

**TAKTİK HAVA TRAFİK AKIŞ VE KAPASİTE
YÖNETİMİ İÇİN BİR OPTİMİZASYON MODELİ**

Metin ÖZGÜR

Doktora Tezi

Sivil Havacılık Anabilim Dalı

Şubat- 2013

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Metin Özgür'ün “**Taktik Hava Trafik Akış ve Kapasite Yönetimi için Bir Optimizasyon Modeli**” başlıklı **Sivil Havacılık** Anabilim Dalındaki, Doktora Tezi 01.02.2013 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Prof. Dr. AYDAN CAVCAR	
Üye	: Prof. Dr. SERKAN ÖZGEN	
Üye	: Doç. Dr. NİHAL ERGİNEL	
Üye	: Yard. Doç. Dr. CEM ÇETEK	
Üye	: Yard. Doç. Dr. ERTAN ÇINAR	

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

ÖZET

Doktora Tezi

TAKTİK HAVA TRAFİK AKIŞ VE KAPASİTE YÖNETİMİ İÇİN BİR OPTİMİZASYON MODELİ

Metin ÖZGÜR

**Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Sivil Havacılık Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Aydan CAVCAR
2013, 86 Sayfa**

Bu çalışmada taktik hava trafik akış ve kapasite yönetimi için bir optimizasyon modeli önerilmiştir. Çalışmada kullanılan model, uçak çatışmalarını önlemek ve aşırı talepten dolayı havaalanı kapasitelerinin aşılmasını engellemek için uçak kalkış zamanlarını düzenlemektedir. Çatışma ölçütü olarak hava trafik kontrol prosedürel ayırma minimalalarının kullanılması modeli özgün kılmalıdır. Model örnek bir hava sahası, havaalanı kapasiteleri ve uçuş planlarından oluşan senaryo üzerinden test edilip, bir matematiksel modelleme ve optimizasyon yazılımı kullanılarak çözülmüştür. Bu çalışmadaki modelin aksine, çatışmaların uçakların kalkışından önceki planlama aşamasında önlenmediği durumlarda, daha riskli ve maliyetli olan hava trafik kontrol önlemlerine duyulan gereksinimin ne kadar artacağı, model çözüm sonuçlarından elde edilen gecikme sürelerinden anlaşılmaktadır. Akışlar planlanırken standart prosedürel ayırma minimalalarına dayalı çatışmaların dikkate alınması ve uçakların yerde bekletildiği standart ATFCM stratejisinin tercih edilmesi, modelin güncel ATFCM sistemine uyarlanmasını kolaylaştıran unsurlardır. Geliştirilen bu model, özellikle gözetim sistemi olmayan hava sahalarındaki hava trafik akışlarının planlanması için uygun görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Hava Trafik Akış Yönetimi, Prosedürel Ayırma, Çatışma
Önleme, Matematiksel Modelleme, Tamsayılı
Programlama, Optimizasyon

ABSTRACT

PhD Dissertation

AN OPTIMIZATION MODEL FOR TACTICAL AIR TRAFFIC FLOW AND CAPACITY MANAGEMENT

Metin ÖZGÜR

**Anadolu University
Graduate School of Sciences
Civil Aviation Program**

**Supervisor: Prof. Dr. Aydan CAVCAR
2013, 86 Pages**

This study presents an optimization model for tactical air traffic flow and capacity management. The model used in this study arranges departure times of aircraft so as to avoid aircraft conflicts and to prevent capacity shortfalls at the airports due to excess demand. Setting air traffic control procedural separation minimas enables this study to be original. The model was tested on a scenario, which consists of an airspace sector, airport capacities and flight plans, and solved by a mathematical modeling and optimization software. Unlike this model, in case conflicts are not avoided on the planning phase -before aircraft departure, how much the requirement of riskier and costlier air traffic control measures would increase can be easily inferred from the solution results which demonstrate delay times. Considering standard conflict criterions based on procedural separation minimas and preferring standard ATFCM strategy based on ground delay of aircraft in the planning of flows, are the factors which make it easier to adapt the model to current ATFCM system. The model designed in the study seems to be appropriate for use in the airspace sectors especially without surveillance system.

Keywords: Air Traffic Flow Management, Procedural Separation, Conflict Avoidance, Mathematical Modeling, Integer Programming, Optimization

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
KISALTMALAR DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
1.1. Hava Trafik Akış Yönetimi	2
1.1.1. Avrupa’da hava trafik akış yönetimi	3
1.1.2. A.B.D’de hava trafik akış yönetimi	5
1.1.3. Avrupa ve A.B.D’de hava trafik akış yönetiminin karşılaştırılması	8
1.2. Hava Trafik Yönetim Sistemindeki Problemler	8
1.3. Matematiksel Modelleme ve Optimizasyon	11
1.3.1. Matematiksel modelleme	12
1.3.2. Doğrusal programlama	13
1.3.3. Tamsayıli programlama	13
2. HAVA TRAFİK AKIŞ YÖNETİMİNDE MATEMATİKSEL MODELLEME ÇALIŞMALARI	16
2.1. Bekletme Çözümü Sunan Modeller	18
2.1.1. Tek iniş havaalanı içeren modeller	19
2.1.2. Birden fazla iniş havaalanı içeren modeller	24
2.1.3. Hava sahası kapasitesini içeren modeller	25
2.2. Rota Değişikliği Çözümü Sunan Modeller	26

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.3. Hız Değişikliği Çözümü Sunan Modeller	30
2.4. Uçuş Seviyesi Değişikliği Çözümü Sunan Modeller	32
2.5. Ölçüm Çözümü Sunan Modeller	33
2.6. Çatışma Önleme Çözümü Sunan Modeller	35
3. YERDE BEKLETME ÇÖZÜMÜ SUNARAK ÇATIŞMALARI ÖNLEYEN OPTİMİZASYON MODELİ	40
3.1. Girdiler	42
3.1.1. Hava sahası girdileri	42
3.1.2. Kapasite girdileri	44
3.1.3. Talep girdileri	44
3.1.4. Ayırma minimaları girdileri.....	45
3.1.5. Maliyet girdileri	49
3.2. Çıktılar	49
3.3. Varsayımlar	49
3.4. Karar Değişkenleri	51
3.5. Kısıtlar	51
3.6. Amaç Fonksiyonu	53
3.7. Modelin Formülasyonu	53
3.8. Örnek Hava Sahası ve Senaryo	57
3.9. Model Çözüm Sonuçları Analizi	65
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	72
KAYNAKLAR	79

ŞEKİLLER DİZİNİ

1.1. Yol ile ilişkili ATFCM gecikme nedenlerinin yüzdeleri.....	10
3.1. Aynı rotayı kullanan uçakların mesafe esasına dayalı olarak uzunlamasına ayrılması	46
3.2. Kesişen rotaları kullanan uçakların mesafe esasına dayalı olarak uzunlamasına ayrılması	47
3.3. Yanlamasına ayırma 1: uçaklar görsel olarak veya seyrüsefer yardımcılarından referansla belirlenmiş olan farklı coğrafi noktalarda olduklarında	48
3.4. Yanlamasına ayırma 2: uçaklar aynı VOR'ı kullandıklarında	48
3.5. Örnek hava sahası ve yol ağı	58
3.6. Uçuş rotalarının yönlerine göre trafik dağılımı	63
3.7. Rotaların gerektirebilecekleri ayırma türüne trafik dağılımı	64
3.8. Hava alanları toplam iniş ve kalkış talepleri	64
3.9. Modellerin çözüm sonuçları	66

ÇİZELGELER DİZİNİ

1.1. ATFCM'in ECAC hava sahasındaki uçuşlar üzerindeki etkileri	10
1.2. Uzun vadeli IFR trafik rahmini	11
3.1. Ayrıklar (yollar) ve uzunlukları	59
3.2. Rotalar	60
3.3. Havaalanları kalkış kapasiteleri	60
3.4. Havaalanları varış kapasiteleri	61
3.5. Uçuş planları	62
3.6. Talep zaman aralığı	64
3.7. Modeller	65
3.8. Model 1 çözüm sonuçları	68
3.9. Model 1 çözüm sonuçları: uçak sayıları	69
3.10. Model 1 çözüm sonuçları: bekleme süreleri	69
3.11. Model 1 çözüm sonuçları: planlanan ve hesaplanan zaman aralıkları	70
3.12. Model 1 çözüm sonuçları: süreler	70

KISALTMALAR DİZİNİ

A.B.D	: Amerika Birleşik Devletleri
ARTCC	: Hava Rotası Trafik Kontrol Merkezleri
ATC	: Hava Trafik Kontrol
ATFCM	: Hava Trafik Akış ve Kapasite Yönetimi
ATFM	: Hava Trafik Akış Yönetimi
ATCSCC	: Hava Trafik Kontrol Sistemi Komuta Merkezi
CDM	: Ortaklaşa Karar Verme
CFMU	: Merkezi Akış Yönetim Birimi
CTAS	: Merkezi Terminal Radar Kontrol Otomasyon Sistemi
DME	: Mesafe Ölçme Cihazı
ECAC	: Avrupa Sivil Havacılık Konferansı
FCFS	: İlk Gelene İlk Hizmet
EUROCONTROL	: Hava Seyrüseferinin Emniyeti için Avrupa Organizasyonu
FAA	: Federal Havacılık Otoritesi
FSFS	: İlk Tarifeye İlk Hizmet
GDP	: Yer Bekleme Programı
ICAO	: Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatı
IFR	: Aletli Uçuş Kuralları
MFT	: Zaman Esasına Dayalı Ölçüm
MIT	: Mesafe Esasına Dayalı Ölçüm
SESA	: Tek Hava Sahası Hava Trafik Yönetim Araştırması
TMA	: Trafik Yönetim Aracı
TRACON	: Terminal Radar Yaklaşma Kontrol
VOR	: VHF Çok Yönlü Radyo Menzili

1. GİRİŞ

Hava trafik yönetim sistemi girdileri hava sahası, havaalanı, uçak, teknik donanım, yazılım ve insan olan, çıktısı ise hava trafik akışından oluşan karmaşık bir insan-makine sistemidir. Sistemin süreci ise hava sahası yönetimi, hava trafik akış yönetimi ve hava trafik hizmetleri gibi farklı bağlamlarda gerçekleştirilen hava trafik yönetim faaliyetleridir. Bu sistemin performansı emniyet, etkinlik ve verimlilik gibi birçok ölçüte göre değerlendirilebilir. Uçakların birbirlerine çarpışma riski doğuracak şekilde belirli sınırların altında yaklaşması durumu olan uçak çatışmaları, hava trafik yönetim sisteminin emniyetini etkileyen en önemli problemlerdendir. Sisteme olan talebin karşılanması, yani hava trafik akışlarının temin edilmesi ise etkinlik ölçütünü belirlemektedir. Hava trafik akışlarının en az gecikmeyle gerçekleştirilmesi ise sistemin verimliliğinin bir göstergesidir.

Hava trafik sisteminin herhangi bir elemanında oluşan sorunlar nedeniyle ve talebin kapasiteyi aşması neticesinde gecikmeler meydana gelmekte, bu gecikmeler ise hava yolu firmalarına maliyet artışı getirmektedir. Hava trafik akış yönetimi bağlamında çözülmeye çalışılan talep ve kapasite probleminde başarı oranı düştükçe sistemde tıkanıklıklar artmaktadır. Bu tıkanıklıkların çözümü için ise hava trafik kontrol bağlamındaki hava trafik yönetim müdahalelerine olan ihtiyaç artmaktadır. Hava trafik kontrol hizmetlerinde planlama ve uygulama faaliyetlerinin ise çok kısa sürede yapılması gerektiğinden, aşırı iş yükü doğmakta ve bu da insan hatalarına zemin hazırlamaktadır. İnsan hataları ise uçak çatışmaları ve kazalar gibi çeşitli seviyelerde emniyet sorunlarına neden olmaktadır.

Sistemdeki problemlerin çözümünde hava trafik yönetiminin herhangi bir seviyesinde yürütülecek olan her türlü planlama, araştırma ve geliştirme faaliyetleri tüm hava trafik yönetim sisteminde performans artışı getirecektir. Bu çalışmayla sistemdeki emniyet, etkinlik, gecikme ve maliyet problemlerini hava trafik akış yönetimi bağlamında, matematiksel modelleme yaklaşımıyla azaltmak amaçlanmıştır. Hava trafik yönetim sisteminde hava trafik akış yönetimi ve hava trafik kontrol hizmetleri arasındaki boşluğu dolduracak şekilde, her ikisinin de işlevlerini içeren bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Güncel hayatta hava trafik kontrolde kullanılan ayırma prosedürlerinin hava trafik akış yönetimi

safhasında ele alınması sayesinde her iki sistemin de performansında artış olması beklenmektedir. Model, çatışma koşullarının prosedürel ayırma minimalarına göre tanımlanması nedeniyle gözetim sistemi kullanılamayan hava sahalarındaki hava trafik akışlarının planlanması için uygun görünmektedir.

Geliştirilen bu model incelenmeden önce hava trafik akış yönetimi, hava trafik yönetim sistemindeki problemler ve bu problemlerin çözümü için geliştirilmiş olan optimizasyon modelleri hakkında ayrıntılı bilgilere yer verilmektedir.

1.1. Hava Trafik Akış Yönetimi

Hava Trafik Akış Yönetimi (ATFM-Air Traffic Flow Management), Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatı'nın (ICAO-International Civil Aviation Organization) Procedures for Air Navigation Services: Air Traffic Management isimli 4444 numaralı dokümanında [1];

“Hava trafik kontrol kapasitesinin maksimum ölçüde kullanımını ve trafik yoğunluğunun ilgili hava trafik hizmetleri otoritesi tarafından yayınlanan kapasitelere uyumlu olmasını temin ederek, hava trafik akışının emniyetli, düzenli ve hızlı şekilde gerçekleşmesine katkıda bulunmak amacıyla verilen bir hizmettir” şeklinde tanımlanmıştır.

Hava trafik akış yönetimi Avrupa'da ve Amerika Birleşik Devletleri'nde (A.B.D) farklı şekilde uygulanmaktadır. Avrupa'da Merkezi Akış Yönetim Birimi (CFMU-Central Flow Management Unit) tarafından gerçekleştirilen işlemler A.B.D'de Federal Havacılık Otoritesi'ne (FAA- Federal Aviation Administration) bağlı Hava Trafik Kontrol Sistemi Komuta Merkezi (ATCSCC- Air Traffic Control System Command Center) tarafından yürütülmektedir. Her iki uygulama da bu bölümde anlatılacaktır. Uygulamalardaki farklılıklar Leal de Matos ve Powel'in [2] çalışmasından özetle sunulmuştur.

1.1.1. Avrupa’da hava trafik akış yönetimi

Avrupa’da ATFM daha kapsamlı bir isimlendirmeyeyle Hava Trafik Akış ve Kapasite Yönetimi (ATFCM-Air Traffic Flow and Capacity Management) olarak ele alınmaktadır. ATFCM hava trafik yönetim sisteminin hizmet kalitesini ve performansını arttırmak için mevcut kaynakların uygun kullanımı ve gereksinimleri karşılayacak yeterli yanıtların koordinasyonu yoluyla talep ve kapasite dengesini sağlamak amacıyla ATFM’i geliştiren bir hizmettir [3]. Bu hizmet Avrupa Sivil Havacılık Konferansı (ECAC-European Civil Aviation Conference) hava sahasındaki ülkeler adına Brüksel’de bulunan CFMU tarafından gerçekleştirilmektedir.

Avrupa’daki ATFM’in yapısı, ATFCM Operations ATFCM Users Manual’de [4] detaylı olarak verilmiştir. ATFCM, CFMU’nun Ağ Operasyonları Birimi tarafından dört aşamada gerçekleştirilmektedir. Bu aşamalar aşağıda sırasıyla verilmiştir [4];

1. Stratejik Akış Yönetimi: Uçuş gününden 7 gün veya daha öncesinden (aylar öncesinden) başlayan ve araştırma, planlama ve koordinasyon faaliyetlerinin yapıldığı aşamadır. Bu aşamada EUROCONTROL’un birçok ünitesi Hava Trafik Yönetiminde yer alan ortaklarla (seyrüsefer hizmet sağlayıcıları, havaalanları, hava sahası kullanıcıları ve askeri seyrüsefer hizmet sağlayıcıları) işbirliği içinde çalışır. Bu aşamanın çıktısı Ağ Operasyon Planı’dır. Ağ Operasyon Planı, sezonluk, aylık, haftalık ve günlük tıkanıklık tahminlerini ve bunları çözecek ATFCM ve Hava Sahası Yönetimi önlemlerini gösteren trafik talep ve kapasite planlarını içeren bir dokümandır.
2. Ön-Taktik Akış Yönetimi: Uçuştan 6 gün öncesinden başlayıp uçuş gününe kadar süren bu aşamada, planlama ve koordinasyon faaliyetleri gerçekleştirilmektedir. Bu aşamada mevcut kapasite kaynaklarının yönetilmesi için, en iyi yöntemin ve uygun olan çeşitli ATFCM önlemlerinin uygulanma gereksinim analizi yapılır ve uygulanma kararı verilir. Bu aşamanın çıktıları ATFCM Bilgilendirme Mesajı /Ağ Haberleri

ve Ağ Operasyon Planı portalı vasıtasıyla yayınlanan ATFCM Günlük Planıdır.

3. Taktik Akış Yönetimi: Uçuş günü gerçekleştirilen aşamadır. Bu aşamada gerçek trafiğe, kapasiteye ve gözlem (monitoring) değerlerine göre günlük planlar güncellenir. Trafiğin yönetimi slot tahsisi ve rota değişikliği ile sağlanır.
4. Operasyon Sonrası Analiz: Uçuş gününden sonra yapılan bu aşamada operasyon günü ile ilgili analizler yapılır ve önceki üç aşamayla ilgili geri besleme alınır.

CFMU tüm bu işlemlerde merkezi karar otoritesi olup, bilgiler CFMU, tüm ilgili seyrüsefer hizmet sağlayıcıları (akış yönetim pozisyonu vasıtasıyla) ve uçak işletmecileri (uçak işletici irtibat memurları ve irtibat hücresi vasıtasıyla) gibi ortaklarla paylaşılmakta ve işbirliği içinde plan ve geliştirmeler yapılmaktadır.

Talep ve kapasite dengesini sağlamak üzere yapılan ATFCM işlemlerinin temel çıktısı/çözüm yöntemi rota değişikliği veya geciktirme seçenekleri arasından birisini uçak işletmecisinin seçmesi sağlanmaktadır. Rota değişikliği uçağın gideceği yere uçuş planı (yani uçak işleticisinin tercih ettiği ve önceden planladığı) dışındaki dikeyde/yatayda farklı bir rotadan veya hava sahasından ulaştırılmasıdır. Gecikmeler ise slot tahsisi ile yapılır. Slot tahsisi, hava yollarının uluslararası havaalanlarına iniş, kalkış yapması, hava trafik kontrol sektörleri ve hava sahası için tahsis edilen ilgili zamanlardır. Hava trafik ağındaki her hangi bir noktada kapasite düşmesi yaşanacağı tahmin edildiğinde oraya regülasyon uygulanır. Regülasyon o yerle ilgili slot tahsis programıdır. Uçuş, rotası boyunca birçok noktada regülasyona tabi kalabilir.

Motor çalıştırma zamanından en geç 3 saat öncesinde uçak işletmecileri tarafından doldurulup gönderilen uçuş planları CFMU tarafından hava trafik akış ve kapasite yönetimi için kullanılan talep girdilerini oluşturmaktadır. Havaalanı kapasite bilgileri, hava trafik kontrolden gelen sektörlerin kapasite bilgileri ve askeri hava sahası bölümlerinden elde edilen kullanılabilir rota ve hava sahası bilgileri de sistemin kapasite girdilerini oluşturmaktadır. Bu kapasite ve talepler CFMU'da işlenerek karşılaştırılmakta ve mevcut kapasitenin en iyi şekilde kullanılmasını sağlamak amacıyla uçak işleticilerine slot veya yeni rota tahsisi

işlemleri gerçekleştirilmektedir. Slot tahsisinin yapılması motor çalıştırma zamanından 2 saat öncesine kadar tamamlanır. Eğer gecikmeyi azaltacak farklı rota varsa bu rota uçak işleticisine teklif edilir, kabul etmesi durumunda rota yenilenir, kabul etmezse uçağın kalkışı, atanmış olan slot zamanında yaptırılır. Uçuş planları uçuşla ilgili hava alanlarının Hava Trafik Kontrol (ATC-Air Traffic Control) birimleri ile de paylaşılır.

1.1.2. A.B.D’de hava trafik akış yönetimi

A.B.D’de hava trafiğinin yönetiminden Federal Havacılık Otoritesi sorumludur. Taktik seviyede 22 bölgeye ayrılmış olan tüm hava sahasındaki trafiğin düzenlenmesi, kontrolünün sağlanmasını her bölgedeki Hava Rotası Trafik Kontrol Merkezleri (ARTCC-Air Route Traffic Control Center) aracılığıyla gerçekleştirmektedir. Bu bölgeler dikey ve yatayda daha ufak hava sahası bölümlerine (sektörlere) ayrılmıştır. Uçaklar havahavaalanıalanından kalkıp sektörden sektöre kontrolörler tarafından takibi, kontrolü ve koordinasyonla devretmesi sonucunda, birbiriyle veya manialarla çarpışmadan iniş havaalanına uçuşunu gerçekleştirirler. İlk kontrol sorumluluğu meydan kontroledir, motor çalıştırma, piste taksi, kalkış ve meydan civarındaki tüm uçuş safhalarının kontrol sürecinden meydan kontrol sorumludur. Kalktıktan sonra uçak, Terminal Radar Yaklaşma Kontrole (TRACON-Terminal Radar Approach Control) devredilir ve seyir uçuşunu gerçekleştireceği uçuş irtifasına ve hava yoluna tırmanırken, kontrol sorumluluğu ARTCC’ye devredilir ve varış meydanına yaklaşırken, ters sırayla aynı devir işlemleri gerçekleştirilir. Uçaklar radar, gibi gözetim sistemlerinden alınan verileri yansıtan gösterge sistemleriyle izlenir ve radyo telsiz, veri hattı gibi sistemler vasıtasıyla da iletişim kurulur. Bu gösterge sistemleri gerçek zamanlı trafik durumunu sunduğu gibi, bunlara birleştirilmiş karar destek sistemleri aracılığıyla yakın gelecekteki trafiğin durumu izlenip, olası sorunları önceden belirlemek mümkün olabilmektedir.

Stratejik seviyede trafiğin koordinasyonu ise FAA’in komuta merkezi olan, ATCSCC tarafından gerçekleştirilir. ATCSCC ulusal hava sahasındaki güncel ve gelecek tahmini talebi sürekli olarak izler ve kapasiteyi sınırlayacak olan sistem kısıtlarını ve diğer koşulları belirler. Talebin kapasiteyi aşması beklendiği

durumlarda bu yığılmaları azaltacak stratejiler uygular. Kısa vadeli hava trafik akış yönetim prosedürleri Yerde Geciktirme Programı (GDP-Ground Delay Program), yer durdurma, ölçüm (metering) ve rota değişikliğidir.

Yerde geciktirme programı, varış havaalanı kapasitesi aşıldığı durumlarda kalkış meydanında uçakların talep ettikleri (tarifelendirilmiş) kalkış zamanından daha geç zamanda kaldırılarak havaalanındaki talep-kapasite dengesinin sağlandığı bir akış yönetim stratejisidir. Genellikle kötü hava koşulları başta olmak üzere, havaalanı onarım çalışmaları, sınırlı yüzey kapasitesi, gibi kontrol edilemeyen çok sayıdaki faktörler nedeniyle havaalanı kapasitesi düşebilir. Kapasitenin talebi karşılamakta yetersiz kaldığı böyle durumlarda uçaklar planladıkları zamanda inemeyerek, havada beklemeye maruz kalmaktadır. Yerde beklemeye göre çok daha maliyetli olan ve iş yükü doğurması nedeniyle emniyet seviyesi düşük olan bu durumu önlemek amacıyla, kapasitenin yeterli olduğu zaman diliminde, ilgili havaalanına ulaşmaları sağlanacak şekilde uçakların kalkış zamanları geciktirilmektedir. En temel akış yönetim stratejisi olan yerde bekleme yoğunlukla varış havaalanındaki kapasite kısıtları nedeniyle uygulanmakla birlikte, sistemin diğer elemanlarında kapasite sorunu yaşandığında da uygulanabilmektedir.

GDP'ye benzerlik gösteren diğer bir önlem de “yer durdurmadır”. Yer durdurma, havaalanında beklenmeyen ani problemler (örn; pistin kapatılması, şiddetli meteorolojik olaylar, vb.) oluştuğunda uygulanan bir çözümdür. Bu durumda problem devam ettiği sürece ilgili havaalanına gelmesi planlanan tüm uçuşlar kalkış havaalanında bekletilir. Yer bekleme süresi aşırı olursa veya gecikme süresi tahmin edilebiliyorsa GDP uygulanır.

Ölçüm (metering) zaman esaslı (MFT-Meter Fix Time) ve mesafe esaslı (MIT-miles in Trail) olmak üzere iki farklı yöntemden oluşmaktadır. İlk yöntemde uçakların genellikle sektör sınırlarında belirlenmiş belli bir noktayı belli zaman aralıklarıyla geçmesi esastır. Diğer yöntem ise yine aynı noktayı belli mesafe aralıkları ile geçmesi esasına dayalıdır. Zaman esaslı olan ilk yöntem genellikle aşırı kapasite düşüşleri yaşanan varış havaalanı için havada bekleme kuyrukları oluştuğunda, bekleme paternlerini kontrol etmek ve son yaklaşımda uçakları sıralayabilmek için kullanılmaktadır. Mesafe esasına dayalı olan diğer

yöntem ise, genellikle havaalanı terminal sahasına girmek üzere tek noktada birleşen trafik akışlarını yönetebilmek için Yol Boşluk Bırakımı Programları (ESP-En route Spacing Program) ile birlikte kullanılmaktadır. Ölçüm yönteminin uygulanma nedeni ve ölçüsü ise ilgili noktanın, ya da o noktadan sonraki sistem elemanlarında oluşan kapasite düşüşleri ve düşüş miktarıdır.

Rota değişikliği, hava sahasında belli bölgelerde talebin kapasiteyi aşması durumunda, önceden planlanmış olan uçuş yolunun değiştirilmesidir. Genellikle, akışlar hava sahasındaki geniş çaplı şiddetli hava koşullarından etkilendiğinde yürürlüğe sokulan Şiddetli Hava Kaçındırma Programlarının (SWAP-Severe Weather Avoidance Program) bir parçası olarak uygulanmaktadır. Bu program nedeniyle ayrıca GDP ve ölçüm önlemleri de uygulanmaktadır.

Tüm bu genel stratejilerin yanında küçük çaplı farklı önlemler de mevcuttur. Örneğin; Düşük İrtifa Alternatif Kalkış Rotaları (LAADR-Low Altitude Alternate Departure Routs), trafik sıkışıklığı olan hava sahalarında akışları daha alçak uçuş seviyelerine yaymak suretiyle tıkanıklıkları azaltan prosedürler kümesidir. Diğer; Kodlanmış Kalkış Rotaları (CDR-Coded Departure Routes) ise, hava koşulları nedeniyle kapanan hava sahalarından kaçındırmak için alternatif rotaların oluşturulduğu, depolandığı ve paylaştırıldığı veri tabanı ve prosedürlerden oluşan bir yöntemdir. Bu bahsedilen işlemler belli hava sahası bölgelerinde uygulandığından ve ağırlıklı olarak bölgesel koşullarına dayandığından dolayı daha çok yerel yapıdadır ve ATCSCC tarafından kısmi olarak ya da hiç koordine edilmemektedir.

