.199,4	896,0	327,5	639,2	1.092,2	266,5	5088,2	111,2
	3	963,6	5.291,4	865,0	155,2	847,5	1.266,3	154,4	5155,2	136,2

Çizelge 5.15. Senaryo 4 için FCFS ile etkin çözümlerin kıyaslanması

% İyileşme							Uçak Sayısı			
Toplam Gecikme	Toplam Yakıt	Giriş İrtifasındaki Yakıt	FAF Dönüş Yakıtı	Geliş Yakıtı	Gidiş Yakıtı		ND	TD	D_{arr}	D_{dep}
1	5,7	2,1	3,4	2,4	2,0	8,0	2	2	7	6
2	0,00	2,4	4,4	2,4	2,5	0,00	0	0	7	6
3	-22,2	0,7	5,7	-7,9	1,2	-22,6	4	4	5	6

Çizelge 5.15’deki iyileşme oranlarına bakıldığında gecikmeden ödün verilmesi durumunda yakıt tüketiminde iyileşme oranının artışı olmaktadır. Ancak 3. etkin çözümde gecikmeden ödün verilmesine rağmen toplam yakıt tüketiminde arzu edilen şekilde iyileşme olmamıştır. Bunun sebebi son yaklaşma hattına dönüş hareketi süresince yakıt tüketimi ile son yaklaşma hattı düz uçuş süresince yakıt tüketimi arasındaki ödünleşmedir. Gecikmelerden kaynaklanan yakıt tüketim oranına bakıldığında ise arzu edilen iyileşmenin olduğu görülmektedir. Bu durumda iniş uçaklarına öncelik verilmiş kalkış uçakları daha fazla geciktirilmiş dolayısıyla kalkış uçakları toplam yakıt tüketiminde kötüleşme meydana gelmiştir.

Senaryo 5

Senaryo 5’de 11 tane iniş ve 11 tane kalkış operasyonu bulunmaktadır. Zaman penceresinde uçakların 180 sn. gecikmelerine izin verilmesi (Senaryo 5a) durumunda elde edilen çözümler arzu edilen sürede gerçekleşmemiştir. 208 saniyede (~3.5 dk.) elde edilen FCFS çözümleri Çizelge 5.16’da paylaşılmıştır. Senaryonun çözümünün her iki amaç için ayrı ayrı eniyilenmesi durumunda elde edilen sonuçlar Çizelge 5.17’de paylaşılmıştır. Gecikmenin enküçüklenmesi durumunda 401 saniyede (~6.5 dk.), yakıt tüketiminin enküçüklenmesi durumunda 5118 saniyede (~85 dk.) çözümler elde

edilmiştir. FCFS sonuçları ile ayrı ayrı amaçlar için elde edilen sonuçları kıyaslanmış ve iyileşme oranları, ilk sıralamadan sapma sayıları ve gecikme alan uçak sayıları Çizelge 5.18’de verilmiştir.

Çizelge 5.16. Senaryo 5 için FCFS prensibi yakıt tüketim(kg) ve gecikme(sn.) sonuçları

d	f	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_{arr}	f_{dep}	D_{arr}	D_{dep}
1.015,0	7.458,5	624,1	952,2	875,1	1.853,6	462,7	7.286,2	151,3	4	7

Çizelge 5.17. Senaryo 5a ayrı amaçların gecikme(sn) ve yakıt tüketimleri(kg)

	d	f	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_{arr}	f_{dep}
$\sum_i d_i$	972,0	7.476,1	780,2	925,9	572,8	1.912,3	637,6	7.347,6	128,5
$\sum_i f_i$	1.120,0	7.072,8	1.153,0	535,7	1.246,4	1.293,1	126,7	6.873,4	199,4

Çizelge 5.18. Senaryo 5a için FCFS ile ayrı amaçların çözümlerinin kıyaslanması

% İyileşme							Uçak Sayısı			
	Toplam Gecikme	Toplam Yakıt	Giriş İrtifasındaki Yakıt	FAF Dönüş Yakıtı	Geliş Yakıtı	Gidiş Yakıtı	ND	TD	D_{arr}	D_{dep}
$\sum_i d_i$	4,2	-0,5	-5,5	9,5	-0,8	15,1	6	6	6	5
$\sum_i f_i$	-10,3	4,9	13,1	-2,6	5,7	-31,8	4	4	2	7