FAA'in ATFM amaçlı stratejileri çok fazla görünmekle birlikte, esasında yerde geciktirme, havada geciktirme ve rota değiştirme olmak üzere üç çıktıya sahiptir. A.B.D'deki hava trafik akış yönetimi hakkında ayrıntılı bilgiler Traffic Flow Management in the National Airspace System [5] isimli kaynakta yayınlanmıştır.

A.B.D'de kapasite problemleri çoğunlukla hava alanlarında görülürken, Avrupa'da ise hava sahalarında da yaşanmaktadır. Her biri kendine ait hava sahasına sahip ülkelerden oluşan Avrupa'da, hava trafik kontrol hizmetlerinde koordinasyon ve hava trafik akış yönetimi daha zordur. Çünkü hava sahaları homojen yapıda değildir. Avrupa'daki uçuşların çoğu kısa mesafeli olmasına

rağmen birçok farklı hava sahasını kat etmeleri gerekmektedir, bu nedenle homojen olmayan bu hava sahası yapısı, hava yollarının kesişim noktalarında tıkanıklıklara neden olmaktadır.

1.1.3. Avrupa ve A.B.D’de hava trafik akış yönetiminin karşılaştırılması

Avrupa ve A.B.D’deki hava sahası yapısının farklılıkları akış yönetimine yansımaktadır. ATFM A.B.D ve Avrupa’da zaman ölçeği ve organizasyon açısından birçok farklılıklara sahiptir. A.B.D’de planlamanın çoğu uçak kalkmadan saatler öncesinde yapılmaktayken, Avrupa’da ise aylar öncesinden başlamaktadır ve sadece akış yöneticileri değil birçok farklı ulusal idareleri, saha kontrol merkezlerini ve uçak işleticileri ile işbirliğini gerektirmektedir. Bu kadar çok paydaşın olması koordinasyonu zorlaştırırken ATFM’i daha zorlu hale getirmektedir. A.B.D’de uçağın kalkışından önceki planlama faaliyetleri stratejik ve kalkıştan sonraki faaliyetlerinin tümü taktik olarak adlandırılmaktayken; Avrupa’da ise uçuştan aylar öncesinden başlayıp 1 hafta kalana kadar olan süreç stratejik, 6 gün ile uçuş günü arası planlama faaliyetleri ön taktik, uçuş gününde olan kalkışa kadar olan faaliyetler taktik ve uçuş sonrası değerlendirme faaliyetleri de operasyon sonrası analiz olarak dört farklı aşamada gerçekleştirilmektedir. Uçuşların kalkışından sonraki aşama tamamen hava trafik kontrol hizmetleriyle yönetilmektedir. Anlık gerçekleşen, bazı ciddi durumlarda müdahale edilip kapasite sorunu yaşanan bölgeye olan uçuşların engellenmesi dışında, kalkışını gerçekleştirmiş uçuşlar hava trafik akış yönetimi kapsamında idare edilmemektedir [2].

1.2. Hava Trafik Yönetim Sistemindeki Problemler

Her bir sistemin belli bir kapasite sınırı mevcuttur. Bir hizmet üretim sisteminde kapasite sınırına gelindiği zaman oluşan ilave talepler sistemde tıkanıklıklara yol açmaktadır. Hava ulaşımına olan talebin de son yıllarda hızla artmasıyla birlikte bir hizmet üretim sistemi olan hava trafik sisteminde de belli merkezlerde kapasite sınırı aşılmakta ve böylece tıkanıklıklar meydana gelmektedir. Tıkanıklıklar meydana geldiğinde ise emniyet sorunları, uçuşlarda gecikmeler, yolcu memnuniyetsizlikleri, çevresel etkiler ve maliyet artışları

meydana gelmektedir. Gecikmelerin çok çeşitli nedenleri vardır. Bunlar arasında genellikle en büyük gecikme kaynağı olan uçakların, uçuş mürettebatının, yolcuların veya yükün gecikmesi nedeniyle oluşan tepkisel (ya da ikincil) gecikmelerdir. Bu gecikmeler önceki uçuşun gecikmesi nedeniyle onunla bağlantılı olan güncel uçuşu etkilemektedir. Önceki uçuşların birikimli gecikmelerinin etkisi dışındaki gecikmeler ise birincil gecikmeler olarak isimlendirilmektedir [6]. Tepkisel gecikmeler, önceki uçuşun birincil gecikmesi veya tepkisel gecikmesi nedeniyle olabilir. En büyük birincil gecikme kaynağı genellikle yolcu, bagaj, kargo, teknik donanım, vb. nedenlerle hava yolu taşıyıcılarından kaynaklı sorunlar olmaktadır. Havaalanında park yeri yetersizlikleri, yoğun iniş trafiği, taksi yolunda tıkanıklıklar, vs. uçakların varış ve kalkış gecikmelerine neden olan bazı havaalanı kaynaklı gecikmelerdir. Yol hava sahasında hava trafik kontrol donanım ve personel yetersizlikleri gibi nedenlerle de uçakların kalkışında gecikmeler meydana gelmektedir. Uçakların kalkışlarında gecikmelere neden olan diğer bir unsur da hava durumudur. Sis, yağış, buzlanma, şiddetli rüzgar, vb. nedenlerle hava alanlarına iniş ve kalkış oranları düşebilmekte ve uçaklar arası ayırma minimaları artabilmektedir. İniş ve kalkış hava alanlarındaki kapasite problemleri, hava durumu ve yol hava sahası kapasitesi sorunları olduğu gözlemlendiğinde veya öngörüldüğünde ATFCM tedbiri olarak kalkış havaalanında kalkış zamanını geciktirme biçiminde gecikmeler uygulanabilmektedir.

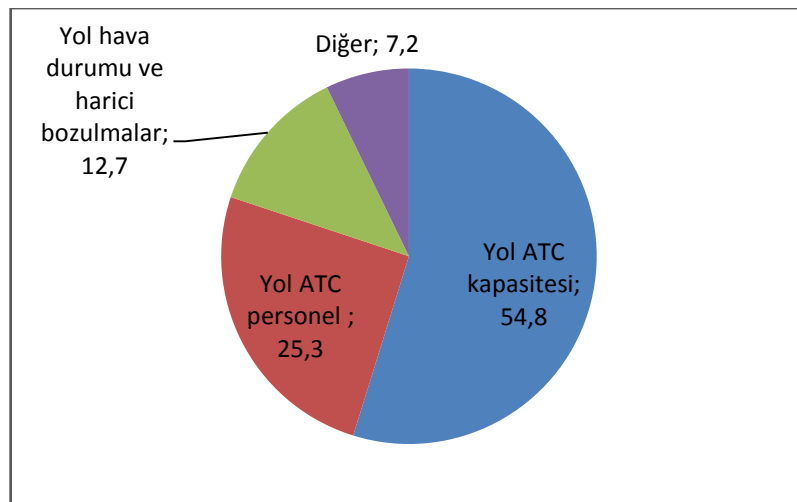
Hava trafik sistemindeki gecikmeler çok ciddi boyutlara varmaktadır. ECAC hava sahasında 2011 yılında günlük ortalama 27.134, toplam 9,78 milyon IFR uçuş gerçekleşmiştir [7, 8]. Geciktirilen uçakların uçak başı ortalama gecikme süresi; kalkışlar için 28 dakika ve inişler için 29 dakika olarak tespit edilmiştir [9]. Toplam ATFCM gecikmesi ise 17,9 milyon dakikadır ve bunun yaklaşık 11,3 milyonu yol, 6,7 milyonu ise havaalanı kaynaklıdır ve yol değişikliği nedeniyle uçuş süreleri 29,8 milyon dakika uzamıştır (Çizelge 1.1) [8]. Hava yolu firmalarına yol kaynaklı gecikmelerin 900 milyon Euro, havaalanı kaynaklı gecikmelerinin ise 550 milyon Euro ek maliyet getirdiği tahmin edilmektedir. Yol uzaması nedeniyle toplam 1,4 milyon ton daha fazla yakıt sarfiyatı gerçekleşmiştir. Yaklaşık % 50 'si yakıt kaynaklı olmak üzere yol uzamasının,

hava yolu firmalarına toplam 1,93 milyar Euro ek maliyet getirdiği tahmin edilmektedir. ATFCM yol ile ilişkili gecikmelerin nedenlerinden hava trafik kontrol kapasitesi %54,8 ile en büyük gecikme kaynağıdır, %25,3 ile yol hava trafik kontrol personel yetersizliği, %12,7 ile yol hava sahasındaki hava durumu ve diğer nedenler gelmektedir (Şekil 1.1) [7].

Daha önceki yıllarda yaşanmış olmasına rağmen 2011 yılında, doğrudan hava trafik yönetimi nedeniyle herhangi bir kaza gerçekleşmemiştir. Fakat emniyeti etkileyen izinsiz hava sahası ihlalleri, hava trafik kontrol talimatlarından sapmalar, pist ihlalleri, yetersiz ayırmalar ve ayırma minimalarının ihlalleri gibi toplamda yaklaşık 26.000 adet hadise rapor edilmiştir. Ayrıca rapor edilmeyen 50.000'in üzerinde hadise olduğu tahmin edilmektedir [8].

Çizelge 1.1. ATFCM'in ECAC hava sahasındaki uçuşlar üzerindeki etkileri [8]

2011	Süre (Milyon dk.)	Maliyet (Milyon €)
Havaalanı ile ilişkili gecikmeler	6,7	550
Yol ile ilişkili gecikmeler	11,3	900
Yol değişikliği nedeniyle uçuşun uzaması	29,8	1930



Şekil 1.1. Yol ile ilişkili ATFCM gecikme nedenlerinin yüzdeleri [7]

Çizelge 1.2. Uzun vadeli IFR trafik tahmini [10]

	IFR uçuş sayısı (milyon)		Trafik artışı	Yıllık artış oranı (%)
Senaryo	2009	2030	2030/2009	2030/2009
1	9,413	20,906	2,2	3,9
2	-	16,887	1,8	2,8
3	-	14,895	1,6	2,2
4	-	13,142	1,4	1,6

Çizelge 1.2’de görülebileceği gibi EUROCONTROL’un hazırladığı uzun vadeli tahminlere göre 4 farklı senaryo için 2030 yılında IFR trafik sayısı 2009 yılına göre en az 1,4 ile en fazla 2,2 katı kadar artması beklenmektedir. Bu da toplamda en az 13.142.000 ile en fazla 22.906.000 arasında uçuş sayısına karşılık gelmektedir. Yıllık trafik artışı %1,6 ile %3,9 arasında olması beklenmektedir [10].

Hava trafik sisteminde şu anda bile talep kapasiteyi aşmakta ve bu nedenle birçok sorun meydana gelmekteyken, gerekli önlemler alınmazsa ileriki yıllar için öngörülen talep artışı sonucunda, sorunların boyutunun daha da büyümesi kaçınılmazdır. Donanım, yazılım, planlama, insan gücü gibi her tür alanda iyileştirmeler sistem kapasitesini arttıracaktır. Sadece ATFM boyutunda yapılacak iyileştirmeler bile gecikmeleri azaltıp, emniyet seviyesini ve hava trafik kontrol kapasitesini arttıracaktır. ATFM bağlamında yapılabilecek iyileştirmelerden matematiksel modelleme ve optimizasyon bu yöntemlerden birini oluşturmaktadır.

1.3. Matematiksel Modelleme ve Optimizasyon

Bu çalışmada optimizasyon yöntemi olarak, 0-1 tamsayılı programlama kullanılmıştır. Bu yöntemin anlaşılabilmesi için öncelikle matematiksel modelleme ve optimizasyon, doğrusal programlama ve tamsayılı programlama kavramları incelenecektir. Bahsedilen bu konular yöneylem araştırması, matematiksel modelleme, optimizasyon, doğrusal programlama ve tam sayılı

programlama olarak isimlendirilmiş olan birçok ders kitabında [11-14] işlenmektedir. Çalışmanın devamında bunların derlemesi bulunmaktadır.

1.3.1. Matematiksel modelleme

Model bir problemi çözmek üzere, gerçek nesneleri ya da sistemleri temsil eden ve onların bazı yapısal, işlevsel ya da davranış özelliklerini barındıran basitleştirilmiş gösterimidir [11, 12]. Sistemler fiziksel olarak, kavramsal olarak, matematiksel olarak birçok farklı biçimde ya da farklı yaklaşımlarla modellenebilirler.

“Sistemin bileşenlerinin simgelerle tanımlanıp, bileşenler arası ilişkilerin fonksiyonlarla gösterimine matematiksel model denir. Karar verici tarafından değerleri değiştirilebilen değişkenleri barındıran ve bu değişkenlere hangi değerlerin verilmesi gerektiğini belirlemek amacıyla kurulan matematiksel modellere karar modelleri” denir [13]. Matematiksel modeller nesnelerin, sistemlerin, süreçlerin ya da problemlerin sembollerle gösterimidir [11]. Amaç fonksiyonunu en küçük veya en büyük yapacak karar değişkenlerinin değerlerinin neler olduğunun araştırılmasında izlenilen yöntem, teknik ve kavramlar bütünü optimizasyon olarak anılır. Karar modelleri genellikle değerleri değiştirilemeyen öğeler olan parametreler, değerleri karar verici tarafından değiştirilebilir olan karar değişkenleri, bu değişkenler ve parametreler arası ilişkileri ifade eden bağıntılardan oluşan kısıtlar ve değişkenlere verilecek değerlerin hesaplanmasındaki amacı ifade eden amaç fonksiyonunu içermektedir. Karar değişkenlerinin, kısıtların, parametrelerin ve amaç fonksiyonunun yapısına ve birbirleri ile olan ilişkilerine göre optimizasyon modelleri kısıtlı, kısıtsız, doğrusal, doğrusal olmayan, deterministik, stokastik, statik, dinamik ve tamsayılı programlama, gibi birçok türe ayrılmaktadır.

Matematiksel modeller analitik olarak, algoritmalarla, simülasyonla veya sezgisel yöntemlerle çözülmektedir. *“Belirli bir sıra ile gerçekleştirilen matematiksel ve mantıksal işlemler kümesine algoritma denir”* [12]. Algoritmik çözümde, karar değişkenlerinin bir başlangıç değerinden hareketle, adım adım ilerleyerek, her seferinde ardışık iyi değerden amaç fonksiyonunun en iyi değerine ulaşılır.

1.3.2. Doğrusal programlama

Doğrusal programlama belli doğrusal eşitliklerin veya eşitsizliklerin kısıtlayıcı koşulları altında doğrusal bir amaç fonksiyonunu en iyi kılan değişken değerlerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen işlemler bütünüdür.

Bir karar probleminin doğrusal programlama modeli olarak modellenmesi ve çözülebilmesi için dört temel varsayımı sağlaması gerekir. Bunlar; doğrusallık (oranlılık), toplanabilirlik, sınırlılık ve negatif olmamadır [12].

Doğrusallık varsayımı; amaç fonksiyonu ve kısıtlayıcıların, karar değişkenlerin doğrusal bileşenleri olarak formüle edilmesini gerektirir. Girdiler ile çıktılar arasında doğrusal bir ilişki olduğu varsayımı bulunur. Bu varsayımın sağlanması için karar değişkenlerinin birinci dereceden ve amaç fonksiyonu kat sayılarının sabit olması gerekir.

Sınırlılık varsayımı; kaynakların sonlu miktarda olmasını ifade eder.

Toplanabilirlik varsayımı; değişik üretim faaliyetlerine kaynak olan üretim girdileri toplamının, her bir işleme giren üretim girdileri toplamına eşit olduğunu belirtir.

Negatif olmama varsayımı; karar değişkenleri, aylak değişkenler ve artık değişkenlerin sıfırdan büyük olmasını gerektirir.

Bir doğrusal programlama modelinin üç temel bileşeni vardır. Bunlar; karar değişkenleri, amaç fonksiyonları ve kısıtlayıcı faktörlerdir.

1.3.3. Tamsayılı Programlama

Tamsayılı programlama modeli, doğrusal programlama modelinin kısıtlayıcılarına, karar değişkenlerinin bir kısmının veya tamamının tamsayı olma koşulu getirilmiş halidir. Doğrusal programlamada karar değişkenleri pozitif olan 0'ın üstündeki reel sayılarken, tamsayılı programlamada ise pozitif tamsayılarla kısıtlanmıştır. 3 çeşit tamsayılı programlama modeli vardır [14].

- Bütünüyle tamsayılı doğrusal programlama
- 0-1 tamsayılı doğrusal programlama
- Karma tamsayılı doğrusal programlama

Bütünüyle tamsayılı programlamada tüm karar değişkenleri tamsayıdır. Karma tamsayılı programlamada ise karar değişkenlerinin bir kısmı tamsayılı, diğerleri ise sürekli. 0-1 tamsayılı programlamada bazı veya tüm karar değişkenleri “0” ya da “1” değerini alır. Bir faaliyetin yapılması gerektiği hesaplanırsa karar değişkeni “1”, yapılmaması gerektiği hesaplanırsa “0” değerini almaktadır.

Aşağıda temel bir doğrusal programlama modeli görölmektedir [13]:

a_{ij} = bir birim x_j için gerekli i 'inci kaynak

b_i = i 'inci kaynak miktarı

c_j = bir birim x_j karar değişkeninin amaç fonksiyonuna katkısı

x_j = j 'inci karar değişkenine atanacak değer

n = karar değişkeni sayısı

m = kısıt sayısı

$$\text{Min} \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (1.1)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i \quad (i=1, \dots, m) \quad (1.2)$$

- Kısıtlara “ $x_j \geq 0$ ” eklenirse doğrusal programlama modelidir.
- “ $x_j \geq 0$ ve Tamsayı” olarak ifade edilirse bütünüyle tamsayılı doğrusal programlama modeli olur.
- $x_j \in \{0,1\}$ eklenirse 0-1 tamsayılı doğrusal programlama modeli olur.
- “ $x_i \geq 0$ ($i=1, \dots, n$), x_j tamsayı ($j=1, \dots, m$) ($m \leq n$)” olarak ifade edilirse karma tamsayılı doğrusal programlama modeli olur.

- 1.1 denklemi amaç fonksiyonunu vermektedir. Toplam maliyetin en az olması için hangi üründen ne kadar üretilmesi gerektiği bu fonksiyona ve diğer kısıtlara göre belirlenir. 1.2 denklemi ise “=” yerine “ $\geq$ ” veya “ $\leq$ ” şeklinde de verilebilir. İlgili kapasitenin aşılmaması gerektiğini ya da talebin karşılanması gerektiğini belirtmek için kullanılır.

Tamsayılı programlama modellerinin çözümünde geometrik çözüm, yuvarlama, kesme düzlemi ve dal-sınır gibi teknikler kullanılmaktadır [12]. 0-1 tamsayılı programlamada ve diğer birçok matematiksel modelleme ve çözümünde kullanılan çeşitli ticari bilgisayar kodları-yazılımları bulunmaktadır. Bunlardan bazıları; Lindo, CPLEX ve GAMS’dır.

Verilen bu genel bilgilerden sonra hava trafik akış yönetimi problemi konusunda yapılmış olan matematiksel modelleme ve optimizasyon çalışmaları incelenecektir.

2. HAVA TRAFİK AKIŞ YÖNETİMİNDE MATEMATİKSEL MODELLEME ÇALIŞMALARI

Hava trafik yönetimi alanındaki problemlerin optimizasyon yöntemleri ile çözümleri ilk olarak hava trafik akış yönetimi problemlerine uygulanmıştır. Bu uygulamaya ilk örnek L. Bianco'nun 1986-1992 yılları arasında yapmış olduğu benzer çalışmalar [15-18] verilebilir. Bianco'nun hava trafik kontrol modelinde çok seviyeli bir modelleme yaklaşımı vardır. Stratejik kontrol fonksiyonunun akış kontrol seviyesinde, trafik akışının artırılması ve ağ üzerindeki trafik yönetiminin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bianco'nun Hava Trafik Kontrol sisteminin zaman hiyerarşisine dayalı modelini ilk kez oluşturduğu bu çalışmalar, CFMU'nun temelini oluşturmuştur.

Hava trafik akış planlamaları alanında yapılan matematiksel modeller çok çeşitli özelliklere sahiptir. Bu modeller sahip oldukları bu farklı özelliklere göre çok çeşitli şekilde sınıflandırılabilirler. Aşağıda liste şeklinde verilmiş olan sınıflandırmaların birçoğu Agustin ve ark.'nın 2010 yılındaki "Mathematical Optimization Models for Air Traffic Flow Management: A review" [19] adlı çalışmalarından elde edilmiştir:

1. İniş havaalanı sayısına göre
 - a) tek havaalanı,
 - b) birden fazla.
2. Kapasite çeşitliliğine göre
 - a) tek kapasite (havaalanı (iniş ve/veya kalkış kapasitesi),
 - b) birden fazla (hava alanları iniş ve kalkış, sektör, yol, bağımlı kalkış-iniş kapasitesi).
3. Çözüm türü
 - a) bekletme çözümü (yerde ve havada),
 - b) rota değişikliği,
 - c) seviye değişikliği,
 - d) hız değişikliği,
 - e) ölçüm çözümü,
 - f) çatışma çözümü,

- g) diğer (uçuş iptali, vb.).
4. Periyot sayısı:
- a) tek,
 - b) birden fazla.
5. Talep ve/veya Kapasitelerin belirliliği:
- a) deterministik (tamamı bilinmekte),
 - b) stokastik (talep ve kapasitelerden herhangi birinde belirsizlik vardır).
6. Uçuş rotasının yapısı:
- a) sektör bazlı (kat edilecek sektörler),
 - b) yol bazlı (düğüm çiftleri arasında tanımlanan yollar).
7. Karar verici (sayısı, türü):
- a) tek karar verici (merkezi),
 - b) birden fazla karar verici (ortaklaşa).
8. Uçak miktarlarının karar değişkenlerinde ifade ediliş biçimi:
- a) bireysel,
 - b) toplu.
9. Programlama türü:
- a) doğrusal programlama,
 - b) doğrusal olmayan programlama,
 - c) tamsayılı programlama (bütünüyle tam sayılı, karma tam sayılı, 0-1 tam sayılı),
 - d) dinamik programlama,
 - e) stokastik programlama.
10. Üretilen sonuçların hassasiyetine göre çözüm yöntemleri:
- a) kesin çözüm üreten (exact algorithms),
 - b) yaklaşık çözüm üreten (approximation algorithms),
 - c) iyi çözüm üreten (heuristics).
11. Zaman ufkuna göre:
- a) stratejik,
 - b) taktik.
12. Problemin büyüklüğüne göre:

- a) mikro ölçekli,
- b) makro ölçekli.

13. Modelde yer alan farklı ek kısıtlar:

- a) uçuş devamlılığı,
- b) kontrolör iş yükü.

Sridhar ve ark.'nın 2008'de yaptıkları "Modeling and Optimization in Traffic Flow Management" [20] çalışmalarında, hava trafik akış yönetimi konusunda yapılan çalışmalar modelleme, simülasyon ve optimizasyon bağlamında geniş çaplı olarak incelenmiş ve sınıflanmıştır. Agustin ve arkadaşlarının 2010 yılındaki "Mathematical Optimization Models for Air Traffic Flow Management: A Review" [19] isimli çalışmalarında ATFM için yapılmış olan optimizasyon modelleri hakkında birçok sınıflandırmaya yer verilmekle birlikte, bunlardan dört tanesi hakkında ayrıntılı inceleme sunulmuştur. Bunlar tek hava alanlı yer bekleme problemi, birden fazla hava alanlı yer bekleme problemi, ATFM problemi (sektör kapasitelerini barındırır) ve ATFM rota yenileme problemidir (içerisinde rota yenileme yapılan modeller).

Görüldüğü üzere zaman içerisinde çok çeşitli sınıflamalar yapılmıştır ve bunların sayısını daha da arttırmak mümkündür. Bu çalışmanın amacı doğrultusunda modeller sundukları çözümler bağlamında sınıflanıp, incelenmiştir. Çalışmada modeller sundukları çözümler yönünden; bekletme çözümü sunan, rota değişikliği çözümü sunan, hız değişikliği çözümü sunan, hız değişikliği çözümü sunan, seviye değişikliği çözümü sunan, ölçüm çözümü sunan ve çatışma çözümü sunan modeller olarak 5 ayrı sınıfta incelenmiştir.

2.1. Bekletme Çözümü Sunan Modeller

ATFM konusunda literatürde yer alan optimizasyon modellerinin çoğu bekletme çözümü sunmaktadır. İlk yıllarda sadece bekletme çözümü üstüne çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Bunların birçoğu tek havaalanı [21-34], diğerleri de birden fazla havaalanı için uygulanmıştır [35-45]. Bekletme çözümü sunan bu modellerde, yerde bekleme maliyeti, havada bekleme maliyetine göre daha düşük olmasından dolayı, geneli yerde olmak üzere bir kısmı da havada bekleme çözümü sunmaktadır. Bu modellerin birçoğu sadece havaalanı

kapasitelerini dikkate almaktayken, bir kısmı da hava sahası, yol veya yol noktalarının kapasitelerini de dikkate almaktadır.

2.1.1. Tek iniş havaalanı içeren modeller

Tek hava alanlı ve çok periyotlu yer bekleme probleminin en temel matematiksel modeli 1993 yılında Terrab ve Odoni [21] tarafından açıklanan modeldir ve bundan sonraki çalışmalara temel oluşturmasından ötürü burada örnek olarak incelenmiştir.

K = Havaalanı ismi

F = Uçaklar kümesi

N = Uçak sayısı

T = Zaman dilimleri kümesi

P = Zaman dilimi sayısı

K_j = Havaalanının her " j " zaman dilimindeki kapasitesi (maksimum inebilecek olan uçak sayısı)

P_i = i 'inci uçuşun tarifelendirilmiş iniş periyotları kümesi

c_{ij} = i 'inci uçuşun j 'inci zaman diliminde yerde bekleme maliyeti

$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{eğer "i" uçuşu "j" zamanında iniş yapacaksa} \\ 0 & \text{diğer} \end{cases}$

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N \sum_{j=P_i}^{P+1} c_{ij} x_{ij} \quad (2.1)$$

$$\sum_{j=P_i}^{P+1} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in F \quad (2.2)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{ij} \leq K_j \quad \forall j \in T \quad (2.3)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad (2.4)$$

2.1 numaralı fonksiyon toplam yer gecikme maliyetlerini en aza indirecek amaç fonksiyonunu vermektedir. 2.2 numaralı denklem uçağın inmesi gerektiği ve bir kez inebileceğini ifade eden kısıttır. 2.3 numaralı eşitsizlik ise inen uçak sayısını sınırlayıp, havaalanının iniş kapasitesinin aşılmasını engelleyen kısıttır. Sonuncusu ise karar değişkeninin tipinin 0 veya 1 tamsayıyla değişken olduğunu ifade eder. Bu modelle “K” havaalanının (tek havaalanı), hiçbir zaman diliminde kapasitesi aşılmayacak şekilde, en az (yer) gecikmeyle ve maliyetle uçakların iniş zamanları planlanmaktadır.

Aşağıda tek hava alanlı yer ve yer-hava bekletmeleri çözümü sunan çalışmalardan bazıları hakkında bahsedilmiştir:

Havaalanı kapasitesinin olasılıklı olarak ele alındığı ilk model olan Andretta ve Romanin-Jacur’un 1987 yılında yaptıkları çalışma [22] incelenecek olursa; hava yolu ağının yıldız biçiminde olduğu ve merkezde iniş havaalanının yer aldığı, uçakların birçok havaalanından farklı zamanlarda kalkıp, aynı zaman diliminde tıkanıklığın olduğu bu merkezi havaalanına iniş yaptığı durumun modellendiği görülür. Bu çalışmada kapasite sorunu sadece tek iniş havaalanı için yaşanmaktadır. Tek bir periyottaki havaalanı inişleri için hesaplama yapılmakta olan modelde havaalanı iniş kapasitesi olasılık dağılımlı olarak önceden bilinmektedir. Modelde varış havaalanının kapasitesinin aşılmasını engelleyecek şekilde, toplam gecikme maliyetini azaltmak amacıyla uçakların kalkış zamanları hesaplanmaktadır. Eğer uçağın tarifelendirilmiş zamanda kalkması durumunda oluşabilecek havada beklemenin maliyeti yerde bekleme maliyetinden daha yüksekse uçağın kalkış zamanı geciktirilir. Model polinomsal zamanlı olan bir dinamik programlama algoritmasıyla çözülmüştür. İlk aşamada öncelik sıralaması sabit ve önceden bilindiği kabul edilmekteyken, ikinci aşamada bunun bilinmediği durum için optimal bir öncelik kuralı sunulmuştur. Bu kural havada gecikme maliyetlerine dayalı olarak uçakların iniş öncelik sıralamasını belirlemektedir. Son olarak da yer gecikmesi almayan uçakların öncelik sıralamasını belirleyen bir algoritma sunulmuştur. Model hava trafik akış yönetim probleminin oldukça basitleştirilmiş bir halidir.

Terrab ve Odoni [21] biri deterministik diğeri ise stokastik olan tek varış havaalanı kapasite kısıtlı, çok periyotlu, doğrusal, tamsayılı iki model sunmuşlardır. Modelin amaç fonksiyonu toplam yer ve hava gecikme maliyetlerini minimize edecek şekilde uçaklara optimum yer gecikmesi atamaktır. Deterministik model en düşük maliyetli akış algoritması gibi standart yöntemlerle çözülebilen kombinatoriyel bir problemidir. Problemin çözümü için aynı zaman diliminde incek olan uçaklardan marjinal gecikme maliyeti daha yüksek olanlara inişte daha yüksek öncelik verilmesini sağlayan farklı bir algoritma önerilmiştir. Havaalanı varış kapasitelerinin her zaman dilimi için farklı olasılıkta, çeşitli kapasite durumları halinde önceden bilindiği ve zamanla bu olasılıkların değişmediği (statik) stokastik olan modelse iki farklı yöntemle çözülmüştür. Her iki yöntemde de iniş uçaklarının öncelik sıralamasının önceden bilindiği ve sabit olduğu kabul edilmekte ve modelde girdi olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden ilki Andreatta ve Romanin Jacur'un [22] kullandığı dinamik programlamanın genişletilmiş versiyonudur. Bu yöntem ile kesin çözüm elde edilebilmiştir. Bu yöntemin zaman karmaşıklığı ve gerekli bellek kapasitesi çok yüksek olduğundan, gerçekçi olan büyük çaplı problemlerin çözümü için kullanışsızdır, bu nedenle problem ayrıca sezgisel algoritmalarla çözülmüştür. Burada kullanılan sezgisel algoritmalar şunlardır; Limited Lookahead, Maximum Marginal Return (MMR), Equivalent Capacity ve Equivalent Policy.

Limited Lookahead algoritmasında; tüm zaman kümesi eşit küçük zaman kümelerine bölünür (örneğin 3) daha sonra her bir zaman kümesi için sırayla ayrı ayrı her biri alt problemler olarak ele alınıp dinamik programlama yöntemiyle çözülür.

Maximum Marginal Return algoritmasında; en yüksek önceliği olan uçaktan başlayarak, her bir uçağın beklenen maliyetini yine dinamik programlamayla tek tek minimize ederek uçakların yer bekleme süreleri hesaplanmaktadır.

Equivalent Capacity algoritmasında; olasılıklı kapasite tahminleri tek bir eşdeğer deterministik kapasite kümesine indirgenerek deterministik olan ilk modelde kullanılan herhangi bir algoritmayla çözülür. Eşdeğer kapasite algoritmasının genel hali havada gecikmeyi dikkate almamasından dolayı yer

gecikmesinin az olduğu kötü sonuçlar vermektedir, bunun üstesinden gelmek için yine aynı algoritma ailesinden olan ağırlıklı kapasite sezgiseli kullanılmıştır.

Equivalent Policy sezgiselinde; problem her bir kapasite durumu için ayrı ayrı herhangi bir deterministik yöntemle çözölür ve tüm çözümler tek bir kural olarak birleştirilir. Modelin sayısal deneyleri için seçilen örnek bir senaryo üzerinden deterministik modelin çözüm sonuçları incelendiğinde ilk gelene ilk hizmet öncelik kuralına göre çok daha düşük maliyetler elde edildiğı görölmüşür.

Stokastik modelin sezgisellerle çözölümü incelendiğinde; belirsizliğı ele almayan deterministik İlk Gelene İlk Hizmet (FCFS-First Come First Served) algoritmali modellere göre gecikme maliyetlerini yaklaşık yarı yarıya düşürdüğü görölmüşür. Sezgisel algoritmalar kendi içinde kıyaslandığında en düşük maliyeti MMR ve Limited Lookahead Time sezgisellerinin sağladığı, MMR'ın Limited Lookahead Time sezgiseline göre kat kat hızlı şekilde çözölümü gerçekleştirdiğı görölmüşür. Stokastik modelin dinamik programlamayla çözölümündeyse sezgisellere göre %20'ye varan daha düşük toplam gecikme maliyeti elde edilmiştir, fakat model çok az sayıda uçak için ve kısa zaman aralığında uygulanmıştır. Daha büyük çaplı problemlerin çözölümü için bu yöntem elverişli değildir.

Richetta ve Odoni [23] yer ve hava gecikmelerinin atandığı, tek varış havaalanı, statik stokastik ve çok periyotlu kapasite kısıtlı, tamsayılı, doğrusal bir model geliştirmişlerdir. Uçakların planlanan kalkış zamanları ve uçuş süreleri önceden bilinmektedir. Uçaklar toplu olarak ele alınmıştır, yani hangi uçağı ne kadar gecikme verileceğı değil, kaç uçağı gecikme verileceğı hesaplanmaktadır. Uçaklar farklı maliyet sınıflarına ayrılmıştır ve her bir uçağın yer ve hava gecikme maliyet fonksiyonları bilinmektedir. Havaalanının her bir zaman dilimi için olasılıklı olan farklı kapasite senaryoları modelde sabit girdi değerleri olarak hesaplamadan önce sadece bir kez alınır ve güncellenmez, yani model statik stokastiktir. Model büyük hava alanları için bile optimum çözümler üretebilmektedir.

Ball ve ark. [24] tek varış havaalanı için, çok periyotlu, statik stokastik kapasite ve talebin olduğı, toplu olarak havada ve yerde bekleme çözölümü sunan, tamsayılı bir ikil ağ akış modeli kurmuşlardır.

Gao ve ark. [25] çalışmalarında çok periyotlu, tek havaalanı yer bekleme problemini bulanık mantık teorisini kullanarak modellemişler ve problemi sezgisel teknikle çözmüşlerdir. Deterministik olmayan birçok parametre, belirlenmiş olan belli sayıda bulanık mantık kurallarına göre ele alınmıştır. Model “Sonraki uçak” modülü, “Kapasite” modülü ve “Karar” modülü adını verdikleri 3 modülden oluşmaktadır. İlk modülde (sonraki uçak modülü) yakıt sarfiyatları, yolcu sayısı ve uçağın ağırlığına göre belirlenen gecikme maliyetlerine göre uçaklara öncelik sıralamaları atanır. Daha sonra rüzgar hızı, yağmur, kar ve görüş mesafesine göre “kapasite” modülünde havaalanı iniş kapasitesi belirlenir. Son olarak da “karar” modülünde, önceki iki modüldeki veriye dayanarak her bir uçağın kalkış zamanının geciktirilip geciktirilmeyeceğine karar verilir. Modeli kendi geliştirdikleri bir sezgisel algoritmayla çözmüşler ve sonuçları ilk gelene ilk hizmet algoritmasıyla kıyaslamışlar ve kendi önerdikleri algoritmanın daha az gecikmeyle sonuçlandığını tespit etmişlerdir.

Mukherjee ve Hansen [26] tek varış havaalanındaki stokastik kapasite koşullarına dayalı olarak, daha kalkmamış olan uçaklara, farklı karar aşamalarında yapılan dinamik yer gecikme revizyonuna izin veren bir program formüle etmişlerdir. Uçaklara tek seferde yer gecikmesi atamak yerine, en güncel kapasite bilgisine göre, tarifelendirilmiş kalkış zamanına yakın zamanda yer gecikmelerinin tahsis edildiği çok aşamalı, dinamik stokastik, tamsayılı olan bir model niteliğini kazanmıştır. Böylece kalkıştan önce sadece bir kez gecikme atandığı ve bir daha bu kararın güncellenmediği (kısmi dinamik) Richetta ve Odoni’nin [27] modelindeki bu eksikliği gidermiştir. Yapılan bu geliştirme sayesinde toplam gecikme maliyetinin % 11 azaldığı görülmüştür. Güncellenmiş kapasite olasılıkları senaryo ağacının dallanmasıyla elde edilmektedir. Karar değişkenleri bireysel uçuşların kalkış zamanlarına bağlıdır. Parçalı formülasyon; modelin doğrusallığı bozulmadan kolaylıkla doğrusal olmayan gecikme maliyetlerini de dahil etmeyi sağlamaktadır. Böylece verimliliğin yanında adalet sorunu da kolaylıkla ele alınabilmekte ve bu ikisi arasında bir denge kurulabilmektedir. Bu çalışmalarında mevcut model uygulandıktan sonra ayrıca hava yolu işletmelerinin maliyetlerini düşürmek için kendi uçuşlarını değiştirme ve iptal etmelerini sağlayacak bir optimizasyon modeli de önerilmiştir. Böylece

ortaya çıkan çalışma Ortaklaşa Karar Vermeyi (CDM-Collaborative Decision Making) de destekler nitelik kazanmıştır.

Buraya kadar tek havaalanı için yapılan modeller incelenmiştir. Bundan sonraki bölümde birden fazla havaalanı için yapılan modeller incelenecektir.

2.1.2. Birden fazla iniş havaalanı içeren modeller

1994'te ise Vranas ve ark. [35] çalışmalarında literatürde ilk defa bağlantılı uçuşların ele alındığı birden fazla hava alanlı, çok periyotlu, yer ve hava gecikmesini en aza indirecek şekilde yer bekleme çözümü sunan, statik, deterministik kapasiteli, tamsayılı bir programlama modeli geliştirmişlerdir. Modelde uçuşların iptali çözümü de sunulmaktadır. Modeli sezgisellerle çözmüşlerdir.

Zang ve ark. [36] çalışmalarında çok hava alanlı, deterministik, çok periyotlu, tamsayılı ve doğrusal olmayan bir model geliştirmişlerdir. Genetik algoritma ile “Augmented Lagranj” yöntemini bir araya getiren “Co-evolutionary Genetik Algoritma” kullanılarak çözülmüş olan model, kalkış ve varış kapasitesinin en iyi şekilde kullanılması ile yerde ve havada gecikmelerin sayısının azaltılmasını sağlayan iki amaç fonksiyonuna sahiptir. Modelde yol kapasiteleri ihmal edilmiş, sadece kalkış ve iniş kapasiteleri dikkate alınmıştır. Kalkış ve inişlerin aynı pistten gerçekleştirildiği ve böylece birbirinin kapasitesini etkilediği durum modellenerek, bu iki kapasite arasında denge oluşturulmuştur. Kalkış ve iniş kapasiteleri her zaman dilimindeki talebe göre dinamik olarak değişmektedir fakat çözüm uçuşlar başlamadan önce bir kez hesaplanmaktadır. Bağlantılı uçuşlar da modele dahil edilmiştir. Testler sonucunda çoğunlukla yer gecikmeleri ile kaçınılmaz olarak az miktarda hava gecikmeleri elde edilmiştir.

Andreatta ve ark. [37] çalışmalarında çok periyotlu, birden fazla hava alanlı, stokastik havaalanı kalkış ve iniş kapasiteli modelde her bir zaman diliminde kaç adet uçağa yer ve hava gecikmesi verilmesi gerektiği hesaplanmaktadır. Tamsayılı olan bu modelde uçaklar toplu olarak ele alınmıştır. Modelde kalkış ve iniş kapasiteleri birbirini etkilemektedir. Havaalanı kapasitesi kalkış ve iniş uçakları için dengeli şekilde dağıtılmaktadır. Bağlantılı uçuşlar da modelde yer almaktadır. Model kaç uçağa gecikme verilmesi gerektiğini

hesaplarken, hangi uçakların geciktirileceği kararını ise hava yolu şirketlerine bırakarak ortaklaşa karar vermeyi desteklemek üzere çözümü yarım bırakmaktadır.

A.B.D'nin hava trafik sistemine uyumlu olarak başlarda sadece havaalanı kapasite kısıtları dikkate alınmaktayken, artan trafik ve Avrupa hava sahası ve hava trafik sisteminin yapısından dolayı daha sonra hava sahası kapasite kısıtları da dikkate alınmaya başlamıştır. Bu modeller diğer alt başlıkta incelenmiştir.

2.1.3. Hava sahası kapasitesini içeren modeller

İlk defa hava sahasındaki yol kapasitelerinin ele alındığı, çok hava alanlı modellerden biri Helme'nin [38] çalışmasıdır. Bu çalışmada birden fazla havaalanından kalkıp birden fazla havaalanına iniş yapması planlanan uçuşlar için çok elemanlı (multicommodity) en düşük maliyetli ağ akış problemi olarak bir optimizasyon modeli kurmuşlardır. Kapasiteler statiktir fakat dinamik olarak değişebilen yol kapasitelerini de hesaba katmaya imkan vermektedir. Havaalanı varış kapasiteleri ve yol kapasiteleri ile talep deterministiktir, önerilen ufak bir değişiklik ile kapasiteler olasılıklı hale getirilebilir. Model tamsayılıdır. Hangi uçağın hangi zamanda kalkacağını değil, toplam kaç tane uçağın (aggregate) hangi zamanda, hangi havaalanından-düğümünden hangi düğüme-havaalanına gidebileceği hesaplanmaktadır. Her bir havaalanı çifti arasında tek bir rota mevcuttur, fakat ufak bir değişiklik ile alternatif rotalar da ilave edilebilir hale gelmektedir. Model, her düğüm çifti arasında her bir uçağın bir zaman dilimi bekletilmesine atanan maliyet katsayıları (yer için 1, hava için 2 olarak ele alınmıştır) sayesinde yer ve hava gecikmeleri ile toplam gecikme maliyetlerini azaltmaktadır.

Lulli ve Odoni [39] hava trafik akış yönetimi problemini Avrupa hava sahası bağlamında ele almıştır. Avrupa'nın kendine özgü hava sahası ve akış problem yapısı irdelenip, buna uygun çözüm arayışına girilmiştir. Modelde her zaman diliminde farklılaşan sektör ve hava alanlarının deterministik kapasiteleri kısıt olarak kullanılmış, toplam gecikmeyi en aza indirecek olan amaç fonksiyonuyla yer ve havada gecikme süreleri hesaplanmıştır. Önerdikleri yeni bakış açısına göre, Avrupa'da rota yenileme ve yerde bekletme yerine bazı durumlarda havada bekleme yaptırmanın daha uygundur. Bu tezlerinin dayanağı

ise, değiştirilen rotalar nedeniyle uçakların çok parçalı, çok uluslu ve farklı kapasitelerden oluşan ECAC hava sahasının farklı hava sahalarını kat etmeleri sonucunda koordinasyon gereksiniminde ve maliyette artış yaşanmasıdır. Havada bekleme yapılarak aynı hava sahası içerisinde sorun daha kolay şekilde özöllebilir. Yine hava sahasının farklı yapısı gereği önerdikleri en önemli yaklaşımları, uçaklara standart olarak uygulanan eşitliğe dayalı FSFS öncelik sıralamasının değiştirilmesi gerektiğidir. Bunun için dayanakları ise standart FSFS ile asıl tıkanıklık yaratan uçaklara az miktarda gecikme verilip hiçbir tıkanıklık olmayan havaalanından kalkan ya da çoğu tıkanık olmayan sahaları/yolları kullanan uçaklara büyük miktarlarda gecikme verilebilmesi sonucunda ortaya çıkan adaletsizlik durumudur ve bu eşitlik anlayışı bazı koşullarda toplam maliyeti de arttırmaktadır. Modelin diğer özelliği ise tıkanıklık durumuna benzer ölçüde etkisi olan uçaklara gecikmelerin birine en az, diğerine en fazla olacak şekilde değil, mümkün olduğunca dengeli bir şekilde dağıtılmasıdır.

Ma ve ark.'nın [40] çalışmasında ise kısa vadeli ATFM amaçlı çok elemanlı dinamik bir ağ akış modeli geliştirilmiştir. Model çok hava alanlı, çok periyotlu ve yol bazlı yapıdadır. Modelin amaç fonksiyonu tüm uçuşların toplam yer gecikmelerini, havada beklemelelerini, yakıt tüketim maliyetlerini ve alternatif havaalanı kullanımlarını en aza indirecek katsayılarla formüle edilmiştir. Kısıtlar olarak ise her zaman dilimi için farklılık gösteren kalkış havaalanı, iniş havaalanı, yol kavşakları (sabit noktaları) dinamik akış dengeleme kısıtları, yol kapasiteleri, her sektör için ayrı kontrolör iş yükü ve tamsayılı değişkenlerden oluşmaktadır.

2.2. Rota Değişikliği özümü Sunan Modeller

Bu başlık altında, bekletme çözümüne ek olarak rota değişikliği çözümü de sunan bazı modeller incelenmiştir. Bu konuda yapılmış çalışmalar [46-60] numaralı kaynaklarda bulunmaktadır.

Birden fazla çeşitte kapasitenin ele alındığı ve rota yenilemeye izin veren çalışmalardan Bertsimas ve Stock'un çalışmasında [46] ATFM problemi deterministik, zaman-değişkenli (ok periyotlu) hava sahası (sektör) ile havaalanı kalkış ve iniş kapasiteleri olarak ele alınmıştır. Birden fazla havaalanı mevcuttur. Bir uçağın rotası, sırasıyla kat edilecek sektörler kümesini ifade etmektedir.

Model uçuş bağlantılarını da barındırmaktadır. Tamsayılı programlama formülasyonu önermişlerdir. Problemin “NP-Zor: non-deterministic polynomial-time *hard*” “iş dükkan tarifelendirme” problemine eşdeğer olduğunu göstermişlerdir. Ancak, formülasyonlarındaki birçok kısıt, tüm kısıtlar kümesi tarafından tanımlanmış olan çok yüzeyli şeklin yüzeyleridir ve bu nedenle büyük miktardaki değişken ve kısıtlarda tamsayılı çözümler modelin “Doğrusal Programlama gevşeme: LP relaxation” yöntemiyle elde edilmektedir. Bu model, formülasyonda çok parçalara ayrılmıştır, çünkü karar değişkenleri her uçağın salınma (ya da kalkış) zamanları, havada bekleme zamanları ve rotalarıyla ilişkilidir. Bu da binlerce uçuşun ve tıkanıklık olabilecek yüzlerce kaynağın olduğu gerçekçi durumlar için problemi çok geniş hale getirmektedir. Eğer LP gevşemesi tamsayılı optimal çözümü sağlamazsa hesaplama zamanı yüksek çıkabilir. Gerçekçi büyüklükte problemlerin çözümü uzun sürmektedir (8 saatin üzerinde). Fakat parçalı formülasyonun avantajları da bulunmaktadır. Örneğin; uçuşa özel rota kümeleri ve maliyet fonksiyonları girdi olarak kullanılabilir. Ayrıca özgün formülasyonda rota seçimi, dinamik rota tahsisi, bağlantılı uçuşlar, hava alanlarının kalkış ve varış kapasiteleri arasındaki bağımlılığın elde tutulması gibi değişikliklerin yapılabilmesine de olanak verir. Çalışmada bunların modele nasıl ekleneceği de verilmiştir (yani modelin bunları da içerdiği söylenebilir, sadece hesaplama zamanı gibi analizlerde bunlara yer verilmemiştir).

Mukherjee ve Hansen [47] yer beklemesine ilave olarak havada rota yenilemenin de yapılmasını sağlayan senaryo ağaçlarının kullanıldığı dinamik stokastik bir tamsayılı programlama modeli geliştirilmiştir. Tek varış havaalanı ve bu havaalanının civarındaki varış noktalarının kapasiteleri ele alınmaktadır. Her senaryonun gerçekleşme olasılığının önceden bilindiği varsayılmaktadır ve modelde bir girdi olarak ele kullanılmaktadır. Modelde, atanmış olan kalkış zamanının güncel havaalanı kapasite senaryosuna göre ve atanmış olan rotanın, yoldaki varış sabit noktalarının güncel kapasite senaryolarına göre dinamik olarak revize edilmesi sayesinde gecikmeler ve gecikme maliyetleri oldukça azalmaktadır. Parçalı formülasyon sayesinde model, adalet sorunu ve doğrusal olmayan gecikme maliyeti fonksiyonunu da hesaba katarak, çok sayıda amaç fonksiyonu barındırabilir. Modelde tamsayılı optimal çözümler LP

gevşemelerinden elde edilmiştir. Modelin eksikliklerinden bazıları; birden fazla havaalanı ve yol sabit noktalarının olduğu senaryolarda aşırı hesaplama yükü getirmesi ve sektör kapasitesini dikkate almamasıdır.

Churcill ve ark. [48] Bertsimas ve ark.'nın [49] modelini daha da geliştirmişlerdir. Onun yaklaşık olarak tüm özelliklerini taşımasının yanında geliştirilen fonksiyonu; bireysel karar değişkenlerinin yanı sıra akışları toplu halde de ele alıp rota yenileme yapmasıdır. Bu yöntemin etkinliğinin savunulmasının nedeni ise modelin Tek Avrupa Hava Sahası Hava Trafik Yönetimi Araştırmaları (SESAR-Single European Sky ATM Research) gibi kavramlardan dolayı gelecekteki hava sahasının ve hava trafik akış yönetim sisteminin getireceği değişikliklere cevap verebilecek şekilde tasarlanmış olmasıdır. Buna göre gelecekte sektörler hava sahası hacimlerine dönüştürülecek, yol kesişim noktaları azalacak ve akışa yönelik planlama gereksinimi olacaktır. Çalışmada ayrıca 3 seviyeden oluşan farklı bir hava trafik akış yönetim yaklaşımı önerilmiştir. Model çözüm önerileri; yerde bekleme, havada bekleme, rota değişikliği ve uçuş iptalidir. Uçak hızları sabit olarak ele alınmıştır. Uçuşlar bağlantılıdır. Zamanla değişen birden fazla havaalanına ait kalkış, iniş ve hava sahası kapasiteleri deterministiktir. Rotalar; sırayla kat edilecek olan hava sahası hacimlerinin sınırlarında tanımlanmış olan, kesişmeyen doğrularla (yollarla) birbirine bağlı olan birçok giriş ve çıkış düğümlerinden oluşmaktadır.

Mukharjee ve Hansen [50] uçakların toplu olarak ele alındığı, tek varış havaalanı için 3 farklı stokastik tamsayılı model geliştirmişlerdir. Bunlardan en karmaşık olanı ilk geliştirdikleri modeldir. Bu modelde her zaman dilimi için önceden verilmiş olan senaryo ağacıyla belirlenen hava durumu olasılıklarına göre dinamik olarak değişen havaalanı ve yaklaşma noktalarının kapasiteleri, kısıtları oluşturmaktadır. Model öncelikle stratejik planlama safhası için dinamik rota yenileme ve taktik planlama safhası için statik yerde bekletme çözümleri sunmaktadır. Yani yerde bekletme kararı uçağın kalkışından önce verildiği halde, rota yenileme kararı uçağın alternatif rotalara yönelebileceği ayrılma noktasına geldiği anda, güncellenmiş olan kapasite verisine göre verilmektedir. 2'inci modelin farkı ise kapasitelerin statik oluşudur, böylece bu modelde rota yenileme de statiktir. 3'üncü modelde rota yenileme yoktur sadece yerde bekletme süresi

hesaplanmaktadır. Model çözümleri hava gecikmesi de üretmektedir (havada bekleme ve alternatif rotada fazladan uçuş süresi). Her 3 model de hava sahası kapasitelerinin etkin kullanılmasını sağlamak üzere belirsizliği hesaba katma sürecini sistemleştirmesinden dolayı mevcut çalışmalara katkı sağlamaktadır. Günümüzde bunlar, akış yöneticilerinin girdi ve çıktıları otomasyon sistemi kullanmadan düzelttikleri deterministik modellere göre değerlendirilmektedir. 2'inci modelde rota yenileme ve yerde bekletme kararlarının ikisi de statik olduğundan uçuş rotaları ve kontrolör iş yükü hakkında çok yüksek miktarda tahmin edilebilirlik sağlanmaktadır. 1'inci modelde ise hava durumu ile ilişkili belirsizlikler ele alınarak daha tepkisel bir yaklaşım sunulmaktadır. Böylece gecikme maliyetleri azalmakta fakat kullanıcılar ve kontrolörler için tahmin edilebilirlik düşmektedir. Son olarak 3'üncü modelde ise rota yenileme fonksiyonundan feragat edilse de yerde bekletme kullanımı optimize edilerek terminal yollarındaki hava koşullarından kaynaklanan problemler azalmaktadır. Ayrıca bu model, diğer iki modele göre günümüzdeki CDM fonksiyonlarına en çok uyan modeldir.

Agustin ve ark. [51] ATFM problemini deterministik, 0-1 karma tamsayılı olarak modellemişlerdir. Yerde bekletme, havada bekletme, rota değişikliği ve uçuş iptali gibi çözümler bulunmaktadır. Model, uçuşların devamlılığını da barındırmaktadır. Problem birden fazla havaalanı, zamanla değişen havaalanı iniş ve kalkış kapasiteleri ile sektör kapasitelerini içermektedir. Modelin önceki çalışmalardan en önemli farkı rotaların sadece düğümler olarak değil, düğümleri birleştiren yollar olarak tanımlanmasıdır. Amaç fonksiyonu; uçuş iptal maliyeti, alternatif rotaları kullanım maliyeti, her bir düğüme her bir zaman dilimindeki varış maliyeti, her bir düğüm çifti arasındaki yolun gerçek seyahat sürelerinin planlanmış olan seyahat sürelerinden sapmanın maliyeti, toplam uçuş sürelerinin planlanmış uçuş sürelerinden farklı olmasının maliyeti, herhangi bir ceza almadan izin verilen maksimum gecikme süresini aşan uçak sayısı ve birbirinden ayrılamaz hava ve yer gecikme maliyetleri gibi çok sayıda maliyet katsayılarını barındırmaktadır. Model çok büyük çaplı problemleri bile çok hızlı bir şekilde çözmektedir (600.000 kısıt ve 300.000 değişkenli problemi 172 saniyede çözebilmektedir). Model üzerinde kalkış ve iniş bağımlılığı, uçuş iptal öncelik

sıralaması, her bir havayolu firmasının uçakları için ayrı ayrı atanabilecek maksimum yer ve hava gecikme süreleri ve dinamik olarak değişen sektör sınırları gibi değişiklikler kolaylıkla yapılabilir.

Agustin ve ark. [52] çalışmalarında bir önceki modellerinin [51] stokastik veriyonunu oluşturmuşlardır. Bu modelde havaalanı ve sektör kapasiteleri ile talep stokastiktir. Belirsizlikler senaryo ağaçları kullanılarak ele alınmıştır.

2.3. Hız Değişikliği Çözümü Sunan Modeller

Modellerin çoğu uçak hızlarını eşit ve sabit ele almakla birlikte bazı modeller uçak hızlarını değiştirebilme çözümü sunmaktadır. Bu bölümde bu çalışmalardan bazıları incelenmiştir.