Tüm senaryolar için elde edilmiş olan etkin çözümler incelendiğinde, gecikmenin enküçüklenmesi amacının ağır bastığı çözümlerde gecikme alan iniş uçağı sayısında artış meydana gelirken, yakıt tüketiminin enküçüklenmesi amacının ağır bastığı çözümlerde gecikme alan kalkış uçağı sayısında artış meydana gelmektedir. Çizelge 5.18’ de yer alan ayrı ayrı amaç fonksiyonları için verilmiş olan Senaryo 5a’nın çözümlerinden bu daha net anlaşılabilmektedir. Gecikmenin enküçüklenmesi dolayısıyla pist kapasitesinde pozitif yönde değişim olurken, yakıtın enküçüklenmesi durumunda negatif yönde değişimler olabilmektedir. Ancak her iki amaç fonksiyonu da ε -kısıt yöntemi ile bir araya getirilerek gecikme ve yakıt tüketimi ödünleşmesi için farklı etkin çözümler elde edilmektedir.

Senaryo 5b’de zaman penceresinde 10 saniyelik küçültmeye gidilerek ortalama 201.57 saniyede etkin çözümler elde edilmiştir (Çizelge 5.19). Etkin çözümlerin FCFS sonuçları ile kıyaslamaları Çizelge 5.20’ de verilmiştir.

Çizelge 5.19. *Senaryo 5b FCFS ve etkin çözümler için gecikme(sn) ve yakıt tüketimleri(kg)*

	d	f	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_{arr}	f_{dep}
1	975,0	7.176,5	1383,9	499,3	1.246,4	1.289,9	126,7	7.064,6	112,8
2	979,0	7.157,1	1438,4	538,6	1.246,4	1.158,9	126,7	7.027,3	129,7
3	1.0030	7.076,5	991,3	388,1	1.246,4	1.657,0	126,7	6.927,9	150,3

Çizelge 5.20. *Senaryo 5b için FCFS ile etkin çözümlerin kıyaslanması*

% İyileşme							Uçak Sayısı			
	Toplam Gecikme	Toplam Yakıt	Giriş İrtifasındaki Yakıt	FAF Dönüş Yakıtı	Geliş Yakıtı	Gidiş Yakıtı	ND	TD	D_{arr}	D_{dep}
1	3,9	3,5	7,5	-2,6	3,0	25,4	6	6	5	6
2	3,6	3,8	8,6	-2,6	3,6	14,3	2	2	4	7
3	1,2	4,9	11,5	-2,6	4,9	0,7	4	4	3	7

6. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Çalışmada iniş ve kalkış karma operasyonları için hem hava ve yerdeki toplam gecikmenin hem de toplam yakıt tüketiminin enküçüklendiği gerçekçi çok amaçlı yaklaşıma sahip bir sıralama modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen çok amaçlı matematiksel model kullanılarak çelişen bu iki amaç bir araya getirilmiş ve farklı etkin çözümler elde edilmiştir. Model havayolları ve havaalanı işletmeleri/hava seyrüsefer servis sağlayıcısı (ANSP) gibi farklı paydaşların ilgisine odaklanmanın yanı sıra gelişmiş havaalanı operasyonları için mevcuttaki ve gelişmekte olan otomasyon ve karar destek sistemlerini destekleyici kabiliyete sahiptir.

Literatürde bulunan çalışmalardan farklı olarak gerçek dünya probleminin daha doğru bir şekilde temsil edilmesini sağlamak amacıyla hava hızı, irtifa, yatış açısı ve uçağın aerodinamik özelliklerine bağlı yakıt maliyet fonksiyonu içeren bir model sunulmuştur. Çalışma kapsamında tanımlanan vektör manevraları ile de gerçeklik oranı daha da artırılmıştır. Ağırlıklı toplam yönteminde gerçek dünya probleminin doğru bir şekilde temsil edilmesini sağlamak için kullanıcı tarafından verilen ağırlıkların, pareto-eniyi cephede doğru çözümü elde etmek için büyük özenle seçilmesi gerekliliği ve dışbükey olmayan çözüm kümeleri için eniyi çözümleri garanti edememesinden dolayı amaç fonksiyonları ε -kısıt yöntemi ile bir araya getirilmişlerdir.

Sonuç olarak operasyonlarla ilgili karar alma süreçlerinde işletmeciler, planlamacılar ve kural koyucular için doğru sonuçlar sağlamak amacıyla paydaşların çelişen amaçlarını olabildiğince gerçekçi temsil eden, uçak performansı gibi operasyonel faktörleri hesaba katan çok amaçlı doğrusal olmayan bir eniyileme modeli geliştirilmiştir.