Vranas ve ark.'nın çalışmasında [45] ilk defa birden fazla hava alanlı olan bir yerde bekleme problemi dinamik olarak ele alınmıştır. Zaman ilerledikçe her karar verme aşamasında değişen kapasitelere bağlı olarak yerde bekleme ve havada bekleme kararları güncellenmekte ve optimum ya da optimuma yakın çözümler sunulmaktadır. Bu çalışmada yer bekleme probleminin değişik yönlerine hitap eden birçoğu 0-1 olan salt tamsayılı programlama modelleri kurulmuştur. Uçuşlarda devamlılık söz konusudur. Kalkış ve geliş havaalanı kapasiteleri ele alınmaktadır. Modeller statik ve dinamik olan deterministik ve olasılıklı modellerden oluşmaktadır. Modeller uçuş iptali, kalkış iniş kapasite bağımlılığı, birden fazla devamlı uçuş, uçuş hızını arttırma, ilk gelene ilk hizmet algoritması gibi ek özelliklerle zenginleştirilmiştir.

Bertsimas ve Patterson'un çalışmalarında [53] ise problem deterministik, dinamik, çok elemanlı, tam sayılı ağ akış modeli olarak ifade edilmiştir. "Lagranj gevşemesi" kullanarak uçaklar toplu olarak ele alınarak problem çözülmüş, daha sonra rasgele yuvarlama sezgiseli kullanılarak uçak rotaları ayrıştırılmıştır. Son olarak da tam sayılı programlama paketleme formülasyonu ile optimale yakın çözümler elde edilmiştir. Bu algoritmanın tamamına "Lagranj Jenerasyon Algoritması" adı verilmiştir. Model birden fazla havaalanını ele alır ve rotalar kat edilecek sektörler şeklinde tanımlanmıştır. Uçuşların devamlılığı modele dahil edilmiştir. Hava durumundan dolayı sektör kapasitelerinin her zaman diliminde değiştiği problemde, gecikmeleri en aza indirmek amacıyla optimale yakın rota

değişikliği, yerde bekletme ve hız değişikliği çözümleri uygulanmaktadır. Dinamik rota tahsisinin ele alındığı ilk modeldir. Ayrıca makroskopik seviyede rota tahsisi yapılan ilk modeldir. Model A.B.D'nin güneybatı bölgesindeki uçuşların gerçek verisi üzerinde test edilmiş ve çözüme çok hızlı şekilde ulaşılmıştır. Modelin önemli bir eksiği sadece tüm uçuşların tek hava yolu işletmesine ait olduğu durum için uygulanabilir olmasıdır.

Akışların modellenmesi ve optimizasyonu üzerine son yıllarda yapılan en yeni çalışmalardan bir tanesi de Bertsimas ve ark. 2008'de yaptıkları çalışma [49] önem kazanmaktadır. Daha önceden 1998 ve 2000'de yaptıkları iki farklı çalışmadan [46, 53] ilkinin çok sayıdaki fonksiyonları ile ikincisinin matematiksel özelliğinden kaynaklı yüksek hesaplama hızını birleştirerek çok daha etkin bir model önermişlerdir. Problem birden fazla hava alanlı, çok periyotlu, bağlantılı uçuşlu, tam sayılı, çok kapasiteli, çok çözümlü, sektör bazlı rota kullanarak ve deterministik olarak modellenmiştir. Model hava durumuna göre zamanla değişen tüm sektörlerdeki kapasiteleri ve havaalanlarının iniş, kalkış kapasitelerini dikkate alarak yerde bekletme, havada bekletme, hız değişikliği ve rota değişikliği gibi birçok çözümü gerçekçi büyüklükteki problemler için çok kısa bir sürede hesaplamaktadır. Model 30 havaalanı, 145 sektör, 22 zaman dilimi, %80'i bağlantılı olan 6475 uçuş için 570.000 kısıt, 305.000 değişkenli bir problem üzerinde test edilmiş ve 15 dakikada çözüme ulaşılmıştır. Uçuş bağlantıları toplu - dağıt sistemine göredir (yerel hava alanları bağlantılı değildir). Model hiçbir ek değişken getirmeden, sadece ek kısıtlar kullanılarak yerel olarak rota değişiklikleri yapılmasını sağlamaktadır. Modelde gecikmelerin uçaklara adil şekilde dağıtılması da sağlanmaktadır. Rota sırasıyla kat edilecek sektörleri ifade etmektedir.

Bertsimas ve ark. 2011 yılında yaptıkları son çalışmalarında [61] yerde bekletme, havada bekletme, rota değişikliği ve hız değişikliği çözümlerinin kombinasyonlar halinde üretildiği bir tamsayılı programlama modeli geliştirmişlerdir. Deterministik olarak havaalanı kalkış ve iniş kapasiteleri ile sektör kapasiteleri mevcuttur. Birden fazla hava alanlı ve birden fazla periyotludur. Uçak rotaları hava yollarından değil sırasıyla kat edilecek olan sektörlerden oluşmaktadır. Modelde uçuşların devamlılığı da temin edilmektedir.

Uçakların maksimum uçuş süreleri de kısıtlanmıştır. Modelde Bertsimas ve Patterson'un 1998 yılındaki çalışmalarında [46] sundukları modelin sahip olduğu çözüm seçenekleri sayısı bakımından esnekliği ile 2000 yılındaki çalışmalarının [53] güçlü matematiksel özellikleri bir araya toplanmıştır. Bu modelde 1998 yılında hazırladıkları modelin [46] aynı karar değişken yapısı kullanılmaktadır. Bertsimas ve ark.'nın 2008 yılında yaptıkları çalışmada [49] yer alan modelden farklı olarak her bir havaalanı kapasitesinin kalkış ve inişler için dengeli bir şekilde paylaşılması da sağlanmıştır. Amaç fonksiyonu havada ve yerde gecikme maliyetini düşürmeye yöneliktir. Ayrıca gecikmelerin uçaklar arasında adil şekilde dağıtılmasını da sağlamak amaçlanmıştır. Modelin önemi geniş çaplı çözümler kümesi barındırıp aynı zamanda Amerika'yı kapsayacak kadar büyük çaplı problemlerin bile çözümünü kısa sürede hesaplayabilmesidir. 30 havaalanı, 145 sektör, 22 zaman dilimi, 6475 uçuşa sahip senaryoda 570.000 kısıt, 305.000 karar değişkeni oluşan modelin hesaplama süresi ortalama 743 saniyedir.

2.4. Uçuş Seviyesi Değişikliği Çözümü Sunan Modeller

Üzerinde en az çalışılan çözüm türlerinden biri uçuş seviyesi değişikliğidir. ATFM üstündeki modelleme çalışmalarında çözümler genellikle yatay düzeyde ele alınmaktadır. Çok az sayıdaki seviye değişimini içeren modellerden bazıları bu bölümde incelenmiştir.

Barnier ve Brisset [62] ayırmaları temin etmek için uçak akışlarına uçuş seviyeleri tahsis problemini ele almışlardır. Bu problem NP-hard olarak bilinen grafik renklendirmeli problem olarak ifade edilebilir. Bu çalışmalar önceden tanımlanmış direkt rotalarla sınırlandırılmıştır, bu nedenle her bir uçuş için bir tek sabit rota vardır, bu rota kalkış havaalanı ile varış havaalanı arasındaki tek doğru parçasıdır. Bu model parçalı hava yolu ağından oluşan mevcut operasyonlara ve planlama sistemine değil, uçakların iki havaalanını birleştiren en kısa yolu kullanabilecekleri, en az maliyetli olan, ideal sistem için uygundur (yani sektörsüz hava sahası kavramı). Ayrıca her uçuş ayrı ayrı hareket halindeki birer uçak olarak modellenmemiş, bunun yerine o rotayı meşgul eden uçakların tamamını ifade eden tek bir akış olarak görülmüştür. Uçak rotaları kesiştiğinde uçakların seviyesi

değiştirilerek problem çözülmektedir. Bunun için zaman faktörü hesaba katılmamıştır.

Nace ve ark. [63] hem rota hem de uçuş seviyelerini belirleyen dinamik, karma tam sayılı doğrusal programlama modeli tasarlamışlardır. Modelin özgünlüğü, hava sahası tıkanıklıklarını önlemek için, hava sahasını kullanan uçak sayısını kısıtlamak yerine, hava sahasındaki uçak çatışma sayısını kısıtlamasıdır. Model günümüz uygulamalarının dayandığı sektörel bazda trafiğin kontrol edilmesi yerine, Duong ve ark. [64] tarafından sunulan kapıdan kapıya (havaalanından havaalanına) olan uçuş rotalarının her birindeki trafiğin ayrı bir kontrolör tarafından kontrol edildiği sektörsüz hava sahası kavramına uymaktadır. Model için bir algoritmayla planlanmış rotaya alternatif en kısa olan iki rota daha hesaplanmakta, bu rotalardan (dikey ve yatay) en az maliyete sahip olanı seçilmek üzere kesişen rotalardaki ilgili yolu (düğüm çiftleri arası hatlar) aynı zamanda kullanması sonucunda çatışmaya giren uçak sayısı azaltılmaktadır (yani rotaları kesişen uçaklar yatayda ve dikeyde dağıtılarak, rotaları kesişen uçak sayısı azaltılmaktadır). Ele alınan rotalar sadece önceden belirlenmiş olan olası çatışmaların olduğu sahadaki düğümler arası hatlara indirgenmiştir. Her bir kalkış ve varış havaalanı çifti için tek bir anda en çok bir uçağın atandığı varsayılmaktadır. Bu seviye tahsis problemi telekomünikasyon optik ağlarındaki dalga boyu rota tahsis problemlerine oldukça benzemektedir.

2.5. Ölçüm Çözümü Sunan Modeller

A.B.D’de, ATFM’de bir çözüm stratejisi olan uçakların sektör sınırları, veya belirli sabit noktalarda sıralanıp, belli mesafeler bırakılması işlemi olan ölçüm (MIT ve MFT) üzerinde yapılan çok fazla modelleme çalışmasına rastlanmamıştır. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Bloem ve ark. çalışmalarında [65] MIT için 4 adet makine öğrenme algoritması sunmuşlardır. Önerdikleri algoritmaların bir karar destek sistemiyle kullanılması sayesinde trafik yöneticileri o anda hangi MIT değerini kullanmaları gerektiğini olasılıklı görebileceklerdir. Algoritmalar girdi olarak güncel hava trafik talebi, güncel hava durumu, güncel havaalanı pist konfigürasyonları, gibi toplam 18 hava trafik kısıtlamalarını kullanarak, geçmiş MIT değerleri

kayıtlarından öğrenerek MIT'lerin olasılık değerlerini hesaplarlar. Amaç fonksiyonu beklenen MIT maliyetini düşürmeyi sağlamaktadır. Rasgele orman, karar ağacı, temel destek vektör makinesi, uyarlanmış softmax regresyon algoritması isimli bu algoritmalarından, karar ağacı algoritması en düşük maliyet ve en yüksek doğrulukla, en yüksek performansı sergilemiştir.

Wang ve ark. [66] çalışmalarında ayrık olay (discrete event) simülasyonlarında kullanıma uygun bir yinelemeli (recursive) MIT ceza fonksiyonu sunmuşlardır. Bu fonksiyon sayesinde sektör sınırını ya da sabit noktayı kat eden ardışık uçaklar arasında belli bir mesafe bırakılması sağlanmaktadır. Simülasyonda kullanılan bu yinelemeli fonksiyon sayesinde her bir gecikmenin diğer uçuşlar üzerindeki gecikmelere olan etkisi gözlemlenebilmektedir. Hava sahasında yığılma olan noktalar tespit edilebilmekte, herhangi bir ATFM stratejisinin etkileri gözlemlenebilmektedir.

Uçakları sıralamak ve aralarında belli bir mesafe oluşmasını (zaman aralığı) sağlamak üzere varış tahmini çözümlerini sunan hali hazırda bir otomasyon sistemi Amerika'da kullanılmaktadır. Bu sistem Merkezi Terminal Radar Kontrol Otomasyon Sistemi'nin (CTAS) Trafik Yönetim Aracı'dır. Bu araç terminal sahasına gelen uçakların tahmini varış zamanlarına göre, uçakları ilk gelene ilk hizmet kuralı doğrultusunda doğru bir şekilde ve yeterli aralıklarla sıralanmasını sağlamak üzere terminal sahası girişindeki dış ölçüm yayları ve ölçüm noktaları ile terminal sahası içindeki son yaklaşma noktası ve pist eşiğine olan varış zamanlarını hesaplamaktadır. Uçaklar arasındaki mesafe ise TRACON kabul oranı, ölçüm sabit noktası kabul oranı, kapı kabul oranı, havaalanı kabul oranı, pist kabul oranı, kuyruk türbülansı ayırma miniması, vb. birçok akış kısıtını karşılayacak şekilde hesaplanır. Trafik yönetim aracı sahip olduğu hesaplama ve gösterim kabiliyetleri sayesinde, trafik yönetim koordinatörlerinin TRACON ve varış havaalanının kapasitesini aşmayacak bir planlama yapmasına ve merkez yol kontrolörlerinin de bu plan doğrultusunda uçakları kontrol ederek, yaklaşma kontrole ilgili devir noktasında bu sırayla ve zamanlarda göndermesine yardımcı olmaktadır. CTAS'ın ayrıca kontrolörün bu taktik görevine yardımcı olmak için de Yol Alçalma Tavsiye Sağlayıcı adında bir aracı daha mevcuttur. Bu araç ise trafik yönetim aracından aldığı planları uygulamak üzere aynı zamanda uçakları

çatışmalardan kaçındıracak şekilde kontrolöre uçakların hız, irtifa ve uçuş başını değiştirme önerileri sunmaktadır. Merkez kontrolörleri tarafından uygun sıra ve mesafelerle gönderilen uçakların kontrolünü devralan TRACON kontrolörlerine yardımcı olmak içinse Son yaklaşma Ölçüm Aracı adındaki CTAS'ın diğer bir aracı mevcuttur. Bu araç ise son yaklaşma noktasına uçakları uygun sıra ve mesafelerde (zaman aralıklarıyla) getirebilmek için uçaklara uygun pistin atanması, hız ve uçuş başı değişim önerileri sunmaktadır. CTAS'ın kullanıcı tercihli rota belirleme/Alçalma Tavsiye sağlayıcı Çatışma Aracı sayesinde yol kontrolörleri uçak çatışmalarını 20 dakika önceden görüp önleyebilmektedir. Bu araç 4 boyutlu uçak rotalarını deterministik olarak tahmin edip, olasılıklı olarak çatışma tespit analizi yapmakta ve çatışmadan kaçındıracak rota önerisi yapmaktadır. CTAS'ın daha kavram geliştirme safhasında olan diğer bir aracı da Hızlı Kalkış Yolu aracıdır. Bu araç ise kalkış uçaklarının yol kontrole doğru sıra ve aralıklarla gönderilmesine yardımcı olmaktadır. CTAS hakkında detaylı bilgiye ilgili adresten [67] ulaşılabilir. Ayrıca benzer amaçlarla Avrupa'da geliştirilen Kalkış Yöneticisi [68] ve Varış Yöneticisi [69] isimli araçlarda mevcuttur.

2.6. Çatışma Önleme Çözümü Sunan Modeller

Sadece çatışmaları ele alan çalışmalar uzun yıllardır yapılmakla birlikte, bunların çoğu Serbest Uçuş Kavramına (Free flight) yönelik olan iki uçaklı, gerçek zamanlı çatışma çözüm modelleridir. Bunların arasında çok sayıda uçak için çoklu çatışmaları çözen modellerde bulunmakta fakat ATFM kısıtlarını barındıran modeller çok azdır. Çalışmanın devamında bunlardan bazıları incelenmiştir.

Mao ve ark. [70] sistem çapında çatışma çözümü amaçlı bir karma tamsayılı programlama modeli geliştirmişlerdir. Bu model dairesel bir hava sahasının ortasında 90 dereceyle kesişen iki akışta yer alan uçakların birbirine belirli bir mesafenin altında yaklaşmalarını önlemek amacıyla, uçakların uçuş yönünü değiştirmekte, ya da yanlamasına pozisyonunda kaydırma yapmaktadır. Bu çözümlerle uçağın pozisyonu ancak belli sınırlar içinde kalacak şekilde değiştirilebilmekte, çözüm sonunda ek çatışma meydana gelmemektedir. Bu model havaalanı, yol ve hava sahası gibi kapasite kısıtlarını dikkate almamakta,

kalkış ve iniş zamanlarıyla ilgilenmemekte, tek bir nokta çatışan iki akışa sahip bir hava sahasında uçakları ayırmayı amaçlamaktadır. Modelle serbest uçuşa yönelik olarak uçakların bu ayırmaları zeki sistemler vasıtasıyla kendi kendilerine gerçek zamanlı olarak yapması hedeflenmektedir. Fakat merkezi karar verme amaçlı olan bir matematiksel model de sunmuşlardır.

Dell'Olmo ve Lulli çalışmalarında [71] serbest uçuş kavramına uygun olması amacıyla çatışma çözümünü de içinde barındıran iki seviyeli hiyerarşik bir hava trafik akış modeli önermişlerdir. İlk seviye tam sayılı çok elemanlı dinamik ağ akış modelinden oluşmaktadır. Rotalar saha seyrüseferi yapmaya uygun olan, yol noktalarını birleştiren ayrıtlardır. Bu modelin çıktıları diğer seviye olan “tek havayolu” modelinin girdisini oluşturmaktadır. İlk modelde her uçağın planlanan kalkış, düğümler arası yolları kat ediş ve iniş zamanları ile gerçekleşen zamanlar arasını en aza indirmek amaçlanmaktadır. Bu amaçla uçakların optimum kalkış zamanları, her ayrıtı kat ediş zamanları ve iniş zamanları hesaplanmaktadır. Yolların kullanımında; uçak performansına dayalı olarak her bir ayrıtın kat edilmesi için minimum ve maksimum süre kısıtları vardır. Böylelikle uçakların hızları değişkenlik göstermektedir. İlk modelin çıktıları ikinci modelde çatışma çözümü yapmak üzere kullanılmaktadır. İkinci modelin amacı, uçakların uzunlamasına, yanlamasına ve dikeyde birbirlerine belirli olan sabit ayırma minimalarının altına düşmeyecek şekilde yükseklik, yanlamasına ayırma amaçlı yol değişimi (yol ağındaki sabit yolun değişimi değil, ordinatının değişimi yapılmakta, böylece uçaklar paralel de uçabilmektedir), uzunlamasına ayırma (apsis değişimi) için hız değişimi gibi çözümler sunmaktadır, bunları gerçekleştirirken aynı zamanda belirli maliyet katsayıları kullanılarak en az sayıda ve ölçüde dönüş manevrası gerçekleştirmeleri, en az maliyetli seviyede ve hızda uçmaları amaçlanmaktadır. Eğer ilk modelin çıktıları ikinci modelin kısıtlarını sağlayamayacak kadar yoğunluk yaratıyorsa, tekrar ilk modele dönülüp yoğunluk olan ayrıtlara bir kapasite kısıtı eklenerek, o ayrıttaki trafik yoğunluğu azaltılacak şekilde ilk model tekrar çalıştırılıp uçuşlar yeniden planlanır. Devamında tekrar ikinci modele geçilir ve bu döngü tüm kısıtlar sağlanana kadar bu şekilde devam eder. Problem NP-hard olduğundan, büyük çaplı problemlerin çözümünde ve kısa sürede sonuca ermek için sezgisel algoritma kullanılmak zorunda kalınmıştır. Bu

algoritma ilk gelene ilk hizmet kuralına göre oluşturulmuştur. Modelde kapasite kısıtı, sadece serbest uçuş ayırma kriterlerini sağlayacak şekilde ayrıt kapasitelerinin düzenlenmesinden ibarettir. Model mevcut sabit yol ağı sistemine göre planlanan hava trafik akış yönetim fonksiyonuna değil, uçak hızlarının ve yollarının pilot tarafından gerçek zamanlı olarak seçilebildiği serbest uçuş kavramına uyabilecek bir çalışmadır.

Sherali ve ark. 2003 yılındaki çalışmalarında [72], 2002 yılındaki çalışmalarında [73] yer alan “hava sahası planlama modelinin” gelişmiş versiyonu olan “hava sahası planlama ve ortaklaşa karar verme” adını verdikleri bir karma tamsayılı programlama modelini tanıtmışlardır. Uçuş emniyeti, kontrolör iş yükü ve hava yolu firmaları arasında eşitlik gibi hedefleri gözeterek, yakıt ve gecikme maliyetlerini azaltacak şekilde uçakların alternatif uçuş planları arasından seçim yapılması sağlanmaktadır. Bu alternatif uçuş planlarının birbirinden farkı uçakların kalkış/varış zamanları, uçuş seviyeleri ve rotalarıdır. Model birçok alt modellerden oluşmaktadır. İlk model 2000 yılındaki çalışmalarında [74] geliştirilmiş olan “hava sahası meşguliyet modelidir”. Bu model uçakların tüm yörüngelerini tahmin edip, hangi sektörü ne kadar süre meşgul ettiklerini ve maksimum izlenme yüklerini hesaplamaktadır. Bu nedenle sektörlerdeki uçakların emniyetli şekilde izlenmeleri ve yönlendirilmeleri ile ilişkili bir maliyetin yüklendiği doğrusal olmayan bir iş yükü fonksiyonu kullanılmaktadır. Daha sonra “olasılıklı uçak çatışma modeli” ile uçakların etrafında olduğu varsayılan dikdörtgen şeklindeki koruma bölgelerinin olası çatışmalarını tespit etme amacıyla uçak çiftleri arasında bir çatışma analizi yapılmaktadır. 2002 yılındaki çalışmalarında [73] sunulan deterministik modelden farklı olarak bu modelde uçakların yörüngelerinin pilot, seyrüsefer ya da rüzgar nedeniyle rassal hata payları olduğu varsayılmaktadır. Uçak koruma bölgelerinin olası çatışmalarında önceden belirlenmiş belli eşik değerlerinin altında birbirlerine yaklaşacakları öngörülüyorsa uçuş planları kesin olarak değiştirilmekte, fakat eşik sınırını aşmayan olası çatışmalarda ise uçuş planı değiştirilmeyip, problem çözülebilir şeklinde nitelenip, sektör iş yükü kapasite kısıtınca değerlendirilmektedir. 3’üncü modül, sektör meşguliyeti ve çatışma çözümü kısıtlarına ek kısıt ve cezalar getirerek kontrolör iş yükünü azaltmayı sağlamaktadır. Örneğin; her bir sektörde

aynı anda oluşan çözülebilir çatışma sayısı sınırlanmakta, çatışmaların oluşmalarından önce kontrolöre bunları farkedip, çözebileceği kadar bir tepki süresi temin edilmekte, sektör içinde aynı anda uçan uçak sayısının sektör kapasitesini aşması engellenmekte, sektörlerin ortalama iş yükü ile en yüksek iş yükü arasındaki farkın azaltılması sağlanarak iş yükü miktarlarındaki dalgalanmalar azaltılmaktadır. Son modülde ise gecikmeler, rota değişiklikleri ve uçuş iptalleri nedeniyle oluşan ek maliyetlerin hava yolu firmaları arasında ortaklaşa karar verme bağlamında adil şekilde dağıtılmasını amaçlanmaktadır. Burada kullanılmak üzere her hava yolu firması için yakıt ve gecikme maliyetlerine dayalı olan “işbirliği verimlilik” kavramı tanıtılmıştır. Birkaç farklı adalet stratejisi daha ele alınmıştır. Tüm modellerdeki işlemler tamamlanınca optimizasyonu temin etmek için alternatif uçuş planları ile bu döngü tekrar edilir. Modelde kullanılan adalet fonksiyonu FCFS ya da sıkıştırma algoritması gibi genel kabul görmüş bir yöntem olmayıp kendi geliştirdikleri bir fonksiyondur. Ayrıca çatışma tahminleri mevcut ayırma standartlarına göre değil, kendilerine özgü kriterlere göre yapılmaktadır. Model özellikle bazı sektörlerin hava durumu gibi nedenlerle kullanıma kapatılması durumunda kontrolörler için taktik safhada alternatif uçuş planları hazırlamalarında yardımcı olabileceği gibi stratejik seviyede planlamaya da uygundur. Örneğin; hava trafik ayırma standartlarının analiz edilip geliştirilmesinde, hava trafik kontrolörü iş yükü kısıtlamalarının değerlendirilmesinde, yeniden sektörleme stratejilerinin değerlendirilmesinde, beklenmedik durumların planlanmasında, uzay üssü konumunun planlanmasında ve adalet sorununa yeni bir yaklaşım getirmede kullanılabilir.

Sherali ve ark. 2006 çalışmalarında [75] ise 2003 yılındaki çalışmalarında [72] kurdukları modelin çeşitli tahmini parametrelerini ve yakıt, gecikme ve uçuş iptal maliyetlerini gösteren maliyet modelini geliştirmişler ve gerçek ETMS (Geliştirilmiş Trafik Yönetim Sistemi) verisine dayalı olarak gerçekleştirdikleri model çözüm testinin sonuçlarını göstererek hassasiyet analizleri yapmışlardır.

Le Ny ve Pappas [76] çatışma çözümü ile hava trafik akış yönetiminin ölçme fonksiyonunu bir arada ele alan bir geometrik programlama modeli sunmuşlardır. Bu çalışmada bir sektör içindeki uçakların uçuş başı ve hızı değiştirilerek, çatışmaya girmeleri önlenmekte ve sektör sınırlarında belli

aralıklarla sıralanmaları sağlanarak ATFM'in ölçme fonksiyonu yerine getirilmektedir. Bunları yaparken de planlanmış uçuşundan en az sapma olması amaçlanmaktadır.

Ayuso ve ark. [77] sistem çapında çatışmadan kaçındırma için iki tane doğrusal tam sayılı model önermişlerdir. İlki sadece seviye değişikliği çözümü sunan saf 0-1 tam sayılı programlama modelidir, ikincisi ise hem seviye değişikliği hem de hız değişikliği çözümü sunan karma 0-1 tam sayılı programlama modelidir. Modellerin amacı çatışma olan uçakların çatışmalarını çözmek üzere tırmanma ve alçalma miktarını ve hız değişimini azaltarak uçakların uçuş planlarında mümkün olduğunca az değişiklik yapmaktır. Modeller hava sahasındaki birçok uçağın bulunduğu problemi hızlı şekilde çözebilmesi sayesinde gerçek zamanlı olarak kullanılabilir. Problemden standart hava trafik akış yönetim probleminde bulunan kapasite kısıtları mevcut değildir, sadece hava sahasındaki çatışmaları önleme amaçlı seviye değişimi ile hız değişimi çözümleri sunmaktadır.

Bundan sonraki bölümde çalışmanın esasını oluşturan bir matematiksel optimizasyon modeli sunulacaktır.

3. YERDE BEKLETME ÇÖZÜMÜ SUNARAK ÇATIŞMALARI ÖNLEYEN OPTİMİZASYON MODELİ

Hava trafik yönetim sistemindeki emniyet, etkinlik ve verimlilik gibi problemlerin çözümü bu çalışmada, ATFCM'in taktik safhası kapsamında ele alınmıştır. Çözüm yaklaşımı olarak matematiksel modelleme ve optimizasyon yaklaşımı kullanılmıştır. Oluşturulan 0-1 tam sayılı programlama modeli ile hava alanlarının kalkış ve iniş kapasitelerinin aşılması ve uçak çatışmalarının oluşması engellenmektedir. Bunu, uçak kalkış zamanlarını toplamda en az gecikme getirecek şekilde belirleyerek gerçekleştirmektedir. Talep kapasite dengesini sağlamak üzere trafik akışları planlanırken, uçak çatışmalarının da ele alınması ve bu çatışmaların güncel hava trafik ayırma prosedürlerine göre tanımlanması modeli, hava trafik akış ve kapasite yönetim sistemine daha kolay uyarlanabilir kılmaktadır. Geliştirilen model gözetim sistemi olmayan hava sahalarında veya gözetim sistemi kayıpları olan zaman dilimlerinde kısa vadeli hava trafik akışlarının yönetimi için kullanıma uygundur. Gözetim sistemine sahip hava sahalarında kullanımı durumunda ise çatışma koşullarının bu sahalar için kullanılan ayırma mesafelerine göre daha büyük tanımlanmış olması nedeniyle verimlilikte düşüş, fakat emniyet seviyesinde artış getirmesi beklenmektedir.