Çalışmada oluşturulan çok amaçlı matematiksel model 5 farklı senaryo için test edilmiştir. Bu senaryolar farklı zaman pencereleri için kendi içerisinde de test edilmişlerdir. Elde edilen tüm çözümlerden bastırılmış çözümler elenerek etkin çözümler paylaşılmıştır. Çözüm süresi olarak her bir etkin çözümün ortalama çözüm süresi verilmiştir.

Senaryoların sonuçları incelendiğinde farklı etkin çözümler birbiriyle karşılaştırıldığında amaç fonksiyonları arasında meydana gelen ödünleşme açık bir şekilde görülebilmektedir. Toplam gecikme ve toplam yakıt tüketimi amaçları için iniş ve kalkış operasyonlarının sıralamalarında meydana gelen değişimler de paylaşılmıştır. Toplam yakıt tüketiminde iyileşme oranı arttıkça iniş operasyonlarına öncelik verildiği ve dolayısıyla iniş operasyonlarının yakıt tüketimi iyileşme oranlarında artış meydana

geldiği, kalkış operasyonlarının geciktirilerek yakıt tüketimlerinden ödün verildiği görülmüştür. Ters durum düşünüldüğünde ise toplam gecikmede iyileşme oranı arttıkça kalkış operasyonlarına öncelik verilmiş ve kalkış operasyonlarının yakıt tüketiminde iyileşme oranı arttıkça iniş operasyonlarının yakıt tüketiminden ödün verilmiştir.

İniş ve kalkış operasyonlarının toplam yakıt tüketim değerlerinin yanında gecikmelerden kaynaklı yakıt tüketim değerleri ve son yaklaşma hattına dönüş yakıt tüketim değerleri ayrı ayrı gösterilerek iyileşme oranlarındaki farklılıklar ortaya konulmuştur. Gecikmelerden kaynaklı yakıt tüketim oranlarındaki iyileşme oranları toplam yakıt tüketimi iyileşme oranlarına göre daha yüksek olmuştur. Modelin çözümlerinde son yaklaşma hattına dönüş vektör manevrası ile son yaklaşma hattı düz uçuş mesafesi arasında bir ödünleşme meydana gelmiştir. Bu sebeple buralarda harcanan yakıt tüketimlerinde iyileşme olduğu gibi kötüleşmeler de meydana gelmiştir. Bu da toplam yakıt tüketimindeki iyileşme oranlarını etkilemiştir. Etkin çözümler arasında FCFS sıralamasının olduğu çözümlerde toplam yakıt tüketimini olumlu yönde etkileyecek şekilde vektör manevrası değişkenlerine karar verildiği görülmüştür.

Çalışmada farklı zaman pencereleri kullanılarak çözümler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Uçakların hedeflenen operasyon zamanından önce inişlerine izin verilmeden zaman penceresinin genişletilmesi durumunda toplam yakıt tüketimi ve toplam gecikme değerlerinde daha yüksek oranlarda iyileştirmelerin olduğu görülmüştür. Zaman penceresi genişletildiğinde özellikle iniş uçaklarının gecikmelerden kaynaklı yakıt tüketimi ve toplam yakıt tüketimi açısından daha etkili iyileştirmeler meydana gelmiştir. Bu durumda öncelik tanınan iniş uçağı sayısında artış, gecikmelerinde azalma ve kalkış uçaklarının gecikmelerinden kaynaklanan yakıt tüketimlerinde artış meydana gelmiştir. Zaman penceresinde sadece kalkış uçaklarının hedeflenen operasyon zamanından önce operasyonlarını gerçekleştirmelerine izin verilmesi durumunda, toplam gecikme açısından daha yüksek oranda iyileşme olurken, toplam yakıt tüketimi açısından iyileşme oranında düşüş meydana gelmiştir. Bunun sebebi iniş uçaklarının havada uçuş sürelerinin artması nedeni ile daha fazla yakıt tüketmeleridir.