Bu amaçla oluşturulacak modelin seçimi için ise hava trafik akış yönetim probleminin yapısı doğru şekilde ortaya konulmalıdır. Problem yapısı şu şekilde incelenebilir:

- Problemden büyük miktarda belirsizlikler mevcuttur. Belirsizlik kaynaklarından bazıları; uçuş iptalleri, uçuşlardaki şirketlere ait gecikmeler (tarifeye uyulmaması), uçuş yörüngelerinin belirlenmesi için kullanılan modellerin yetersizliği ve en önemlisi de meteorolojik koşullardır. Bu nedenle en önemli kısıtlar olan hava sahalarının, hava yollarının, hava alanlarının kapasiteleri ve uçuş taleplerinde belirsizlikler yaşanmaktadır. Yapılan planlamalar uçuşların gerçek hareketleri ile uyuşmamaktadır. Problemi stokastik (olasılıklı) olarak modellemek en uygun yöntem gibi görünmesine rağmen, hava durumu tahminleri etkin bir planlama yapmak için yeterli süre önceden ve yüksek doğrulukta

yapılamadığından böyle bir modelleme hatalı sonuçlar doğurabilir. Ulusal Bilimler Akademisine (National Academy of Sciences) göre 2 ila 5 saat sonrası için yapılan hava tahminlerinin doğruluğu “çok düşük” seviyededir [78]. Bu durumda belirsizliklerden kaynaklanan önceden ön görülemeyen gecikmeler yaşanmaktayken, bir de yetersiz doğruluktaki tahminlere göre modelleme yapılırsa, gecikmelerin daha da artması kaçınılmaz olacaktır. Ayrıca tasarlanan model kısa süreli taktik akış yönetimi için kullanılması düşünüldüğünden, bu zaman diliminde belirsizlikler daha azdır. Bu nedenle ele alınacak problemin deterministik olarak modellenmesi daha uygun bulunmuştur.

- Kapasite ve talebin sabit olmadığı, sürekli ya da ara ara değişiklik göstermesinden dolayı kapasite talep dengesini sağlamak için değişen bu koşullara ait bilgiler güncellenmek zorundadır ve bu da dinamik kapasite yapısında bir modeli zorunlu kılmaktadır. Statik kapasitelerin ise sistemi temsil kabiliyetinin düşüktür.
- Literatür araştırmasına göre uçakların toplu ya da ayrı elemanlar olarak ifade edildiği görülmektedir. Esasen her iki yaklaşımın kendine özgü avantaj ve dezavantajları olduğundan her ikisinin de kullanımı faydalıdır. Birisi stratejik planlama seviyesinde diğeri ise taktik seviyede kullanımı avantaj sağlayabilir. Bu çalışmanın asıl hedefi ise taktik seviyedeki planlama faaliyeti olduğundan, her uçak ayrı bir eleman olarak ele alınarak 0-1 tamsayılı programlama tekniği kullanılmıştır. Taktik safhanın seçilme nedeni, stratejik planlamaların uzun vadeli bir süreci içermesinden dolayı aşırı miktarda belirsizlik barındırması nedeniyle optimizasyon modelinden çok daha doğru bir yaklaşım ve gereksinim olan simülasyon, istatistiki verilerin analizi gibi yöntemlerle desteklenecek olan tecrübeli-iyi eğitilmiş-yetenekli insan gücünü gerekli kılmasıdır. Bu konuda bir modelleme yapılacaksa yapay zeka teknolojilerine dayalı sistemler tasarlamak daha faydalı olacaktır.
- Sistemin genel olarak amaçları ve kısıtları incelendiğinde (maliyet, hız, emniyet, etkinlik, kapasite, talep), temsil kabiliyeti yüksek bir modelin doğrusal bir yapıda olamayacağını anlaşılmaktadır. Fakat çalışmanın

amacı doğrultusunda doğrusal programlama yaklaşımı bu aşamada yeterli görünmektedir.

- Problemin genel olarak birden fazla amacı vardır. Bunlar; emniyetten taviz vermeden hava trafik akışlarını hızlandırmak, kapasiteyi arttırmak, gecikmeleri azaltmak ve uçuş maliyetlerini düşürmektir. Modelde uçuş emniyetini sağlamak için ayırma mesafesini temin eden kısıtlar belirlenmiş, toplamda en az gecikme sağlayacak şekilde de tek bir amaç fonksiyonu tanımlanmıştır.

Bu amaçla kurulan matematiksel modelin yapısını oluşturan, üzerine inşa edildiği öğeler olan girdiler, çıktılar, varsayımlar, karar değişkenleri, kısıtlar, amaç fonksiyonu, modelin formülasyonu ve modelin uygulandığı örnek hava sahası ve senaryo ile çözüm sonuçlarının analizi bu bölümde yer almaktadır.

3.1. Girdiler

Bu çalışmada oluşturulan matematiksel modelde kullanılan tüm girdiler ayrı başlıklarda incelenmiştir. Bu girdiler hava sahası, kapasite, talep, ayırma minimaları ve maliyet olmak üzere beş ana sınıfa ayrılmaktadır.

3.1.1. Hava sahası girdileri

Aşağıda hava sahasıyla ilgili girdiler liste olarak verilmiştir:

- a. Düşümlerin (VOR/DME istasyonları) isimleri veya numaraları:
 - i. tüm düşümler
 - ii. karşılıklı rotaların kesiştiği düşüm
 - iii. havaalanı düşümleri
- b. Ayırılar (Hava yolları):
 - i. ayırıların hangi düşüm çiftinden oluştuğu,
 - ii. ayırıt uzunlukları (uçuş süresi türünden).
- c. Uçuş rotaları (kalkıştan inişe kadar sırayla kullanılan tüm düşümler):
 - i. doğu yönlü rotalar kümesi,
 - ii. batı yönlü rotalar kümesi,
 - iii. karşılıklı rotalar.

d. Kullanılabilir seviyeler (batı ve doğu yönlü).

Bu girdilerden düğümler; VOR/DME seyrüsefer yardımcılarının ve hava alanlarının pozisyonunu ve ismini belirten noktalardır. Bu noktalardan karşılıklı rotaların kesiştiği düğümlerin, model çözülmeden önce hava sahasının analiz edilip belirlenmesi ve kaçınıcı düğüm olduğunun belirlenmesi gerekir.

Ayrıtlar; iki düğümü birleştiren doğru parçasını, yani yolları (hava yollarını) ifade etmektedir. Hava yolları iki seyrüsefer yardımcısını birleştiren koridorlardır. Buna göre ilk düğüm yolun başlangıç noktasını, ikinci düğüm ise yolun son noktasını ifade eder. Ayrıtların hangi düğümlerden oluştuğunun yanı sıra bunların uzunluklarının da belirlenmesi gerekir. Modelde uzunluklar, o mesafeyi kat ediş süresi türünden ifade edilmektedir. Çünkü tüm uçak hızları aynı kabul edilmiştir ve model deterministik olduğu için bu kullanım bir hata oluşturmamaktadır.

Rotalar; uçakların kalkıştan inişe kadar olan tüm uçuşları boyunca sırasıyla kat ettikleri tüm düğümleri (ya da ayrıtları) ifade etmektedir. Modelde iki havaalanı arası en kısa uçuşu sağlayacak şekilde sırasıyla kat edilecek düğümler rotalar olarak belirlenmiştir. Uçakların uçuş planı ancak bu ayrıtlar arasından seçtikleri birer rotadan oluşmak zorundadır. Tüm uçaklar için ilk düğüm kalkış havaalanını, son düğüm iniş havaalanını, ara düğümler ise VOR/DME istasyonlarını ifade eder. Modelleme kolaylığı açısından her bir uçağın rotasının eşit sayıda düğümden oluştuğu kabul edilmiştir. Daha sonra hava sahası Uluslararası Sivil Havacılık Anlaşmasının 2. Ekine göre [79] analiz edilip rotaların yönü belirlenmelidir. Zaten farklı yönlerdeki rotaları kullanan uçaklar aynı seviyede uçamazlar. Kuzey 0 (ya da 360) dereceyi ifade edecek şekilde, doğu 90 derece, güney 180 derece, batı 270 derece olarak ele alınmakta, 0 ile 179 dereceler arası doğu yönlü uçuşları ifade eder ve bunlar tek binli seviyelerde uçmak zorundadır, 180 ve 359 arası dereceler ise batı yönlü uçuşları ifade eder ve bunlar çift binli seviyelerde uçmak zorundadır. Örneğin uçak 100 derecelik bir uçuş başıyla uçuyorsa kullanabileceği seviyeler 270 (27.000 feet), 290, 310, gibi seviyelerdir. Eğer 200 gibi bir batı yönlü uçuş başıyla uçuyorsa kullanabileceği seviyeler 300, 320, 340, vb. seviyelerdir. Ayrıca rotalardan hangilerinin 90 dereceden fazla bir açıyla birleştiği, yani hangilerinin karşılıklı olduğu veya

ayrıldığı tespit edilmelidir. Böylece ilgili rotaları kullanan uçaklar arasında karşılıklı ayırma prosedürleri kullanılabilecektir.

3.1.2. Kapasite girdileri:

Toplam iki ana sınıfta ele alınan kapasite girdileri aşağıda liste halinde verilmiştir:

- a) Hava alanlarının kalkış kapasiteleri
- b) Hava alanlarının iniş kapasiteleri

Havaalanı kapasitesi; birim zamanda ilgili havaalanını kullanabilecek olan uçak sayısıdır. Bu kapasiteler kalkış yapabilecek ve iniş yapabilecek uçaklar için ayrı ayrı belirlenebilir. Bu modelde de bunlar bu şekilde belirlenmiştir. Her iki operasyon tipinin de birbirinden bağımsız olduğu kabul edilmiştir. Bu da aralarında belli mesafeler bulunan paralel pistlere ve bağımsız kalkış ve iniş prosedürlerine sahip hava alanları için geçerli bir uygulamadır. Her bir havaalanının kalkış için ve iniş için kapasiteleri kısıtlı olmakla birlikte; bu kısıtlı kapasiteler hava durumu, havaalanı onarımları gibi nedenlerle her zaman diliminde aynı da olmayabilir. Model deterministik olarak ele alındığı için, bu kapasite değerlerinin önceden doğru bir şekilde tahmin edildiği kabul edilmektedir.

3.1.3. Talep girdileri

Talep girdileri modelde kullanılmak üzere her bir uçakla ilgili gerekli tüm verileri ifade eder. Bunlar aşağıda sıralanmıştır:

- a) Uçuşun ismi (çağrı adı)
- b) Kalkış havaalanı adı/numarası
- c) Planlanan kalkış zamanı
- d) İniş havaalanı adı/numarası
- e) Planlanan iniş zamanı ya da planlanan uçuş süresi
- f) Planlanmış olan rota (belli sıradaki ayrıtlardan oluşur)
- g) Rotadaki her bir düğüme varış zamanı

- h) Planlanmış olan uçuş seviyesi (Doğu yönlüler tek binli seviye, Batı yönlüler çift binli seviye)
- i) Rotaları karşılıklı olan uçuşlar ve hangisinin hangi rotayı kullandığı.

Her bir uçağın hızları aynı ve uçuşu boyunca da değişmediği kabul edildiği ve bekleme çözümleri sadece yerde gerçekleştirileceği için modelin çözümü sonucunda her bir uçağın uçuş süresi planlandığından farklı çıkamaz. Her bir uçaktan sadece rotası ve kalkış zamanı girdisi alındığı takdirde, her bir yolun uzunluğu uçuş süresi cinsinden bilindiğinden her bir düğüme varış zamanı, iniş zamanı gibi zamanla ilgili girdiler hesaplanıp modele eklenebilir.

Modelde uçakların uçuş seviyelerinin toplam iki tane olduğu kabul edilmiştir. Doğu yönlülerin hepsi birbiriyle aynı seviyede, batı yönlülerin de hepsi birbiriyle aynı seviyede olmak üzere iki farklı seviyede uçuşlar planlanabilmektedir. Aynı seviyede olan uçuşların ayırmaları kendi arasında yapılmaktadır. Bu nedenle doğu ve batı yönlü uçuşlar birbirini etkilememektedir.

Modelde karşılıklı rotaları kullanan uçakların bu rotalardan hangisini kullandıkları da belirlenip bir girdi olarak verilmiştir.

3.1.4. Ayırma minimaları girdileri

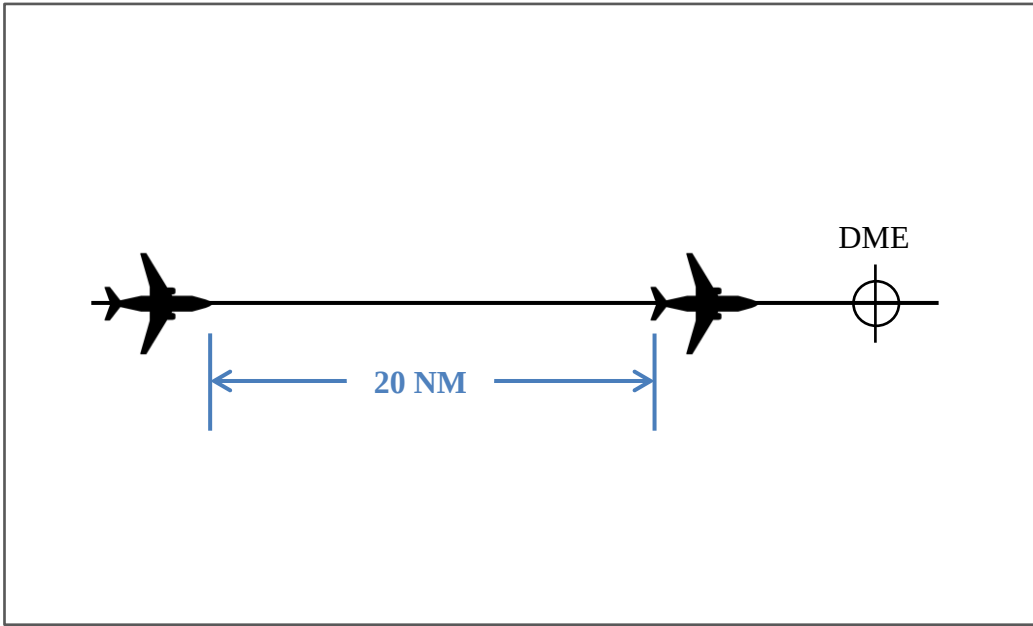
Toplam 3 çeşit ayırma girdisi bulunmaktadır. Bunlar aşağıda verilmiştir:

- a) Uzunlamasına ayırma: Aynı yolda uçan ve kesişen yollarda uçan trafikler için 20 deniz miline (NM-Nautical Mile) (1 NM=1,852 km) eşdeğer olan uçuş süresi (Şekil 3.1, Şekil 3.2)
- b) Yanlamasına ayırma 1: Karşılıklı trafikler için coğrafi ayırma olarak uçağın rotasında yer alan çatışma noktası ile bir önceki VOR/DME arası mesafeye karşılık gelen uçuş süresi (Şekil 3.3)
- c) Yanlamasına ayırma 2: Ayrılan rotalar için 15 NM'lik yanlamasına ayırma mesafesine karşılık gelen uçuş süresi (Şekil 3.4)

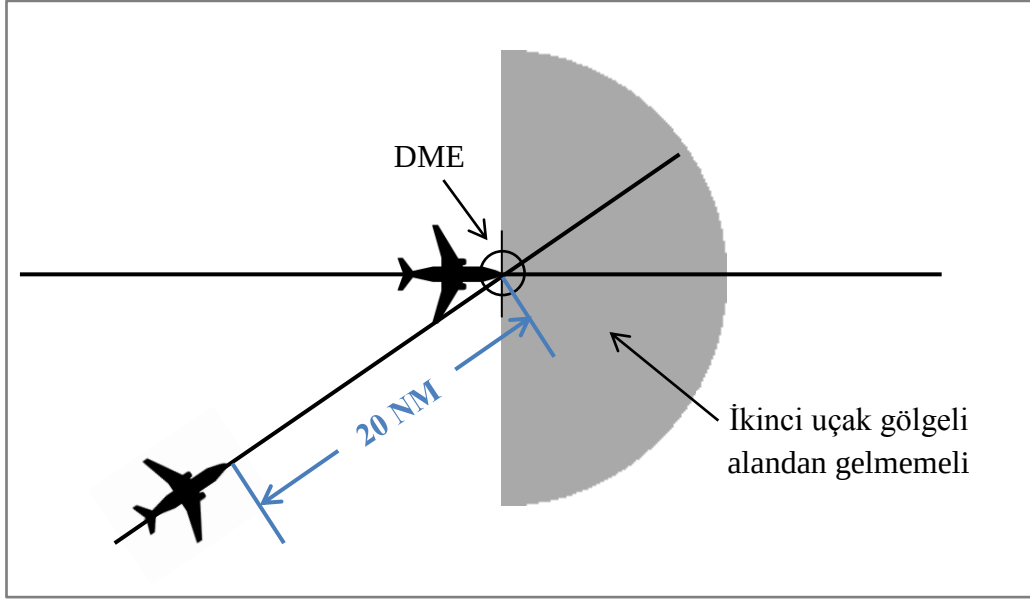
Ayrırma girdileri ICAO'nun Hava Seyrüsefer Hizmetleri için Prosedürler-Hava Trafik Yönetimi dokümanından [1] elde edilmiştir. Aynı seviyede olan uçakların ayrılmasında zaman esasına dayalı olan ayırma minimalarının

modellenmesi daha kolay olmakla birlikte, daha büyük miktarda ayırma gerektirdiğinden kapasiteyi oldukça düşüreceği için mesafe esasına dayalı ayırma tercih edilmiştir. Mesafe esasına dayalı olan ayırmalar da yanlamasına ve uzunlamasına ayırma kategorilerinden alınmıştır. Aynı uçuş seviyesinde uçan uçaklar arası mesafe, dokümanda belirlenmiş olan mesafelerden daha az ise ayırma miniması ihlal edilmiş ve böylece uçaklar çatışmaya girmiş kabul edilir. Aynı rotada olan uçakların arasında olması gereken en az mesafe, aynı DME istasyonuna göre 20 NM'dir (Şekil 3.1).

Aynı DME istasyonundan referans alan iki farklı kesişen rotayı kullanan uçaklar arasındaki uzunlamasına ayırma yine 20 NM'dir. Bu ayırma da Şekil 3.2'de betimlenmiştir. Yolların kesişim açısı 90 dereceyi aşmıyorsa uçaklar kesişen trafiktir.



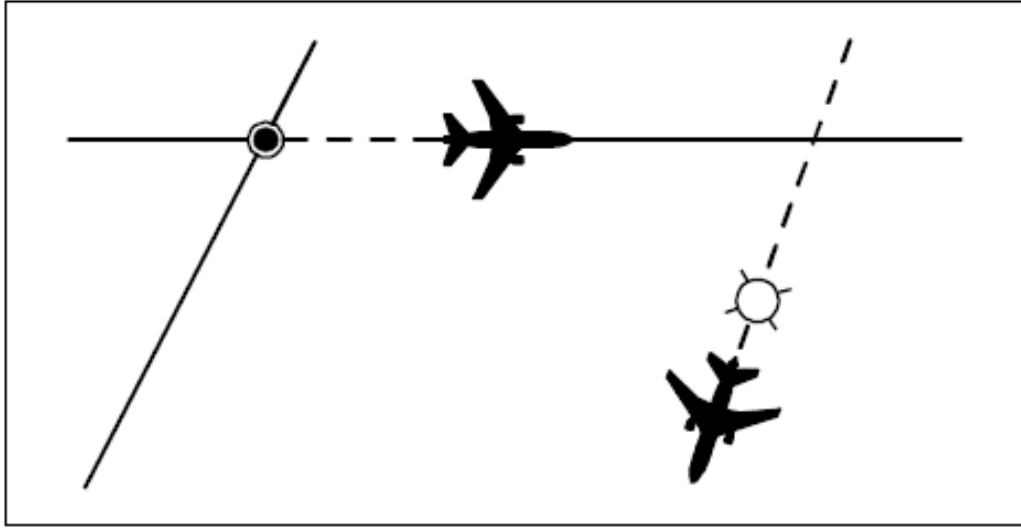
Şekil 3.1. Aynı rotayı kullanan uçakların mesafe esasına dayalı olarak uzunlamasına ayrılması [1]



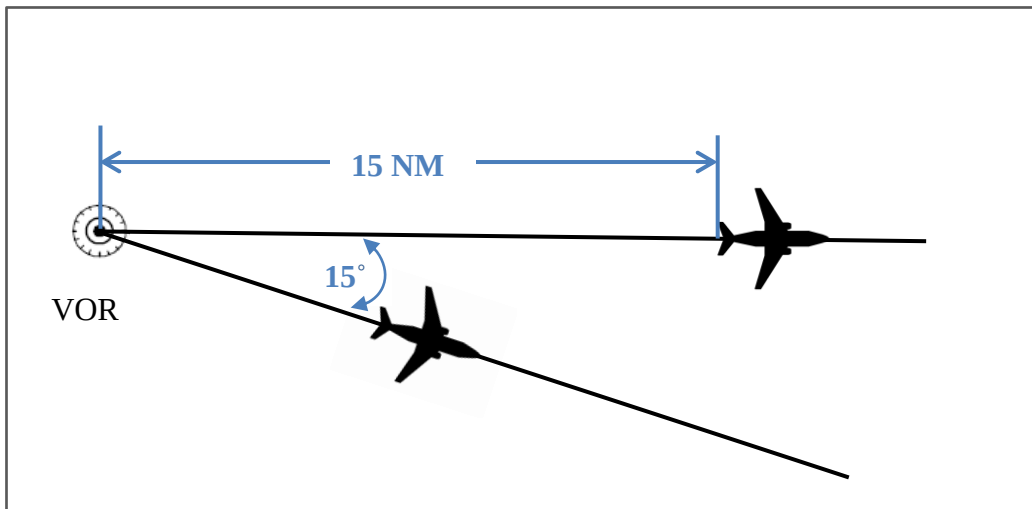
Şekil 3.2. Kesişen rotaları kullanan uçakların mesafe esasına dayalı olarak uzunlamasına ayrılması [1]

Rotaları tek bir noktada kesişen fakat yollar arası açının 90 dereceyi aştığı durumda, uçaklar karşılıklı trafik olarak değerlendirilir. Eğer aynı yol üzerinden ters istikamette geliyorsa bu uçuşlar ancak birbirlerini 10 NM geçtiklerinde aynı seviyeyi kullanabilirler. Bu çalışmadaki ATFM modelinde ise her uçağa uçuşu boyunca değişmeyecek olan tek bir seviye atanmaktadır. Çünkü seviye değişimleri hava trafik kontrolörünün gerçek zamanlı olarak yerine getirdiği işlemlerdir. Bu çalışmada bu yüzden tam karşılıklı rotadaki uçuşlar modellenmemiştir. Ancak yukarıda da bahsedilen rotalar arası 90 dereceyi geçen fakat rotaların birleştiği noktadan itibaren farklı yollarda uçuşuna devam eden uçaklar için iki farklı ayırma türü uygulanmaktadır. Bunlardan ilki rotaların birleştiği (kesişim) noktasına gelene kadar olan kısmı “Yanlamasına ayırma 1” olarak isimlendirilmiş olan yanlamasına ayırma prosedürüne tabidir. Uçaklar görsel olarak veya seyrüsefer yardımcılarından referansla belirlenmiş olan farklı coğrafi noktalarda olduklarında uçaklar ayrılmış sayılırlar (Şekil 3.3). Bu çalışmada arkadaki uçak, rotaların kesişme noktasından bir önceki VOR/DME istasyonuna gelene kadar ayrılmış kabul edilmektedir. Yani uçaklardan biri rotaların kesişme noktasında olduğu sırada diğer uçak coğrafi olarak tamamen farklı noktalarda olduklarını garanti eden, farklı bir seyrüsefer yardımcısının

bulunduğu konumu geçmemişse uçaklar ayrı kabul edilir. Bu noktayı geçenler ise ayırma minimasını ihlal etmiş ve böylece çatışma yaratmış olurlar. Öndeki uçak yolların kesişim noktasını geçtiğinde ise uçaklar, “Yanlamasına ayırma 2” olarak isimlendirilmiş olan diğerk yanlamasına ayırma prosedürüne tabi olurlar. Buna göre uçaklardan en az bir tanesi rotaların kesiştiğı VOR’dan 15 NM uzaklaşmışsa uçaklar aynı seviyeyi kullanabilmektedir (Şekil 3.4).



Şekil 3.3. Yanlamasına ayırma 1: uçaklar görsel olarak veya seyrüsefer yardımcılarından referansla belirlenmiş olan farklı coğrafi noktalarda olduklarında [1]



Şekil 3.4. Yanlamasına ayırma 2: uçaklar aynı VOR’ı kullandıklarında [1]

3.1.5. Maliyet girdileri

Maliyet girdisi olarak; birim zamanda yerde bekleme (gecikme) maliyeti kullanılmıştır. Model çözümü sonucu atanan kalkış zamanı ile uçak için önceden planlanmış olan kalkış zamanı arasındaki fark gecikme süresini vermektedir. Sadece indis sayısı değiştirilerek ve gerekli katsayılar önceden girdi olarak modele sunularak her havaalanı, uçak ve zaman dilimi için ayrı ayrı gecikme maliyeti hesaplanabilir. Bu modelde havaalanı, uçak ve zaman dilimine göre ayırmadan, her birim zaman dilimi için aynı olan maliyet katsayısı atanmıştır. Maliyet katsayısı “1” değeri verilerek sadece gecikme süreleri analiz edilmiştir. Fakat modelde maliyet katsayısı değeri olarak istenilen değer atanabilmektedir.

3.2. Çıktılar

Modele ait çıktılar şunlardır;

1. Her bir uçağın:
 - a) kalkış zamanı,
 - b) iniş zamanı,
 - c) her düğümü kat ediş zamanı,
 - d) en az toplam yer gecikme süresi,
 - e) en az toplam yerde bekleme maliyeti.
2. Tüm uçakların toplam en az:
 - a) yer gecikme süresi,
 - b) yerde bekleme maliyeti.

3.3. Varsayımlar

Varsayım 1. (Aralıklı-süreksiz zaman periyotları) Zaman ufku sabittir ve süreksiz, eşit ebatlarda, bitişik alt zaman periyotlarına ($t=1, 2, \dots, T$) bölünmüştür.

Varsayım 2. (Deterministik talep) Her bir varış havaalanına olan geliş uçuşlarının zaman çizelgesi bilinmektedir. Zaman çizelgesi tarifelendirilmiş kalkış zamanı, tarifelendirilmiş varış zamanı (uçuşa tahsis edilebilecek en erken varış zamanı olarak da kabul edilebilir), kat edilecek olan yol kümeleri ve her bir düğüme olan varış zamanları önceden kesin olarak bilinmektedir.

Varsayım 3. (Deterministik kapasite) havaalanı geliş ve kalkış kapasiteleri her zaman dilimi için önceden bilinmektedir.

Varsayım 4. (Eşit ve sabit seyahat hızları) Tüm uçaklar aynı hızda uçmaktadır ve uçuşları boyunca hızları sabit kalmaktadır. Örn: Herhangi iki ağ elemanı arasındaki uçuş süreleri tarifedeki tüm uçuşlar için aynıdır.

Varsayım 5. Kalkış uçakları planlanan kalkış zamanından önce olmaması koşulu ile gerektiğinde kalkabilmektedir

Varsayım 6. Gecikme aynı uçak tarafından gerçekleştirilen ardışık uçuşlar arasında dağıtılmamaktadır;

Varsayım 7. Gecikmeler nedeniyle uçuşlar iptal edilmemektedir.