Çalışmanın bundan sonraki aşamasında ele alınan operasyon aralığının daha da genişletilerek daha fazla uçak için sonuçların elde edilmesi amaçlanmaktadır. Zaman penceresinde yapılan genişletmenin artırılması ile sıralamada geliştirmelerin yapılması planlanmaktadır. Bunları başarmak için çözüm süresinde iyileştirmeler sağlayabilecek çok amaçlı sezgisel/meta-sezgisel algoritmalar geliştirilecektir. Zaman penceresini

genişletildiğinde sıralamada sınırlı sayıda yer değiştirmeye izin verilmesi bakımından CPS kısıtlarına da yer verilebilir. Vektör manevralarında eş zamanlı hız ve irtifa değişimlerine de izin verilebileceği gibi dönerek alçalma hareketi de yer verilebilir. Ayrıca TMA içerisinde farklı geliş rota konfigürasyonları ve birden fazla pist için de çalışmanın genişletilmesi planlanmaktadır.

KAYNAKÇA

- [1] ICAO. (2016). 2016-2030 Global Air Navigation Plan. *Doc 9750-AN/963 Beşinci Baskı*. Montréal, Canada.
- [2] DHMİ. (2019). Türkiye Geneli Havalimanları Uçak, Yolcu ve Yük Trafığı İstatistikleri ve Tahminleri. <https://www.dhmi.gov.tr/sayfalar/istatistik.aspx>., 19 Nisan 2019.
- [3] ICAO. (2017). State of Global Air Transport and ICAO Forecasts for Effective Planning. *Economic Development Air Transport Bureau*. Montréal, Canada.
- [4] Airbus. (2015). Global Market Forecast 2015-2034. John Leahy.
- [5] SESAR. (2015). European ATM Master Plan: The Roadmap for Delivering High Performing Aviation for Europe. *Executive View*.
- [6] EUROCONTROL. (1997). *TOSCA-II Work Package 7 Airport Capacity Enhancement Interim Report*. EUROCONTROL Reports.
- [7] Lieder, A., Briskorn, D., & Stolletz, R. (2015). A dynamic programming approach for the aircraft landing problem with aircraft classes. *European Journal of Operational Research*, 61-69.
- [8] Hong, Y., Choi, B., Lee, S., Lee, K., & Kim, Y. (2017). Optimal and practical aircraft sequencing and scheduling for point merge system. *IFAC (International Federation of Automatic Control)* (s. 14644–14649). Berlin: Elsevier.
- [9] Zuniga, C., Delahaye, D., & Piera, M. A. (2011). Integrating and sequencing flows in terminal maneuvering area by evolutionary algorithms. *30th Digital Avionics Systems Conference* (s. 1-11). Seattle United States: IEEE.
- [10] Hu, X. B., & Chen, W. H. (2005). Receding horizon control for aircraft arrival sequencing and scheduling. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 189-197.
- [11] Beasley, J. E., Krishnamoorthy, M., Sharaiha, Y. M., & Abramson, D. A. (2000). Scheduling aircraft landings - The static case. *Transportation Science*.
- [12] Kwasiborska, A. (2017). Sequencing landing aircraft process to minimize schedule length. *International Conference on Air Transport – INAIR* (s. 111-116). Prague: Elsevier Procedia.

- [13] Lee, H., & Balakrishnan, H. (2008). Fuel cost, delay and throughput tradeoffs in runway scheduling. *2008 American Control Conference* (s. 2449-2454). Westin Seattle Hotel, Seattle, Washington, USA: IEEE.
- [14] Hu, X. B., & Paolo, E. D. (2008). Binary-representation-based genetic algorithm for aircraft arrival sequencing and scheduling. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 301-310.
- [15] Briskorn, D., & Stolletz, R. (2014). Aircraft landing problems with aircraft classes. *Journal of Scheduling*, 31-45.
- [16] Vadlamani, S., & Hosseini, S. (2014). A novel heuristic approach for solving aircraft landing problem with single runway. *Journal of Air Transport Management*, 144-148.
- [17] Bennell, J. A., Mesgarpour, M., & Potts, C. N. (2017). Dynamic scheduling of aircraft landings. *European Journal of Operational Research*, 315-327.
- [18] Gupta, G., Malik, W., & Jung, Y. C. (2009). A mixed integer linear program for airport departure scheduling. *9th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO)*. Hilton Head, South Carolina: AIAA.
- [19] Farhadi, F., Ghoniem, A., & Al-Salem, M. (2014). Runway capacity management – An empirical study with application to Doha International Airport. *Transportation Research Part E*, 53-63.
- [20] Desai, J., & Prakash, R. (2016). An optimization framework for terminal sequencing and scheduling: The single runway case. *Advances in Intelligent Systems and Computing* (s. 195-207). Singapore: Springer, Cham.
- [21] Hancerliogullari, G., Rabadi, G., Al-Salem, A. H., & Kharbeche, M. (2013). Greedy algorithms and metaheuristics for a multiple runway combined arrival-departure aircraft sequencing problem. *Journal of Air Transport Management*, 39-48.
- [22] Lieder, A., & Stolletz, R. (2016). Scheduling aircraft take-offs and landings on interdependent and heterogeneous runways. *Transportation Research Part E*, 167-188.
- [23] Balakrishnan, H., & Chandran, B. G. (2010). Algorithms for scheduling runway operations under constrained position shifting. *Operations Research*, 1650–1665.