Varsayım 8. Tüm uçaklar doğu yönlü ve batı yönlü olmak üzere sınıflara ayrılmıştır ve doğu yönlüler için ayrı, batı yönlüler için ayrı birer seviye olmak üzere toplam iki farklı seviyede uçmaktadır. Bu nedenle ayırmalar sadece aynı yönlüler arasında gerçekleşmektedir.

Varsayım 9. Uçuş planlarında belirtilen rotalardaki (ayrıntlar kümesi) tüm yollar (ayrıntlar) hepsi doğu, ya da hepsi batı yönlü olmalıdır (uçak kalkıştaki ilk ayrıtı hangi yönlü ise uçuşu boyunca yer alan diğer tüm ayrıtları aynı yönlü olmalıdır).

Varsayım 10. Yollar ve yol kesişim noktaları VOR/DME istasyonlarıyla oluşturulmuş ve yollar arası açılar en az 15 derecedir.

Varsayım 11. Uçakların tırmanma ve alçalma aşamaları ihmal edilmiştir.

Varsayım 12. Ayırma minimaları ICAO'nun "Procedures for Air Navigation Services: Air Traffic Management" isimli 4444 numaralı dokümanındaki [1] prosedürel ayırma minimalarına göre yapılmaktadır.

Varsayım 13. Hava sahasında yer alan aynı seviyede kullanılabilir olan karşılıklı rotalar ve bunların kesişim düğümü bilinmektedir ve karşılıklı rota sayısı bir çift olarak yer verilmektedir.

Varsayım 14. Hava alanları, yolları oluşturan düğümler gibi numaralandırılmış, tüm düğümler içinde havaalanı sayısına kadar olan düğümler hava alanlarını temsil etmektedir.

Varsayım 15. Karşılıklı rotalar ve bunları kullanan uçaklar bilinmekte, bir çift karşılıklı rota üzerinde bir kesişme noktası bulunmakta ve bu nokta her iki rotanın aynı numaralı düğümünü oluşturmaktadır.

Varsayım 16. Model sadece yerde bekletme (geç kaldırma) yoluyla çözüm sunmaktadır. Yol değişikliği, havada bekletme, hız değişimi gibi çözümler için tasarlanmamıştır.

3.4. Karar Değişkenleri

Bu modelde temel karar değişkenleri; rotası, uçuş seviyesi ve hızı önceden belli ve sabit olan her bir uçağın, rotası üzerinde hangi düğümde, hangi zaman diliminde bulunacağını ve hangi zaman diliminde bulunmayacağını ifade etmektedir. $x_{n,t}^f$ karar değişkeni; eğer bir “ f ” numaralı uçak “ n ” numaralı düğümde “ t ” anında bulunursa “1”, bulunmazsa “0” değerini alır. Ayrıca bu temel değişken belirlendiğinde, bu değişken kullanılarak her uçağa atanan gecikme süresinin hesaplandığı “ g_f ” karar değişkeni de bulunmaktadır.

3.5. Kısıtlar

Model toplam 12 tane kısıt fonksiyonu barındırmaktadır. Bunlardan ilk dördü, belirlenen varsayımlar ve sistemin yapısı gereği uçakların normal operasyonunu sağlayan genel karakteristiğini korumasını temin etmektedir. 5 ve 6 numaralı kısıtlar önceki çalışmalarda da yer alan ATFM modellerinin standart kısıtlarından olan hava alanlarının kapasite kısıtlarıdır. 7, 8, 9 ve 10 numaralı kısıtlar bu çalışmanın özgünlüğünü oluşturan hava trafik kontrol prosedürel ayırma kısıtlarıdır. 11 numaralı kısıt gecikme süresini ve 12 numaralı kısıt ise değişken tipini ifade etmektedir. Kısıtların tamamı aşağıda maddeler halinde verilip ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

1. Her uçuşun bir kez yapılması: Uçaklar planlandıkları uçuş rotalarındaki her bir düğümde bir kez geçebilirler (karar değişkeni; her “ f ” uçağı için, tek “ n ” düğümünde, tek “ t ” anında “1” değerini alır) (bir kez kalkabilir, bir kez inebilir, düğümlerde bir kez bulunabilir)
2. Kalkış zamanları: Uçaklar planlanan kalkış zamanından önce kalkamaz.

3. Kullanılmayan rotalar: Uçaklara, önceden uçuş planlarında belirlenmiş olanların dışındaki rotalar kullandırılmaz.
4. Uçuş rotaları ve uçuş süreleri: Uçaklar planlanan rotalarında yer alan düğümleri planlanan sırayla ve her ayrıtı iki düğüm arası uçuş süresi kadar zamanda kat etmelidir.
5. Kalkış havaalanı kapasiteleri: Her bir zaman diliminde kalkan uçak sayısı ilgili kalkış havaalanının o zaman dilimindeki kalkış kapasitesini aşamaz.
6. İniş havaalanı kapasiteleri: Her bir zaman diliminde inen uçak sayısı ilgili iniş havaalanının o zaman dilimindeki iniş kapasitesini aşamaz.
7. Uzunlamasına ayırma: Aynı seviyede olan “batı” yönlü uçaklar her bir düğümü 20 NM’a karşılık gelen “4t”lik uçuş süresi kadar aralıklara kat edebilirler. Bu durum hem aynı rotada uçan, hem de kesişen rotalarda uçan uçaklar için geçerlidir.
8. Uzunlamasına ayırma: Aynı seviyede olan “doğu” yönlü uçaklar her bir düğümü 20 NM’a karşılık gelen “4t”lik uçuş süresi kadar aralıklara kat edebilirler. Bu durum hem aynı rotada uçan hem de kesişen rotalarda uçan uçaklar için geçerlidir.
9. Yanlamasına ayırma 1 ve 2: Bu kısıt karşılıklı yollardan gelip ayrılan yollarda uçuşuna devam eden aynı seviyedeki uçaklar arasındaki ayırmayı sağlamaktadır. Buna göre karşılıklı rotalardan “a” rotasını kullanan uçağın çatışma noktasına olan planlanmış geliş zamanı, karşılıklı rotalardan “b” rotasını kullanan uçağın planlanmış geliş zamanına eşit ya da ondan daha geç ise; “a” rotasından gelen uçağın çatışma düğümüne varış zamanı ile “b” rotasından gelen uçağın çatışma düğümüne olan varış zamanı arasındaki fark en az, çatışma düğümü ile bir önceki düğüm arasındaki mesafenin uçuş süresi ile 15 NM’lik (3t) mesafenin uçuş süresinin toplamı kadar olmalıdır.
10. Yanlamasına ayırma 1 ve 2: Bu kısıt karşılıklı yollardan gelip ayrılan yollarda uçuşuna devam eden aynı seviyedeki uçaklar arasındaki ayırmayı sağlamaktadır. Buna göre karşılıklı rotalardan “a” rotasını kullanan uçağın çatışma noktasına olan planlanmış geliş zamanı

karşılıklı rotalardan “*b*” rotasını kullanan uçağın planlanmış geliş zamanından daha erken ise; “*b*” rotasından gelen uçağın çatışma düğümüne varış zamanı ile “*a*” rotasından gelen uçağın çatışma düğümüne olan geliş zamanı arasındaki fark en az, çatışma düğümü ile bir önceki düğüm arasındaki mesafenin uçuş süresi ile 15 NM’lik ($3t$) mesafenin uçuş süresinin toplamı kadar olmalıdır.

11. Gecikme süreleri: Her uçağın gecikme süresi, tahsis edilen (hesaplanan) kalkış zamanı ile planlanmış kalkış zamanı arasındaki fark kadardır.
12. Karar değişkenleri: Karar değişkeninin alabileceği değerler: Her “*f*” uçuşunun, “*n*” düğümünde, “*t*” zamanında olması gerektiği hesaplanmışsa “1”, aksi taktirde “0” değerini alır.

Not: 9 ve 10 numaralı kısıtlarda modelleme kolaylığı açısından ve en çok gecikmeye mal olması açısından, toplam gecikmeden çok adalete önem verilmiş ve İlk Gelene İlk Hizmet (FCFS- First Come First Served) kuralı uygulanmıştır. Yani tahmini varış zamanı önce olana, öncelik verilmiştir.

3.6. Amaç Fonksiyonu

Modelin amaç fonksiyonu, tüm uçakların toplam operasyon maliyetlerini en düşük tutmak amacıyla tüm uçakların toplam yerde bekleme süresini (planlanan kalkış zamanı ile hesaplanan kalkış zamanı arasındaki farkı) en aza indirmeyi sağlamaktadır. Modelde gecikme süresi kısıtlarda tanımlanmıştır, tüm uçakların gecikme sürelerinin maliyet katsayısıyla çarpımı toplam maliyeti vermektedir.

3.7. Modelin Formülasyonu

Bu bölümde öncelikle modelin sembolik gösterim sistemi verilmiş, ardından karar değişkenleri, amaç fonksiyonu ve kısıtların formülasyonu sunulmuştur. Bu gösterim sistemi için Bertsimas ve Patterson’un çalışması [46] örnek alınmıştır.

$\mathcal{F}_w = \{1, \dots, W\}$; batı yönlü uçuşlar kümesi

1’den W ’ye kadar numaralandırılmış olan uçaklardan oluşan uçuşlar kümesi batı yönlü uçuşları verir.

$\mathcal{F}_e = \{1, \dots, E\}$; doğu yönlü uçuşlar kümesi

1'den E 'ye kadar numaralandırılmış olan uçaklardan oluşan uçuşlar kümesi doğu yönlü uçuşları verir.

$\mathcal{F} = \{1, \dots, F\} = (\mathcal{F}_w \cup \mathcal{F}_e)$; tüm uçuşlar kümesi

1'den F 'ye kadar numaralandırılmış olan tüm uçuşlar batı yönlü ve doğu yönlü olan uçuşların birleşiminden oluşur.

$\mathcal{T} = \{1, \dots, T\}$; zaman dilimleri kümesi

Zaman, 1'inci zaman diliminden T 'inci zaman dilimine kadar olmak üzere 1'er birim aralıklarla bölünmüştür. Her bir zaman dilimi uçakların 5 NM mesafeyi uçuş süresini ifade etmektedir.

$\mathcal{N} = \{1, \dots, N\}$; düğümler kümesi

Hava sahasındaki tüm düğümleri ifade eden düğümler kümesinde N , düğüm sayısını veren son düğümün numarasıdır.

$\mathcal{R} = \{1, \dots, R\}$; rotalar kümesi

Hava sahasında uçuşun planlanabileceği tüm rotaları veren kümedir.

$R_a =$ karşılıklı rotalardan “a” rotasının numarası/ismi ($R_a \in \mathcal{R}$)

Rotalar kümesinde bulunan karşılıklı rota çiftinden birini ifade eder.

$R_b =$ karşılıklı rotalardan “b” rotasının numarası/ismi ($R_b \in \mathcal{R}$)

Rotalar kümesinde bulunan karşılıklı rota çiftinden diğerini ifade eder.

$\mathcal{F}_a = \{1, \dots, A\}$, ($\mathcal{F}_a \in \mathcal{F}$): karşılıklı rotalardan olan “a” rotasını kullanan uçaklar kümesi:

$\mathcal{F}_b = \{1, \dots, B\}$, ($\mathcal{F}_b \in \mathcal{F}$): karşılıklı rotalardan olan “b” rotasını kullanan uçaklar kümesi

$\mathcal{H} = \{1, \dots, H\}$; hava alanları kümesi ($\mathcal{H} \subset \mathcal{N}$)

Hava sahasında yer alan tüm hava alanlarını ifade eder. Hava alanları düğümler kümesinin elemanlarıdır.

$\mathcal{L}_{i,j}$ = ayrıtlar kümesi ($i \in \mathcal{N}, j \in \mathcal{N}$)

İlki “ i ” ve ikincisi “ j ” numaralı olan bir çift düğümü birleştiren ayrıtlardan her biri yolları ifade etmektedir.

D = her bir uçağın rotasında bulunan toplam düğüm sayısı

Her bir uçağın rotasında yer alan düğüm sayısı sabittir ve “ D ” sayısı kadardır.

$U(i,j)$ = ayrıt uzunlukları ($i \in \mathcal{N}, j \in \mathcal{N}$)

Ayrıt uzunlukları “ t ”nin katı şeklinde belirlenip kullanılmıştır.

$$R(f,i) = \begin{cases} i = 1 \text{ ise "f" uçuşunun kalkış havaalanı} \\ \quad \left(\begin{array}{c} \text{düğüm numarası ya da} \\ \text{havaalanı numarası} \end{array} \right) (i \in \mathcal{H}) \\ 1 < i < D \text{ ise "f" uçuşunun rotasındaki } i\text{'inci ara düğüm} \\ \quad i \in (\mathcal{N}/\mathcal{H}) \\ i = D \text{ ise "f" uçuşunun iniş havaalanı } (i \in \mathcal{H}) \end{cases}$$

$R(f,i)$ her bir “ f ” uçuşunun planlanmış rotasındaki i ’inci düğümünün hangi düğüm olduğunu ifade eder. Eğer $i = 1$ ise; $R(f,i)$, “ f ” uçağının kalkış havaalanı olan 1’inci düğümünün hangi düğüm olduğunu ifade eder, $i = D$ ise, iniş havaalanını ifade eden son düğümün (yani “ D ” numaralı düğüm) hangisi olduğunu ifade eder. Diğer “ i ” numaralı düğümler ise uçakların rotasındaki ara düğümlerin hangi düğümler olduğunu ifade etmektedir.

$R(f) = (R(f,i): 1 \leq i \leq D)$: her bir “ f ” uçuşunun rotasını oluşturan düğümler kümesidir.

m = $\{R(a) \cap R(b): (a \in \mathcal{F}_a), (b \in \mathcal{F}_b), (m \in \mathcal{N})\}$ karşılıklı rotaların kesişim düğümüdür.

Karşılıklı rotada uçan “ a ” uçağı ile “ b ” uçağının kesiştiği düğümün ismi (ya da numarası) “ m ” düğümüdür.

$$Z(f, t) = \begin{cases} t = 1 \text{ ise } "f" \text{ uçuşunun planlanmış kalkış zaman dilimi} \\ \quad (i \in \mathcal{H}) \\ 1 < t < D \text{ ise } "f" \text{ uçuşunun rotasındaki } i' \text{ inci ara düğümü} \\ \quad \text{planlanmış kat ediş zamanı} \\ \quad i \in (\mathcal{N}/\mathcal{H}) \\ t = D \text{ ise } "f" \text{ uçuşunun planlanmış iniş zamanı } (i \in \mathcal{H}) \end{cases}$$

$Z(f, i)$ 'de $i=1$ ise " f " uçuşunun planlanmış olan kalkış zamanını, $i=D$ ise planlanmış iniş zamanını verir. Eğer " i " başka değer alıyorsa, " f " uçuşunun rotasında yer alan i 'inci düğüme ne zaman varması planlandığını ifade etmektedir.

$K(h, t) = h$ 'inci havaalanının t 'inci zaman dilimindeki kalkış kapasitesi (yani kalkmasına izin verilen maksimum uçak sayısıdır).

$V(h, t) = h$ 'inci havaalanının t 'inci zaman dilimindeki iniş kapasitesi (yani inmesine izin verilen maksimum uçak sayısıdır).

$sep1$ = Kesişen ve aynı rotada uçan uçaklar için ayırma mesafesi (" t " cinsinden verilmiş olan mesafe bu çalışmada 20 NM'lık mesafeyi uçuş süresi olarak " $4t$ " kullanılmıştır).

$sep2$ = Ayrılan rotalarda uçan uçaklar için ayrılmanın başlangıcı olan düğümden itibaren gerekli olan ayırma mesafesidir (" t " cinsinden verilmiş olan mesafe bu çalışmada 15 NM'lık mesafeyi uçuş süresi olarak " $3t$ " kullanılmıştır).

c = Her bir uçağın birim zamanda yerde bekleme maliyetini veren katsayı

Karar değişkenleri:

$$x_{n,t}^f = \begin{cases} 1 \text{ eğer } "f" \text{ uçuşu } "t" \text{ zamanında } "n" \text{ düğümünde bulunursa} \\ 0 \text{ diğer} \end{cases}$$

g_f = " f " uçuşunun gecikme süresini ifade eden karar değişkeni

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{Min } \sum_{f \in \mathcal{F}} [g_f * c]$$

Kısıtlar:

$$\text{Kısıt (1)} \quad \sum_{t \in \mathcal{T}} x_{n,t}^f = 1 \quad \forall f \in \mathcal{F}, n \in R(f)$$

$$\text{Kısıt (2)} \quad \sum_{t \in \mathcal{T}: t < Z(f,1)} x_{n,t}^f = 0 \quad \forall f \in \mathcal{F}, n \in R(f)$$

$$\text{Kısıt (3)} \quad x_{n,t}^f = 0 \quad \forall f \in \mathcal{F}, t \in \mathcal{T}, n \notin R(f)$$

$$\text{Kısıt (4)} \quad \left(\sum_{t \in \mathcal{T}} x_{j',t}^f * t \right) - \left(\sum_{y \in \mathcal{T}} x_{j,y}^f * y \right) = U(j, j') \\ \forall f \in \mathcal{F}, j = R(f, i), j' = R(f, i + 1), i < D$$

$$\text{Kısıt (5)} \quad \sum_{f \in \mathcal{F}: R(f,1)=h} x_{h,t}^f \leq K(h, t) \quad \forall h \in \mathcal{H}, t \in \mathcal{T}$$

$$\text{Kısıt (6)} \quad \sum_{f \in \mathcal{F}: R(f,D)=h} x_{h,t}^f \leq V(h, t) \quad \forall h \in \mathcal{H}, t \in \mathcal{T}$$

$$\text{Kısıt (7)} \quad \sum_{\substack{i \in \mathcal{F}_W, \\ j \in \mathcal{T}: t \leq j < t + \text{sep1}}} x_{n,j}^i \leq 1 \quad \forall n \in (\mathcal{N} / \mathcal{H}), t \in \mathcal{T}$$

$$\text{Kısıt (8)} \quad \sum_{\substack{i \in \mathcal{F}_e, \\ j \in \mathcal{T}: t \leq j < t + \text{sep1}}} x_{n,j}^i \leq 1 \quad \forall n \in (\mathcal{N} / \mathcal{H}), t \in \mathcal{T}$$

$$\text{Kısıt (9)} \quad \sum_{t \in \mathcal{T}} x_{n,t}^a * t - \sum_{y \in \mathcal{T}} x_{n,y}^b * y \geq \sum_{\substack{i \in R(a): \\ R(a,i+1)=m}} U(i, i + 1) + \text{sep2} \\ \forall n \in \mathcal{N}: R(a, n) = R(b, n) = m, a \in \mathcal{F}_a, b \in \mathcal{F}_b: Z(a, n) \geq Z(b, n)$$

$$\text{Kısıt (10)} \quad \sum_{y \in \mathcal{T}} x_{n,y}^b * y - \sum_{t \in \mathcal{T}} x_{n,t}^a * t \geq \sum_{\substack{i \in R(b): \\ R(b,i+1)=m}} U(i, i + 1) + \text{sep2} \\ \forall n \in \mathcal{N}: R(a, n) = R(b, n) = m, a \in \mathcal{F}_a, b \in \mathcal{F}_b: Z(a, n) < Z(b, n)$$

$$\text{Kısıt (11)} \quad \sum_{\substack{n \in \mathcal{N}: n = R(f,1), \\ t \in \mathcal{T}}} x_{n,t}^f * t - Z(f, 1) = g_f \quad \forall f \in \mathcal{F}$$

$$\text{Kısıt (12)} \quad x_{n,t}^f \in \{0,1\} \quad \forall f \in \mathcal{F}, n \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}$$

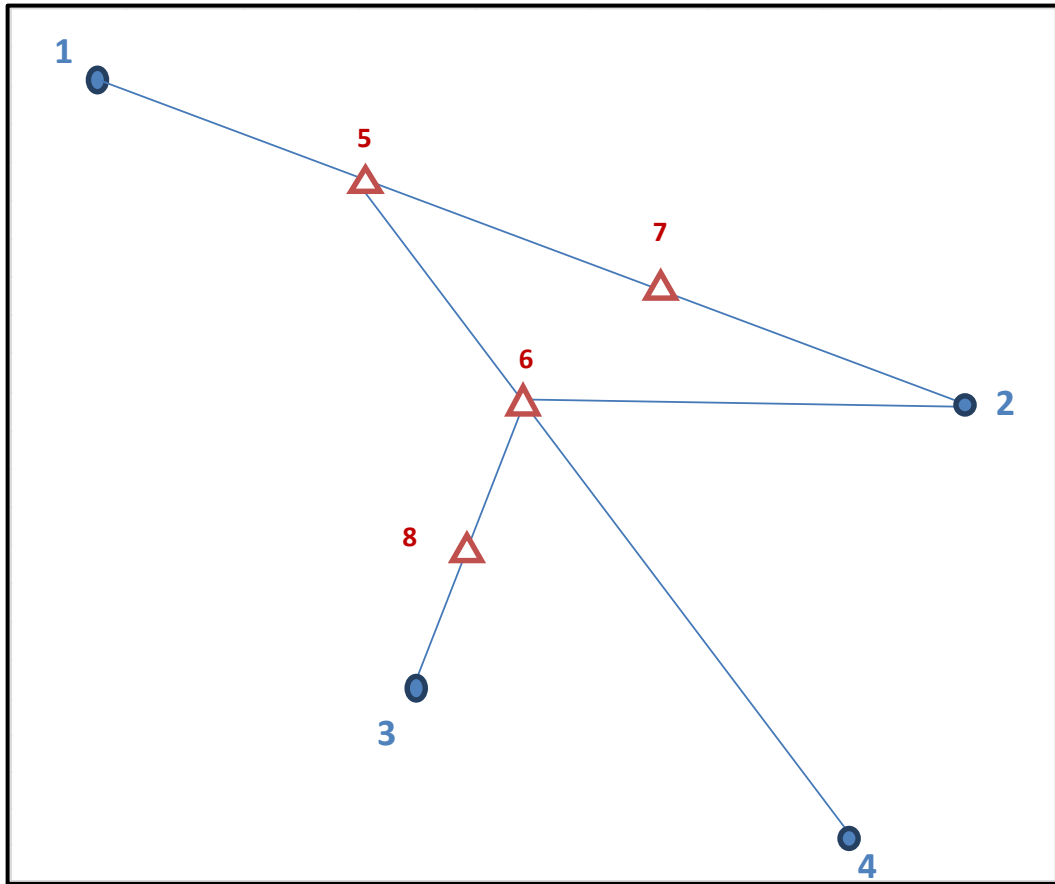
3.8. Örnek Hava Sahası ve Senaryo

Bu bölümde modeli test etmek amacıyla oluşturulan örnek hava sahası, hava alanı kapasiteleri ve uçuş talebi incelenmiştir. Model 4 hava alanı, 16 yol, 50 uçuş ve 250 zaman diliminden oluşan senaryo üzerinde test edilmiştir. Fakat model

daha büyük hava sahaları, daha fazla sayıda hava alanı, uçuş sayısı ve zaman dilimi için kullanılabilir.

Bu çalışmada kullanılan hava sahası Şekil 3.5'te verildiği şekilde tasarlanmıştır. Mavi daireler hava alanlarını ifade etmekte, yanlarındaki numaralar ise hava alanlarına verilen tanıma numaralarını göstermektedir. Kırmızı üçgenler VOR/DME istasyonlarını (düğümüleri) ifade eder ve her birinin üzerindeki numaralar da onları tanıtmak üzere atanmıştır. Mavi çizgiler de hava yollarını (ayrıtları) temsil etmektedir.

Yol uzunluğu ve her uçak için sabit olarak alınmış bir uçuş hızı değeri kullanılarak hesaplanmış olan yol uçuş süreleri birim zaman diliminin (t 'nin) katı cinsinden, yolun yönü (Doğu/Batı), yol numaraları ve yolların hangi iki düğüm arasında yer aldığı bilgileri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Modelde toplam zamanın bölündüğü en küçük zaman aralığını ifade eden " t " değeri bu çalışmada 5 NM'lik bir mesafeyi uçuş süresi olarak ele alınmıştır.



Şekil 3.5. Örnek hava sahası ve yol ağı

Çizelge 3.1. Ayırıklar (yollar) ve uzunlukları

	YOLLAR	UÇUŞ SÜRESİ (* t)
DOĞU	1 (1-5)	16
	2 (5-7)	20
	3 (7-2)	20
	4 (5-6)	16
	5 (6-2)	28
	6 (3-8)	12
	7 (8-6)	8
	8 (6-4)	32
BATI	9 (2-7)	20
	10 (7-5)	20
	11 (5-1)	16
	12 (2-6)	28
	13 (6-5)	16
	14 (4-6)	32
	15 (6-8)	8
	16 (8-3)	12

Hava alanları arası en kısa rotalar belirlenmiş ve Çizelge 3.2’de sunulmuştur. İlk sütunda A ve B olarak isimlendirilen 2 ve 3 numaralı rotalar birbirine karşılıklıdır. Bu rotaların kesişim düğümü, rotaların 3’üncü düğümü olan 6 numaralı düğümdür. Bu rotaları kullanan uçaklara yanlamasına ayırma uygulanacaktır. Diğerlerine ise uzunlamasına ayırma minimaları uygulanacaktır.

Çizelge 3.2. Rotalar

Karşılıklı Rotalar	Rota	1. Düğüm	2. Düğüm	3. Düğüm	4. Düğüm
	1	1	5	7	2
A	2	1	5	6	4
B	3	3	8	6	2
	4	2	7	5	1
	5	4	6	5	1
	6	2	6	8	3

Her havaalanı için her bir zaman diliminde farklı olarak verilen birim zamandaki kalkış kapasiteleri Çizelge 3.3’te verilmiştir. Havaalanı kalkış kapasite değerleri 200’üncü zaman dilimine kadar verilmiştir. Buna göre ilk 5 zaman diliminde ilk havaalanından birim zamanda en fazla 1 uçak kalkış gerçekleştirebilir. Diğer zaman dilimleri ve hava alanları aynı yöntemle anlaşılabilir. Hava alanları varış kapasiteleri ise Çizelge 3.4’te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Havaalanları kalkış kapasiteleri

Zaman dilimleri	Havaalanı 1	Havaalanı 2	Havaalanı 3	Havaalanı 4
1-5	1	1	0	1
6-10	1	1	1	0
11-15	0	1	1	1
16-22	1	0	0	1
23-28	0	0	1	1
29-33	1	1	1	1
34-40	1	1	1	0
41-200	1	1	1	1

Çizelge 3.4. Havaalanları varış kapasiteleri

Zaman dilimleri	Havaalanı 1	Havaalanı 2	Havaalanı 3	Havaalanı 4
1-62	1	1	0	1
63-65	1	1	1	0
66-80	0	1	1	1
81-85	1	0	0	1
86-91	0	0	1	1
92-130	1	1	1	1
131-141	1	1	1	0
142-250	1	1	1	1

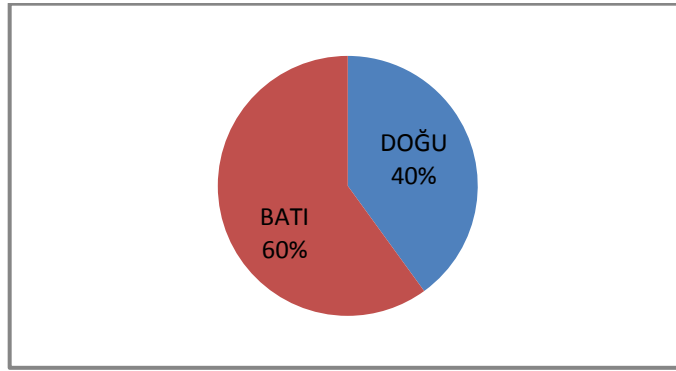
Toplam 50 uçaktan oluşan senaryodaki uçakların uçuş planları Çizelge 3.5'te verilmiştir. Buna göre ilk sütun uçakların rotalarının doğu veya batı olarak hangi yönde olduklarını, 2'inci sütun uçak tanıtma numaralarını, 3'üncü sütun kullandıkları rotaların tanıtma numaralarını, 4'üncü sütun rotanın ilk düğümünün (havaalanının) hangi tanıtma numaralı düğüm olduğunu, 5'inci sütun rotanın 2'inci düğümün numarasını, 6'ıncı sütun rotanın 3'üncü düğümünün numarasını, 7'inci sütun son düğümün numarasını (yani iniş havaalanı) ifade etmektedir. 8'inci sütun planlanan kalkış zamanını, 9'uncu sütun ikinci düğümde oluş zamanını, 10'uncu sütun 3'üncü düğümde oluş zamanını, 11'inci sütun planlanan iniş zamanını “t” cinsinden vermektedir. Son sütun da uçakların hangilerinin karşılıklı rotaları kullandığını, A ve B olarak ta isimlendirilen bu rotalardan hangisini kullandıkları bilgisini vermektedir.

Çizelge 3.5. Uçuş planları

ROTA YÖNÜ	UÇUŞ NO	ROTA NO	DÜĞÜMLER				DÜĞÜM ZAMANLARI				KARŞILIKLI ROTALAR
			1	2	3	4	1	2	3	4	
DOĞU	1	1	1	5	7	2	1	6	8	3	
DOĞU	2	2	1	5	6	4	4	9	10	8	A
DOĞU	3	1	1	5	7	2	8	13	15	10	
DOĞU	4	2	1	5	6	4	13	18	19	17	A
DOĞU	5	1	1	5	7	2	20	25	27	22	
DOĞU	6	1	1	5	7	2	23	28	30	25	
DOĞU	7	1	1	5	7	2	30	35	37	32	
DOĞU	8	1	1	5	7	2	33	38	40	35	
DOĞU	9	2	1	5	6	4	33	38	39	37	A
DOĞU	10	1	1	5	7	2	50	55	57	52	
DOĞU	11	1	1	5	7	2	56	61	63	58	
DOĞU	12	1	1	5	7	2	63	68	70	65	
DOĞU	13	1	1	5	7	2	68	73	75	70	
DOĞU	14	1	1	5	7	2	73	78	80	75	
BATI	15	4	2	7	5	1	15	22	20	16	
BATI	16	6	2	6	8	3	20	26	28	23	
BATI	17	6	2	6	8	3	40	46	48	43	
BATI	18	4	2	7	5	1	40	47	45	41	
BATI	19	6	2	6	8	3	44	50	52	47	
BATI	20	6	2	6	8	3	50	56	58	53	
BATI	21	6	2	6	8	3	56	62	64	59	
BATI	22	6	2	6	8	3	61	67	69	64	
BATI	23	4	2	7	5	1	61	68	66	62	
BATI	24	4	2	7	5	1	72	79	77	73	
BATI	25	6	2	6	8	3	80	86	88	83	
BATI	26	6	2	6	8	3	92	98	100	95	
BATI	27	4	2	7	5	1	92	99	97	93	
BATI	28	4	2	7	5	1	93	100	98	94	
BATI	29	6	2	6	8	3	101	107	109	104	
BATI	30	6	2	6	8	3	102	108	110	105	
BATI	31	6	2	6	8	3	103	109	111	106	
BATI	32	6	2	6	8	3	116	122	124	119	
DOĞU	33	3	3	8	6	2	15	23	21	17	B
DOĞU	34	3	3	8	6	2	20	28	26	22	B
DOĞU	35	3	3	8	6	2	44	52	50	46	B
DOĞU	36	3	3	8	6	2	47	55	53	49	B
DOĞU	37	3	3	8	6	2	50	58	56	52	B
DOĞU	38	3	3	8	6	2	53	61	59	55	B
BATI	39	5	4	6	5	1	5	11	10	6	

Çizelge 3.5. (Devam) Uçuş planları

ROTA YÖNÜ	UÇUŞ NO	ROTA NO	DÜĞÜMLER				DÜĞÜM ZAMANLARI				KARŞILIKLI ROTALAR
			1	2	3	4	1	2	3	4	
BATI	40	5	4	6	5	1	12	18	17	13	
BATI	41	5	4	6	5	1	42	48	47	43	
BATI	42	5	4	6	5	1	58	64	63	59	
BATI	43	5	4	6	5	1	65	71	70	66	
BATI	44	5	4	6	5	1	69	75	74	70	
BATI	45	5	4	6	5	1	71	77	76	72	
BATI	46	5	4	6	5	1	75	81	80	76	
BATI	47	5	4	6	5	1	80	86	85	81	
BATI	48	5	4	6	5	1	99	105	104	100	
BATI	49	5	4	6	5	1	103	109	108	104	
BATI	50	5	4	6	5	1	107	113	112	108	

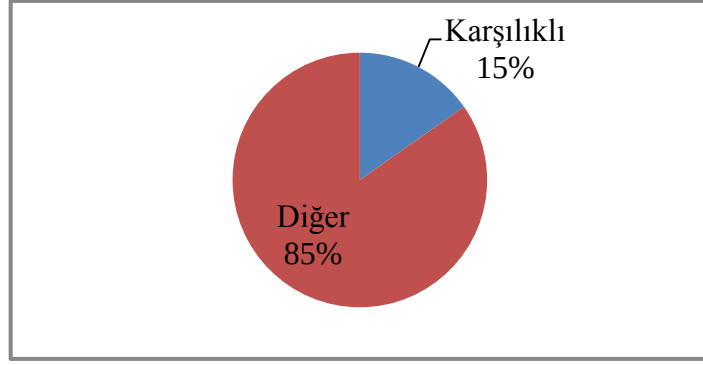


Şekil 3.6. Uçuş rotalarının yönlerine göre trafik dağılımı

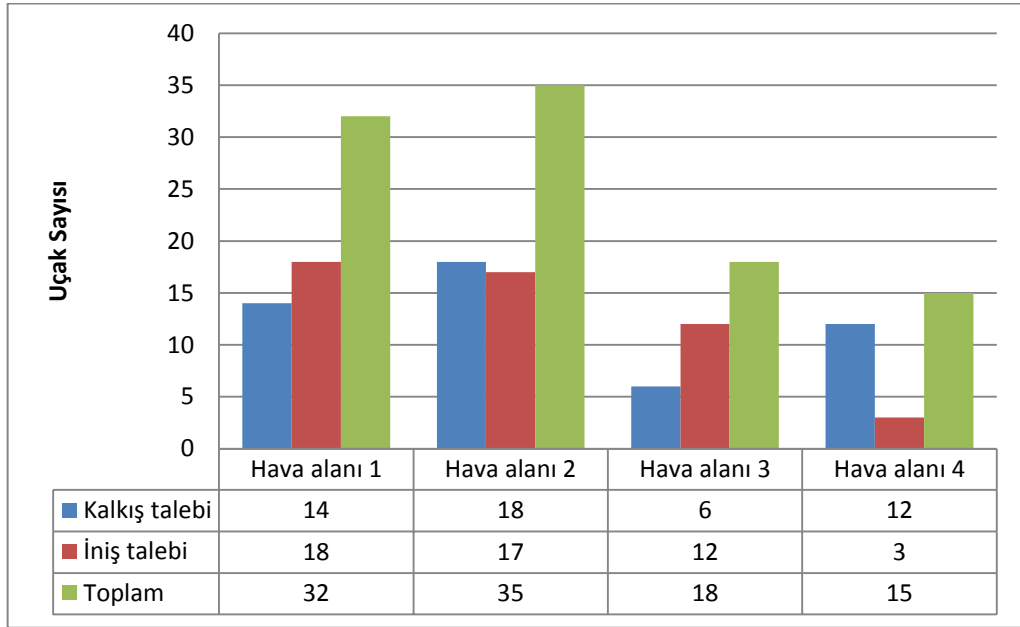
Uçuş planları analiz edildiğinde, uçak rotalarının % 40'ının doğu yönlü, % 60'ının batı yönlü olduğu görülmektedir (Şekil 3.6).

Karşılıklı rotaları kullanan uçak sayısı toplam 9 olmak üzere, bu değer toplam 50 uçağın %15'ine karşılık gelmekte, tüm uçuşların % 85'i ise kesişen ve aynı yönlü rotaları kullanmaktadır (Şekil 3.7).

Hangi havaalanına ne kadar kalkış, iniş ve toplam talebin olduğu ise Şekil 3.8'de sunulmuştur. En çok talebin 35 uçakla 22'inci havaalanına olduğu ve sırasıyla 1, 3 ve 4'üncü hava alanlarına azalan bir trafik talebi söz konusudur.



Şekil 3.7. Rotaların gerektirebilecekleri ayırma türüne trafik dağılımı



Şekil 3.8. Havaalanları toplam iniş ve kalkış talepleri

Çizelge 3.6. Talep zaman aralığı

	Planlanmış Olan
En erken kalkış zamanı	1
En geç kalkış zamanı	116
En erken iniş zamanı	57
En geç iniş zamanı	171

Çizelge 3.6’da ise zaman aralıkları verilmiştir. Buna göre tüm uçaklar arasından ilk kalkış zamanı 1 son kalkış zamanı 116, en erken iniş zamanı 57 ve en geç iniş zamanı 171 olarak planlanmıştır.

3.9. Model Çözüm Sonuçları Analizi

Bu bölümde problem çözüm sonuçları ve analizi ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

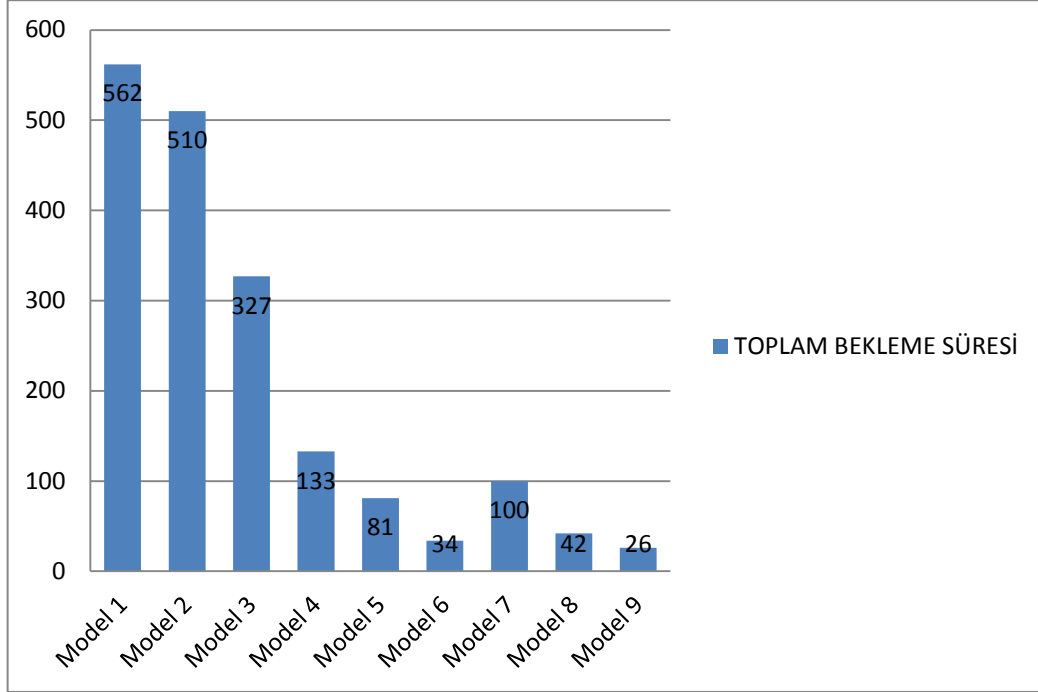
Tarif edilmiş olan problem GAMS matematiksel modelleme ve optimizasyon programı kullanılarak modellenip çözülmüştür. Kısıtların etkilerini değerlendirmek için mevcut kısıtların farklı kombinasyonlarından içerecek şekilde 9 farklı model oluşturulmuştur. Tüm kısıtları içeren modelin optimum çözümüne yaklaşık 1,5 dakikalık sürede ulaşılmıştır. Çizelge 3.7’de her bir modelin hangi kısıtları içerdiği belirtilmektedir. Çizelgede belirtilmeyen ilk 4 ve son 2 kısıt uçuşların ana karakteristiğiyle ve mevcut modelin varsayımlarıyla ilişkilidir, bu nedenle her modelde temel kısıtlar olarak yer almaktadır.

Çizelge 3.7. Modeller

	KISITLAR	KISIT NO
Model 1	Tüm kısıtlar	5, 6, 7, 8, 9, 10
Model 2	Tüm ayırmalar	7, 8, 9, 10
Model 3	Karşılıklı ayırmalar	9, 10
Model 4	Aynı yönlü ve Kesişen trafik ayırmaları	7, 8
Model 5	HA Kalkış ve iniş kapasitesi	5, 6
Model 6	Doğulu aynı yönlü ve kesişen ayırmalar	8
Model 7	Batılı aynı yönlü ve kesişen ayırmalar	7
Model 8	HA İniş kapasitesi	6
Model 9	HA Kalkış kapasitesi	5

Çizelge 3.7’ye bakıldığında 1’inci modelin, tüm kısıtları içerdiği, 2’inci modelin sadece tüm ayırma kısıtlarını içerdiği, havaalanı kapasite kısıtlarını ise içermediği anlaşılmaktadır. 3’üncü modelin ise sadece karşılıklı ayırma kısıtlarını

içerdiği, kesişen ve aynı rotadan uçan uçaklar için ayırma kısıtlarını barındırmadığı görülebilir. Şekil 3.9’da ise her bir modelin çözümünde tüm uçaklar için atanan toplam gecikme sürelerinin optimum değerleri verilmiştir.



Şekil 3.9. Modellerin çözüm sonuçları

Buna göre en fazla yer bekleme süresi 562 zaman dilimi olan, tüm kısıtların olduğu 1 numaralı modeldir.

1 numaralı modelden havaalanı kapasite kısıtları çıkarılarak kurulan ikinci modelde ise yer bekleme süresi 52 birim azalarak 510’a düşmüştür. Buradan ilgili senaryonun kapasite ve talep girdilerine göre havaalanı kapasite kısıtlarının etkisinin ne kadar az, fakat ayırma kısıtlarınınsa ne kadar yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Trafik talebi arttığı ve kapasite azaldığı ölçüde aradaki fark daha da artacaktır.

Sadece karşılıklı ayırma kısıtlarının yer aldığı ve diğer tüm kısıtların ihmal edildiği 3’üncü modele bakıldığında ise toplam bekleme süresinin 327’ye düştüğü görülmektedir. Bu da tüm kısıtları içeren 1’inci modelin toplam bekleme süresinin yaklaşık olarak % 58’ine denk gelen oldukça büyük bir değerdir. Sadece aynı yoldaki ve kesişen yollardaki uçakların ayırma kısıtlarını içeren 4’üncü modeldeki 133 birimlik süreyle ve sadece hava alanları kapasitelerini içeren 5’inci modeldeki

82 birimlik bekleme süreleri kıyaslandığında tüm kısıtlar arasında en yüksek beklemeye neden olan kısıtın karşılıklı ayırmaları temin eden 9 ve 10 numaralı kısıtlar olduğu anlaşılmaktadır. Bu değerin yüksek çıkmasının nedenlerinden biri, karşılıklı trafiklerin tüm trafiğe oranının % 15 gibi bir değerde olmasına rağmen, bu trafiklerin en büyük ayırma süresi (coğrafi ayırma) gerektirdiğinden ve trafik talebinin geniş zaman aralıklarına yayılmayıp dar bir zaman aralığında kalmasındandır (yani yoğun talep olmasından).

Aynı yoldaki ve kesişen yolları kullanan uçakların ayrılması kısıtlarından doğu yönlü olanları içeren 6'ncı modelin çözümünde 34 birimlik, batı yönlü olanları içeren 7'inci modelin çözümünde ise 100 birimlik bekleme atanmıştır. 7'inci modelin atadığı gecikme sürelerinin, 6'ncıdan daha yüksek çıkmasının nedeni, Şekil 3.6'da verildiği gibi batılı uçuşların oranının daha fazla olmasından (%60) ve trafik yoğunluğundan kaynaklanmaktadır.

Sadece hava alanları iniş kapasite kısıtını barındıran Model 8'e bakıldığında 42 birimle, sadece hava alanları kalkış kapasite kısıtını barındıran 26 birimlik Model 9'dan daha fazla yer beklemesi atadığı görülmektedir. Bunun nedeni ise ilgili hava alanlarının, mevcut senaryodaki kapasite ve talep dağılımındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır.

Çizelge 3.8'de Model 1 çözüm sonuçları verilmektedir. Tüm kısıtların dikkate alındığı bu model daha ayrıntılı incelendiğinde; Çizelge 3.9' da görülebileceği gibi tüm uçakların %26'sına, yani 13 uçağa hiç bekleme atanmadan, planladıkları zaman diliminde kalkış yapmaları sağlanmaktadır. Buna karşılık tüm uçakların %74'üne karşılık gelen 37 tane uçağa yer beklemesi atanarak, planlandıkları zaman diliminde kalkışları gerçekleştirilememekte, yani uçaklar geciktirilmektedir.

Çizelge 3.8. Model 1 çözüm sonuçları

	PLANLANAN ZAMANLAR				HESAPLANAN ZAMANLAR				TOPLAM
UÇUŞ NO	1. DÜĞÜM	2. DÜĞÜM	3. DÜĞÜM	4. DÜĞÜM	1. DÜĞÜM	2. DÜĞÜM	3. DÜĞÜM	4. DÜĞÜM	BEKLEME
1	1	17	37	57	1	17	37	57	0
2	4	20	36	68	22	38	54	86	18
3	8	24	44	64	8	24	44	64	0
4	13	29	45	77	52	68	84	116	39
5	20	36	56	76	48	64	84	104	28
6	23	39	59	79	44	60	80	100	21
7	30	46	66	86	36	52	72	92	6
8	33	49	69	89	40	56	76	96	7
9	33	49	65	97	82	98	114	146	49
10	50	66	86	106	56	72	92	112	6
11	56	72	92	112	60	76	96	116	4
12	63	79	99	119	64	80	100	120	1
13	68	84	104	124	68	84	104	124	0
14	73	89	109	129	73	89	109	129	0
15	15	35	55	71	36	56	76	92	21
16	20	48	56	68	29	57	65	77	9
17	40	68	76	88	40	68	76	88	0
18	40	60	80	96	41	61	81	97	1
19	44	72	80	92	44	72	80	92	0
20	50	78	86	98	52	80	88	100	2
21	56	84	92	104	56	84	92	104	0
22	61	89	97	109	66	94	102	114	5
23	61	81	101	117	61	81	101	117	0
24	72	92	112	128	72	92	112	128	0
25	80	108	116	128	88	116	124	136	8
26	92	120	128	140	93	121	129	141	1
27	92	112	132	148	92	112	132	148	0
28	93	113	133	149	96	116	136	152	3
29	101	129	137	149	101	129	137	149	0
30	102	130	138	150	109	137	145	157	7
31	103	131	139	151	105	133	141	153	2
32	116	144	152	164	117	145	153	165	1
33	15	27	35	63	15	27	35	63	0
34	20	32	40	68	45	57	65	93	25
35	44	56	64	92	75	87	95	123	31
36	47	59	67	95	113	125	133	161	66
37	50	62	70	98	109	121	129	157	59
38	53	65	73	101	105	117	125	153	52
39	5	37	53	69	21	53	69	85	16
40	12	44	60	76	17	49	65	81	5
41	42	74	90	106	44	76	92	108	2
42	58	90	106	122	58	90	106	122	0
43	65	97	113	129	68	100	116	132	3
44	69	101	117	133	76	108	124	140	7
45	71	103	119	135	72	104	120	136	1
46	75	107	123	139	80	112	128	144	5
47	80	112	128	144	93	125	141	157	13
48	99	131	147	163	117	149	165	181	18
49	103	135	151	167	121	153	169	185	18
50	107	139	155	171	109	141	157	173	2

Çizelge 3.10’da çözüm sonuçlarının bekleme süresi ve uçak sayısı yönünden analizi görülmektedir. Buna göre en az bekleme alan uçağın bekleme süresinin 0, en çok bekleme alan uçağın bekleme süresinin 66 birim olduğu görülmektedir. 50 uçak için toplamda 562 birimlik gecikme sonucunda tüm uçaklar için ortalama uçak başı gecikmesinin yaklaşık 11, gecikme alan uçaklar için uçak başı ortalama gecikmenin ise yaklaşık 15 birim olduğu görülmektedir. Bu da uçak hızlarına göre mesafelerin zamana dönüştürüldüğü bu modelde, örnek olarak uçak hızları eğer 500 knot (1,852 km/saat) olarak ele alınırsa her bir zaman dilimi 0,6 dakikaya karşılık geleceğinden dolayı; 15 birim 9 dakikalık bir süreyi, 11 birim 6,6 dakikalık bir süreyi, 66 birim 39,6 dakikalık bir süreyi, 562 birim ise 337,2 dakikalık (5,6 saat) bir süreyi ifade eder.

Çizelge 3.9. Model 1 çözüm sonuçları: uçak sayıları

	Adet	Toplam Sayıya Göre Oranı
Hiç bekleme almayan uçak	13	0,26
Bekleme alan uçak	37	0,74
Toplam uçak	50	1

Çizelge 3.10. Model 1 çözüm sonuçları: bekleme süreleri

	Süre (t)
Tüm uçaklar için toplam bekleme süresi	562
En kısa bekleme süresi	0
En uzun bekleme süresi	66
Bekleme alan uçaklar için uçak başı ortalama bekleme süresi	15,2
Tüm uçaklar için uçak başı ortalama bekleme süresi	11,24

Çizelge 3.11’de tüm uçuşların kalkışlarını yapıp, inişleriyle birlikte uçuşlarını sonlandırdığı planlanan zaman aralığının 171 birim (102 dakika) olduğu görülmektedir. Hesaplanan zamanın da bu zamanı yaklaşık %7’e karşılık gelen sadece 14 birim aşarak 185 (111 dakika) olduğu görülmektedir. Böylece

ilgili zaman aralığını çok az aşan bir sürede tüm uçaklar operasyonunu tamamlamaları sağlanabilmektedir.

Çizelge 3.12’de tüm uçakların uçuş süreleri 2776 birim, en kısa uçuşun 48 (bunlar 3’üncü ve 6’ıncı rotayı kullanan uçaklardır), en uzununun 64 (2’inci ve 5’inci rotayı kullanan uçaklardır), uçak başı ortalama uçuş süresinin yaklaşık 55 birim olduğu ve tüm uçakların toplam bekleme süresinin toplam uçuş süresine oranının yaklaşık %20 olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.11. Model 1 çözüm sonuçları: planlanan ve hesaplanan zaman aralıkları

	Planlanan	Hesaplanan
En erken kalkış zamanı	1	1
En geç kalkış zamanı	116	121
En erken iniş zamanı	57	57
En geç iniş zamanı	171	185

Çizelge 3.12. Model 1 çözüm sonuçları: süreler

Tüm uçakların uçuş süresi	2776
En kısa uçuş süresi	48
En uzun uçuş süresi	64
Uçak başı ortalama uçuş süresi	55,52
Tüm uçaklar için toplam bekleme süresinin toplam uçuş süresine oranı	0,20245

Kesişen rotalardan oluşan güncel sistemin hava sahası yol yapısı ve talep nedeniyle özellikle yoğun trafik durumunda uçağa müdahale edilmediği takdirde kaçınılmaz olan uçak çatışmalarının, kazaları engellemek için önlenmesi zorunludur. Hava trafik akış planlama modellerinde yol ağının bu yapısının, çatışmaların ve çatışmaları çözmek için gerekli ayırma prosedürlerinin ihmal edilmesi durumunda bu çalışmadaki modelden elde edilen bekleme süreleri kadar (ya da minimaların düşürülmesi durumunda elde edilecek bekleme süreleri kadar

süre) bekleme ya yere göre kat kat fazla maliyetli olan havada beklemeye dönüşecek ya da kontrolörün farklı seviye, hız, rota, uçuş başı değişimi gibi müdahalelerini gerekli kılarak yine maliyet artacak, kontrolör iş yükü artacaktır. Kontrolör iş yükünün artışı dolaylı olarak emniyeti düşürüp, kapasiteleri de olumsuz etkileyecektir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Hava ulaşımına olan talebin sürekli olarak artışı hava trafik yönetim sisteminde kapasite yetersizliğine ve tıkanıklıklara yol açmaktadır. Tıkanıklıklar sonucunda ise hava sahası ihlalleri, çatışmalar ve kazalar gibi emniyet sorunları ve gecikmeler oluşmakta, gecikmeler ise havayolu taşıyıcılarına maliyet artışı getirmektedir. ATFCM'in uyguladığı gecikmelerden yol kaynaklı olanlarından en büyük kısmını hava trafik kontrol kapasite kısıtı oluşturmaktadır. Ayrıca havaalanı kapasitesi de diğer önemli ATFCM gecikme nedenidir. Hava trafik kontrol kapasitesini arttıracak her türlü önlemin gecikmeleri ve maliyetleri azaltma konusunda çok büyük etkileri olacaktır. Tıkanıklıkları gidermek üzerine inşa edilmiş olan ATFM probleminde, daha çok parametre, değişken ve kısıtı hesaba katacak matematiksel modelleme ve optimizasyon yaklaşımı kullanılarak, daha etkin akış planlamaları yapılabilir ve gecikmeler azaltılabilir. Bu yönde yapılmış çeşitli kısıtları dikkate alan birçok çalışma yapılmıştır. Çoğu çalışmada, hava trafik hizmetlerinin en temel işlevi olan uçaklar arasındaki çatışmaları önleme çözümü dikkate alınmamıştır. Gerçekte uçak çatışmaları, hava trafik kontrolör iş yükünü ve dolayısıyla hava trafik kontrol kapasitesini etkileyen ve yok sayılamayacak kadar önemli olan bir unsurdur. Bunun daha planlama safhasında değerlendirilmesi kontrolör iş yükünü oldukça azaltacak ve dolayısıyla hava trafik kontrol kapasitesini arttıracaktır. Genellikle serbest uçuş kavramına hitap eden ve hava trafik akış yönetiminden bağımsız çok sayıda çatışma önleme modelleri vardır. Fakat çatışmaları önlemeyi de amaçlayan çok az sayıda hava trafik akış yönetim modeli bulunmaktadır. Az sayıdaki bu modellerse; ya ayırma görevini kontrolöre bırakmakta ya da güncel ATFM sistemine uyarlanabilecek durumda değildir.

Bu çalışmada hava trafik akış yönetimi için 0-1 tamsayılı programlama modeli sunulmuştur. Model hava alanlarının kalkış ve iniş kapasitelerinin aşılmasını ve uçak çatışmalarının gerçekleşmesini önlemek amacıyla uçak kalkış zamanlarını belirlemektedir. Bunu yaparken de planlanmış olan kalkış zamanı ile gerçekleşecek olan kalkış zamanı arasındaki farkı en aza indirerek, yerde bekleme süresini de azaltmaktadır. Uçak çatışma koşullarının, güncel hayatta kontrolörlerin kullanımına sunulmuş olan ICAO'nun 4444 numaralı "Procedures for Air

Navigation Services: Air Traffic Management” dökümanında belirlenmiş olan prosedürel ayırma minimalarına dayalı olarak tanımlanmış olması modeli özgün kılmakta ve modeli güncel hava trafik yönetim sistemine kolaylıkla uyarlanabilir kılmaktadır. Model, matematiksel programlama ve optimizasyon için bir bilgisayar yazılımı kullanılarak, 50 uçak ve 4 havaalanından oluşan sanal bir hava sahası ve talep-kapasite senaryosu üzerinden test edilip çözüme ulaşılmıştır. Bir ATFM modelinde çatışmaların dikkate alınmaması durumunda havada çözüm gereksiniminin ne kadar büyük olacağı, hesaplanmış olan gecikme sürelerinden anlaşılabilir.