- [24] Bianco, L., Nicoletti, B., & Ricciardelli, S. (1977). An algorithm for optimal sequencing aircraft in the near terminal area. *8th IFIP Conference on Optimization Techniques* (s. 443-453). Würzburg: Springer, Berlin, Heidelberg.
- [25] Sölveling, G., & Clarke, J. P. (2014). Scheduling of airport runway operations using stochastic branch and bound methods. *Transportation Research Part C*, 119-137.
- [26] Sölveling, G., Solak, S., Clarke, J. P., & Johnson, E. (2011). Runway operations optimization in the presence of uncertainties. *Journal of guidance, control, and dynamics*, 1373-1382.
- [27] Rodríguez-Díaz, A., Adenso-Díaz, B., & González-Torre, P. L. (2017). Minimizing deviation from scheduled times in a single mixed-operation runway. *Computers & Operations Research*, 193-202.
- [28] Al-Salem, A., Farhadi, F., Kharbeche, M., & Ghoniem, A. (2012). Multiple-runway aircraft sequencing problems using mixed-integer programming. *Industrial and Systems Engineering Research Conference* (s. 1-8). United States, Norcross: Institute of Industrial and Systems Engineers (IISE).
- [29] Heidt, A., Helmke, H., Liers, F., & Martin, A. (2014). Robust runway scheduling using a time-indexed model. *Fourth SESAR Innovation Days* (s. 1-8). EUROCONTROL.
- [30] Samà, M., D'Ariano, A., & Pacciarelli, D. (2013). Rolling horizon approach for aircraft scheduling in the terminal control area of busy airports. *Transportation Research Part E*, 140-155.
- [31] Samà, M., D'Ariano, A., D'Ariano, P., & Pacciarelli, D. (2014). Optimal aircraft scheduling and routing at a terminal control area during disturbances. *Transportation Research Part C*, 61-85.
- [32] Samà, M., D'Ariano, A., D'Ariano, P., & Pacciarelli, D. (2015). Air traffic optimization models for aircraft delay and travel time minimization in terminal control areas. *Public Transport: Planning and Operations*, 321-337.
- [33] Bennell, J. A., Mesgarpour, M., & Potts, C. N. (2011). Airport runway scheduling. *Quarterly Journal of Operations Research*, 115-138.

- [34] Rocha Murça, M. C., & Müller, C. (2015). Control-based optimization approach for aircraft scheduling in a terminal area with alternative arrival routes. *Transportation Research Part E*, 96-113.
- [35] Ehrgott, M. (2005). *Multi-criteria optimization*. Berlin: Springer.
- [36] Vela, A., Solak, S., Singhose, W., & Clarke, J.-P. (2009). A mixed integer program for flight-level assignment and speed control for conflict resolution. *Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference* (s. 5219-5226). Shanghai, P.R. China: IEEE.
- [37] Çeçen, R. K., & Çetek, C. (2019). A two-step approach for airborne delay minimization using pretactical conflict resolution in free-route airspace. *Journal of Advanced Transportation*.
- [38] Eurocontrol. (2013). User Manuel for the Base of Aircraft Data (BADA). Rev. 3.11. Brétigny-sur-Orge Cedex, France: Eurocontrol.
- [39] ICAO. (2018, 05). *ICAO Engine Exhaust Emissions Data Bank*. EASA-European Union Aviation Safety Agency: <https://www.easa.europa.eu/>
- [40] EUROCONTROL. *OneSky Online*. <https://ext.eurocontrol.int/>
- [41] GPS Visualizer. *Google Earth KML*. <http://www.gpsvisualizer.com/>
- [42] ICAO. (2016). Doc 4444, Procedures for Air Navigation Services, *Air Traffic Management*, Sixteenth Edition.
- [43] DHMİ. (2019). AIP, *Aeronautical Information Publication Turkey*, Devlet Hava Meydanları Genel Müdürlüğü, Ankara, 28 Şubat 2019.