Aşağıda bu modelin özellikleri ve faydaları ayrıntılı şekilde sunulmuştur:

- Ufki ayırma prosedürlerinden, yanlamasına ayırma minimaları ve mesafe esasına dayalı uzunlamasına ayırma minimaları kullanılmıştır. Prosedürlerden zaman esası yerine mesafe esasının seçilmesinin nedeni, minimumun daha düşük olması sayesinde daha yüksek kapasite temin etmesidir. Zaman esaslı ayırma ise çok daha kolay modellenebilmektedir.
- Bu model; hiç gözetim sistemi olmayan veya gözetim sistemi kayıpları yaşandığı zamanlarda hava sahalarındaki hava trafik akışlarının planlanmasında kullanıma uygundur. Gözetim sistemine sahip hava sahalarındaki akışların planlanmasında da kullanılabilir, fakat belirlenen ayırma minimaları, radar ayırma minimalarına göre daha yüksektir, bunun sonucunda sistemin verimliliği azalacak, fakat emniyet seviyesi yükselecektir.
- Mevcut model kısa vadeli olan taktik hava trafik akış yönetimi fonksiyonları (havaalanı kalkış ve iniş kapasiteleri dikkate alınarak tüm uçakların toplam uçuş maliyetini minimize edecek kalkış zamanlarının hesaplanması) ile hava trafik kontrol fonksiyonlarının (uçaklar arası mesafenin dökümünde belirlenmiş olan minimaların altına düşmesini engellemek üzere uçakların çarpışmalarını ve çatışmalarını engellemek) bir araya getirilmesine katkıda bulunarak daha bütünsel bir yaklaşım sunmaktadır. Böylece model, hava trafik yönetiminde hiyerarşik olarak üst seviyede yer alan hava trafik akış yönetimi ile bir alt seviyedeki hava trafik kontrol hizmeti arasında bir ara katman görevi görüp her iki seviyenin de etkinliğini arttırabilir.

- Model, uçak işleticileri tarafından optimum planlanmış olan uçuşun hız, irtifa ve rota gibi hiçbir parametresi değiştirilmeden, hem uygulaması en kolay, hem de maliyeti en düşük olan yerde bekletme çözümü uygulamaktadır.
- Modelde sektör kapasitesi veya yol kapasitesi kısıtları mevcut değildir. Modelde ilgili hava sahası tek sektör olarak düşünülmüştür. Bu hava sahasını alt sektörler bölüp, ilgili sektörlerdeki yollarda aynı anda uçacak uçakların sayısına kısıtlama getirmeye uygun olmasına rağmen bu gereksiz görülmüştür. Modelde diğer kaynakların neredeyse tamamının aksine, uçuş rotaları kat edilecek sektörler şeklinde tanımlanmamış, bunun yerine gerçekte olduğu gibi, düğümleri birleştiren hava yolları şeklinde ifade edilmiştir. Bu da sektör kapasitesinin yüzeysel şekilde tüm sektöre atanan bir sayısal değer olarak ifade edilme zorunluluğunu ortadan kaldırmakta, bunun yerine (hava durumu, seyrüsefer cihazlarındaki problemler, vb. nedenlerle) kapasitenin tam olarak düştüğü noktalar veya yollar belirlenerek, bunlardan geçen akış oranları kısıtlanıp optimum planlama yapılmasına imkan tanımaktadır. Yani sadece ilgili noktaların ayırma/ölçüm miniması zamana göre değişken atanarak yol kapasite problemi de kolayca ve en hassas şekilde ele alınabilir. Mevcut modelde, tüm zaman dilimleri için her düğüme sabit bir kapasite değeri verilmiştir, fakat her bir düğüme, farklı zaman dilimleri için farklı kapasiteler atayarak bu kısıtı da ilave etmek mümkündür. Model üzerinde bu değişiklik kolaylıkla yapılabilir.
- Mevcut modellerin neredeyse tamamında uçak rotaları seyrüsefer yardımcılarıyla tanımlanmış olan noktaları birleştiren hava yolları yerine, kat edilen sektörlerden oluşmaktadır. Bu da sistemi aşırı basite indirgenmesinden dolayı planlama ile gerçek operasyon arasında farklar oluşmasına neden olan bir unsurdur. Bu modeller sayesinde sektör kapasitesini aşmayacak şekilde planlama yapılabilmesine rağmen, sektörler arası akışlar az sayıda yoldan/noktadan geçeceği varsayılmakta ya da hangi noktadan geldiği hesaba katılmamaktadır. Bu modellerde her ne kadar sektör kapasitesi yüksek bir değer olarak atanabilse de, akış planlaması yollar/noktalar boyutunda ele alınmazsa, bu sınırlı sayıda noktada tıkanıklıklar oluşabilir. Bu özellikle bir sektöre olan talebin tüm komşu sektörlerden eşit sayıda bölünmüş/dağıtılmış

vaziyette gelmediği, birkaç sektörden geldiği zamanlarda oluşacaktır (ki gerçek koşullar da bu şekildedir). Tüm kapasite tek bir noktadan/yoldan karşılanamaz. Böyle bir planlama sayesinde bu noktalarda/yollarda aşırı trafik oluşacak ve bu; uygulanacak çözümlerin karmaşıklığını ve kontrolör iş yükünü arttırıp, emniyet seviyesini düşürecektir. Oluşan tıkanıklık probleminin uçakların uçuşu sırasında çözülmesi için uçakların optimum uçuş koşullarından sapmaları gerekecek ve bunun sonucunda da uçuş maliyetleri artacaktır.

- ATFM için geliştirilmiş olan modellerin neredeyse tamamında çatışmalar göz ardı edilmekte, bunları ele alan az sayıdaki modeller ise mevcut hava trafik akış yönetim sistemine uyumlu ve uygulanabilir değildir. Bunun nedeni mevcut yol ağı kullanımına bağımlı olunmayan serbest uçuşa dayalı tasarımlarıdır. Çatışmaların göz ardı edilmesi ise hafife alınamayacak kadar büyük bir varsayımdır. Çünkü çatışmaların sayısı ve yapısı hava trafik kontrolör iş yükünü doğrudan ve en çok etkileyen unsurdur. Kontrolör iş yükü de havaalanı ve sektör kapasitelerinin yanı sıra uçuşların emniyet seviyesini de etkilemektedir. Bu sorunlar ise hava trafik yönetiminin amacına ters düşmektedir. ATFM'den bağımsız olarak ele alınan çatışma çözümü için yapılan çalışmaların geçmişi çok uzun yıllara dayanmaktadır, fakat bunların neredeyse tamamı durumu taktik çözümlerle, gerçek zamanlı olarak ele almış; çoğu, uçak çifti şeklinde-mikro düzeyde çözümler sunmuş; sistem çapında ele alanların sadece birkaçı ise ATFM'in bazı fonksiyonlarını içinde barındırmıştır. Fakat görüldüğü kadarıyla bunların hiçbirisi mevcut ATC prosedürlerini içinde barındıran, kontrolörün ayırma amaçlı müdahale gereksinimini ortadan kaldıracak, mevcut ATFM sistemine kolaylıkla uyarlanabilir olan ve uçuşun kalkışından inişine kadar olan tüm operasyonunu barındıran bir çevrim dışı planlama modeli sunmamıştır.
- Deterministik talep ve kapasiteye dayalı bu model yörünge ve kapasite tahminlerinin doğruluğu daha yüksek olan kısa menzilli bölgesel trafik akışlarının planlanması için daha uygundur. Planlama süresi arttıkça belirsizlikler daha çok artmaktadır. Böyle durumlar için uzun süre önceden hassas ayırma minimalarını gözetmek zordur, ancak zaman esasına dayalı ayırma minimaları ve stokastik programlama, yapay zeka, simülasyon, vb.

yaklaşımlar daha uygundur. Fakat yörünge tahmin modellerinin gelişimine paralel olarak bu deterministik modelin kullanışlılığının artması beklenmektedir.

- Ayırma minimalarının dikkate alınmasıyla daha uçaklar kalkışını gerçekleştirmeden, planlama safhasından sonra parametrelerin bir daha değişim göstermeyeceği tek bir uçuş planıyla sorunlar çözülerek, insan (kontrolör) müdahalesi azaltılabilir. Böylece tüm sistemde insan hatasından kaynaklanacak emniyet, ekonomiklik ve verimde düşüş gibi istenmeyen sonuçlar azalabilir.
- Model diğer akış yönetim fonksiyonlarını da barındıran modellere entegre edildiğinde, saha kontrolde, uçakları ayırma amaçlı herhangi bir kontrolör müdahalesi gerektirmeyen bir akış sağlayarak, kontrolörlerin otomasyonun yüksek bir seviyesi olan izleyici konumuna yükseltilmesi, ihtiyaç duyulan kontrolör sayısının azaltılması, aynı sayıda kontrolör ile daha fazla sektöre hizmet verilebilmesi ya da mevcut kontrolörlerinin iş yükünün azaltılması gibi faydalar sağlayabilir.
- Uçuşların kalkıştan önce sadece bir kez planlanması ve uçuş rotalarının, seviyelerinin, hızların, kalkış ve varış zamanlarının uçuş esnasında değişim gereksinimi azaltılması sayesinde; hava yolu şirketlerinin operasyonlarını daha doğru tahmin etmeleri ve daha etkin planlamalar yapmaları sağlanabilir. Bu da yine şirketler açısından maliyetlerde düşüş getirecektir.
- Bu modelde önerilen ayırma kısıtlarındaki minimalar istenilen oranda düşürülebilir veya arttırılabilir. Bu sayede kontrolör iş yükünün düşürülmesi ve maximum trafik akışın sağlanması gibi iki çelişen amaç arasında herhangi birine istenilen oranda ağırlık verilerek, daha esnek bir hava trafik yönetimi sağlanabilir. Özellikle 1 numaralı yanlamasına ayırma minimasının, mevcut kurallara uyacak, kapasite artışını getirecek ve emniyeti etkilemeyecek şekilde daha düşük olarak belirlenme imkanı vardır.
- Modelde yer alan hava alanları, sektör giriş çıkış noktaları olarak da düşünülebilir (veya bir kısmı havaalanı, geriye kalan kısmı sektör giriş çıkış noktası). Bu durumda birim zamanda havaalanı kalkış ve iniş uçak sayısını belirleyen kısıtlar, bu noktalardan sektöre girmesine ve çıkmasına izin verilen uçak sayısı şeklinde ele alınabilir. Böylece model bir bakıma A.B.D'deki

ATFM'in MIT fonksiyonuna karşılık gelecektir. Model bu durumda hava trafik kontrolörü ya da akış yöneticisi tarafından kullanıma uygun olan çevrim içi bir hava trafik akış planlama ve kontrol modeli olarak karar destek sisteminde kullanılabilir. Böylece sektöre girmesine ve çıkmasına izin verilen uçak sayıları ve bunların giriş çıkış zamanları hesaplandığında, bu sistemi kullanmayan komşu sektördeki kontrolöre bu bilgiler iletilebilir ve ilgili sektörde uçaklar havada bekletilerek veya havaalanından geç kaldırılarak model çözümleri uygulanabilir. Diğer sektör de bu sisteme tabi ise sadece uçakların kalkışları geciktirilerek model çözümleri uygulanabilir.

- Planlamada çatışmalar dikkate alınmadığında, çatışma çözümü için uygulanacak tüm gecikmeler havada gerçekleşmek zorundadır. Böyle bir durumda ise hava gecikmeleri maliyetinin yer gecikmelerinden çok daha fazla olması nedeniyle ekonomiklik azalacaktır. Ayrıca havada yapılacak çözümler emniyet riski içermektedir.
- Modelde uçakların hangi noktada ne zaman olacağı bilgisi uçuş planından elde edilmiştir, fakat bu bilgi herhangi bir yörünge tahmin modelinden/aracından da elde edilip modelde kullanılabilir.

Çalışmadaki temel amaç prosedürer ayırma minimalarına dayalı olarak tanımlanmış çatışmaları engellemek üzere hava trafik akışlarını planlamak olduğundan; bunu şartları belli sınırlara çekerek tek bir çözüm biçimiyle test etmek mümkündür. Bu nedenle ve modelleme kolaylığı açısından birçok varsayım getirilmiştir. Aşağıda verilmiş olan bu varsayımlar ortadan kaldırılarak modelin işlevselliği ve etkinliği arttırılabilir:

- Diğer ATFM modellerinde olduğu gibi uçakların tırmanma ve alçalma safhaları ihmal edilmiştir.
- Her uçuş tek bacak olarak ele alınarak, uçuş bağlantıları dikkate alınmamıştır. Bu da modele eklenirse, uçak gecikmesi gerçekleştiğinde, sonraki uçuşa olan etkisi de hesaplanabilir.
- Her uçağın rotasının aynı sayıda düğümden oluştuğu kabul edilmiştir. Bu varsayımın kaldırılıp her uçak için değişken atanabilecek yapıya getirilmesi modeli daha kullanışlı kılacaktır.

- Modelin yanlamasına ayırma kısıtları, bir çift karşılıklı rota üzerinde tek çatışma noktası olan durumlarda uygulanabilir. Daha fazla sayıda karşılıklı rota ve çatışma noktası olduğunda modeldeki ilgili kısıtların çoğaltılması gibi bir değişiklik yapılmalıdır. Ayrıca çatışma noktasının düğüm numarasının her iki uçak rotası için de aynı olduğu varsayılmaktadır. Bu zorunluluğun da ortadan kaldırılması modeli daha kullanışlı hale getirecektir.
- Uçakların seyrüseferi esnasında doğu yönlü iken batılı olacak şekilde (ya da batılıyken doğulu olacak şekilde) yön değiştirmesi; ilgili yolda uçuş seviyesi ya da uçuş başı değişimi gibi hava trafik kontrolörünün gerçek zamanlı müdahalesini gerektirdiğinden bu durumlar modellenmemiştir. Bu sayede tam karşılıklı trafiklerin oluşması da engellenmektedir. Böylece karşılıklı ayırmanın uygulanmasına gerek kalmamaktadır.
- ATFM için geliştirilmiş olan modellerinin birkaçı haricinde hiçbirinde problemin uçuş seviyesi boyutu ele alınmamıştır. Bu çalışmada problem, doğu yönlü uçuşlar için ayrı, batı yönlü uçuşlar için ayrı olan iki bağımsız uçuş seviyesinde ele alınmıştır. Her bir uçuş seviyesine olan talep girdileri için model çözümü ayrı ayrı uygulanmak suretiyle tüm hava sahasını dikey boyutta da kapsayacak şekilde kullanılabilir. Hava sahasındaki trafik yoğunlukları genellikle belli seviyelerde yaşandığı için bu büyük bir önem taşımamaktadır. Fakat modele, tüm seviyelerdeki ayırmaları tek seferde temin edecek şekilde bir iyileştirme kolaylıkla yapılabilir.
- Modelde diğer ATFM modellerinin çoğunda olduğu gibi uçak hızları sabit olarak ele alınmaktadır. Modele hızları farklı olan uçaklar ve bunların ayrılması için gerekli kısıt da eklendiğinde modelin etkinliği ve verimliliği daha fazla artacaktır. Çünkü bu durumda ayırma minimaları daha çok düşmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] ICAO, *Procedures for Air Navigation Services: Air Traffic Management*, Canada, 2007.
- [2] Leal de Matos, P.L. ve Powell, P.L., "Decision support for flight re-routing in Europe," *Decision Support Systems*, **34**, 397-412, 2003.
- [3] EUROCONTROL, *Air Traffic Flow & Capacity Management Operations ATFCM Users Manual*, CFMU/User Relations and Development Bureau, Belgium, 2009.
- [4] EUROCONTROL, *Air Traffic Flow & Capacity Management Operations ATFCM Users Manual*, Belgium, 2012.
- [5] FAA, *Traffic Flow Management in the National Airspace System*. A.B.D., 2009.
- [6] EUROCONTROL, *A Matter of Time: Air Traffic Delay in Europe*. Belgium, 2007.
- [7] EUROCONTROL, *Network Manager Annual Network Operations Report 2011*. Belgium, 2012.
- [8] EUROCONTROL, *Performance Review Report An Assessment of Air Traffic Management in Europe during the Calendar Year 2011*. PRC Raporu, 2012.
- [9] EUROCONTROL, *CODA Digest Delays to Air Transport in Europe Annual 2011*. CODA Raporu, Belçika, 2012.
- [10] EUROCONTROL, *Long-Term Forecast: IFR Flight Movements 2010-2030*. STATFOR Raporu, No: 415, Belgium, 2010.
- [11] Hürlimann, T., *Mathematical Modeling and Optimization*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1999.
- [12] Cinemre, N., *Yöneylem Araştırması*, Evrim Yayınevi, İstanbul, 2011.
- [13] Kara, İ., *Doğrusal programlama*, Bilim Teknik Yayınevi, Ankara, 2000.
- [14] Wolsey, L.A., *Integer Programming*, John Wiley & Sons Inc., USA, 1998.
- [15] Bianco, L., *Strategic Control to Improve Efficiency of ATM*. AGARD-CP-410 Raporu, 1986.

- [16] Bianco, L., "Multilevel Approach to ATC Problems: On-line Strategic Control of Flights," *International Journal of Systems Science*, **21**, 1515-1527, 1990.
- [17] Bianco, L., "Optimization Models on Techniques to improve ATM," *Aircraft Trajectories Computation-Prediction-Control*, **2**, 18-1/ 18-21, 1991.
- [18] Bianco, L. ve Bielli, M., "ATM: Optimization Models and Algorithms," *Journal of Advanced Transportation*, **26**, 131-167, 1992.
- [19] Agustín, A., Alonso-Ayuso, A., Escudero, L.F. ve Pizarro, C., "Mathematical Optimization models for Air Traffic Flow Management: A review," *Combinatorial Optimization in Practice*, 141–184, 2010.
- [20] Sridhar, B., Grabbe, S.R. ve Mukherjee, A., "Modeling and Optimization in Traffic Flow Management," *Proceedings of the Ieee*, **96**, 2060-2080, 2008.
- [21] Terrab, M. ve Odoni, A.R., "Strategic Flow Management for Air-Traffic-Control," *Operations Research*, **41**, 138-152, 1993.
- [22] Andreatta, G. ve Romanin-Jacur, G., "Aircraft Flow Management under Congestion," *Transportation Science*, **21**, 249, 1987.
- [23] Richetta, O. ve Odoni, A.R., "Solving Optimally the Static Ground-Holding Policy Problem in Air-Traffic-Control," *Transportation Science*, **27**, 228-238, 1993.
- [24] Ball, M.O., Hoffman, R., Odoni, A.R. ve Rifkin, R., "A stochastic integer program with dual network structure and its application to the ground-holding problem," *Operations Research*, **51**, 167-171, 2003.
- [25] Gao, H.J., Chen, L. ve Chen, D.W., "Air traffic fuzzy control of the single airport ground-holding problem," *Ieee Intelligent Transportation Systems Proceedings*, **1,2**, 703-707, 2003.
- [26] Mukherjee, A. ve Hansen, M., "A dynamic Stochastic model for the single airport ground holding problem," *Transportation Science*, **41**, 444-456, 2007.

- [27] Richetta, O. ve Odoni, A.R., "Dynamic solution to the ground-holding problem in air traffic control," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **28**, 167-185, 1994.
- [28] Odoni, A., "The Flow Management Problem in Air Traffic Control," *Flow Control of Congested Networks* (Ed: Amedeo R. Odoni, Lucio Bianco ve Szegö, G.), Springer-Verlag, Berlin, Germany, 269-288, 1987.
- [29] Hoffman, R.L., *Integer Programming Models for Ground Holding In Air Traffic Flow Management*, Doktora Tezi, University of Maryland, Faculty of the Graduate School, A.B.D., 1997.
- [30] Hoffman, R. ve Ball, M.O., "A Comparison of Formulations for the Single-Airport Ground-Holding Problem with Banking Constraints," *Operations Research*, **48**, 578-590, 2000.
- [31] Ball, M.O., Hoffman, R., Odoni, A.R. ve Rifkin, R., *The Static Stochastic Ground Holding Problem with Aggregate Demands*. NEXTOR Raporu, No: RR-99-1, A.B.D., 1999.
- [32] Dell'Olmo, P. ve Lulli, G., "A dynamic programming approach for the airport capacity allocation problem," *IMA Journal of management mathematics*, **14**, 235-249, 2003.
- [33] Idrissi, A. ve Li, C.M., "Modeling and optimization of the capacity allocation problem with constraints." *Modelization and Simulation Systems Conference*, Rabat, Morocco, 2006.
- [34] Richetta, O., "Optimal Algorithms and a Remarkably Efficient Heuristic for the Ground-Holding Problem in Air Traffic Control," *Operations Research*, **43**, 758-770, 1995.
- [35] Vranas, P.B., Bertsimas, D.J. ve Odoni, A.R., "The Multi-Airport Ground-Holding Problem in Air Traffic Control," *Operations Research*, **42**, 249-261, 1994.
- [36] Zhang, X.J., Zhou, Y., Liu, B. ve Wang, Z., "The air traffic flow management with dynamic capacity and co-evolutionary genetic algorithm," *Ieee Intelligent Transportation Systems Conference*, **1, 2**, 487-492, 2007.

- [37] Andreatta, G., Dell'Olmo, P. ve Lulli, G., "An aggregate stochastic programming model for air traffic flow management," *European Journal of Operational Research*, **215**, 697-704, 2011.
- [38] Helme, M.P., "Reducing air traffic delay in a space-time network," *IEEE International Conference on Systems, Management and Cybernetics*, Chicago, A.B.D., 236-242, 1992.
- [39] Lulli, G. ve Odoni, A., "The European air traffic flow management problem," *Transportation Science*, **41**, 431-443, 2007.
- [40] Ma, Z.P., Cui, D.G. ve Cheng, P., "Dynamic network flow model for short-term air traffic flow management," *Ieee Transactions on Systems Man and Cybernetics Part a-Systems and Humans*, **34**, 351-358, 2004.
- [41] Andreatta, G., Brunetta, L. ve Guastalla, G., "Multi-airport ground holding problem: a heuristic approach based on priority rules," *Modelling and simulation in air traffic management*, 71, 1997.
- [42] Andreatta, G. ve Brunetta, L., "Multiairport Ground Holding Problem: A Computational Evaluation of Exact Algorithms," *Operations Research*, **46**, 57-64, 1998.
- [43] Brunetta, L., Guastalla, G. ve Navazio, L., "Solving the multi-airport Ground Holding Problem," *Annals of Operations Research*, **81**, 271-287, 1998.
- [44] Navazio, L. ve Romanin-Jacur, G., "The multiple connections multi-airport ground holding problem: Models and algorithms," *Transportation Science*, **32**, 268-276, 1998.
- [45] Vranas, P.B., Bertsimas, D.J. ve Odoni, A.R., "Dynamic Ground-Holding Policies for a Network of Airports," *Transportation Science*, **28**, 275-291, 1994.
- [46] Bertsimas, D. ve Patterson, S.S., "The air traffic flow management problem with enroute capacities," *Operations Research*, **46**, 406-422, 1998.
- [47] Mukherjee, M. ve Hansen, M., "Dynamic Stochastic Optimization Model for Air Traffic Flow Management with En Route and Airport Capacity

- Constraints," *6th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar*, Maryland, A.B.D., 27-30, 2005.
- [48] Churchill, A.M., Lovell, D.J. ve Ball, M.O.B., "Evaluating a New Formulation for Large-Scale Traffic Flow Management," *8. USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar*, California, A.B.D., 2009.
 - [49] Bertsimas, D., Lulli, G. ve Odoni, A., "The air traffic flow management problem: An integer optimization approach," *Integer Programming and Combinatorial Optimization*, **5035**, 34-46, 2008.
 - [50] Mukherjee, A. ve Hansen, M., "A dynamic rerouting model for air traffic flow management," *Transportation Research Part B-Methodological*, **43**, 159-171, 2009.
 - [51] Agustí'n, A., Alonso-Ayuso, A., Escudero, L.F. ve Pizarro, C., "On air traffic flow management with rerouting. Part I: Deterministic case," *European Journal of Operational Research*, **219**, 156-166, 2012.
 - [52] Agustí'n, A., Alonso-Ayuso, A., Escudero, L.F. ve Pizarro, C., "On air traffic flow management with rerouting. Part II: Stochastic case," *European Journal of Operational Research*, **219**, 167-177, 2012.
 - [53] Bertsimas, D. ve Patterson, S.S., "The Traffic Flow Management Rerouting Problem in Air Traffic Control: A Dynamic Network Flow Approach," *Transportation Science*, **34**, 239, 2000.
 - [54] Sherry, J., Ball, C. ve Zobell, S., "Traffic flow management (tfm) weather rerouting," *4th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar*, New Mexico, A.B.D., 2001.
 - [55] Nilim, A., El Ghaoui, L. ve Duong, V., "Robust Dynamic Routing of Aircraft under Uncertainty," *21st Digital Avionics Systems Conference*, California, A.B.D., 1A5-1-1A5-13, 2002.
 - [56] Nace, D., Carlier, J., Doan, N.L. ve Duong, V., "A Linear Programming Approach For Route And Level Flight Assignment," *5. USA/Europe ATM 2003 R&D Seminar*, Budapest, Hungary, 2003.

- [57] Li, X., Xu, X.H., Wang, C. ve Li, D.B., "Establishment of Flight Rerouting Area and Air Route Planning based on Convex Polygon," *Chinese Control and Decision Conference*, **1.11**, 3083-3088, 2008.
- [58] Rosenberger, J.M., Johnson, E.L. ve Nemhauser, G.L., "Rerouting Aircraft for Airline Recovery," *Transportation Science*, **37**, 408-421, 2003.
- [59] Leal, M.P., Chen, B. ve Ormerod, R.J., "Optimisation models for re-routing air traffic flows in Europe," *Journal of the Operational Research Society*, **52**, 1338-1349, 2001.
- [60] Richards, A. ve How, J.P., "Aircraft trajectory planning with collision avoidance using mixed integer linear programming," *American Control Conference Proceedings of the 2002*, **3**, 1936-1941, 2002.
- [61] Bertsimas, D., Lulli, G. ve Odoni, A., "An Integer Optimization Approach to Large-Scale Air Traffic Flow Management," *Operations Research*, **59**, 211-227, 2011.
- [62] Barnier, N. ve Brisset, P., "Graph coloring for air traffic flow management," *Annals of Operations Research*, **130**, 163-178, 2004.
- [63] Nace, D., Carlier, J., Nhat Linh, D. ve Duong, V., "Using dynamic flow network modeling for aircraft route assignment," *The 21st Digital Avionics Systems Conference*, 1A3-1-1A3-9, 2002.
- [64] Duong V., Gawinowski, G., Nicolaon, J.P., ve Smith, D., "Sector-Less Air Traffic Management", *The 4th ATM R&D Seminar*, Santa Fe, A.B.D., 2001.
- [65] Bloem, M., Hattaway, D. ve Bambos, N., Evaluation of algorithms for a miles-in-trail decision support tool, *Proc. of International Conference on Research in Air Transportation*, California, A.B.D., 2012.
- [66] Wang, P.T.R., Wanke, C.R. ve Wieland, F.P., "Modeling time and space metering of flights in the national airspace system," *Simulation Conference, 2004. Proceedings of the 2004 Winter*, **2**, 1299-1304, 2004.
- [67] NASA, <http://www.aviationsystemsdivision.arc.nasa.gov/research/foundations/index.shtml>, 2011.

- [68] Böhme, D., "Tactical departure management with the Eurocontrol/DLR DMAN." *6th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar*, Maryland, A.B.D., 2005.
- [69] EUROCONTROL, *Arrival Manager Implementation guidelines and lessons learned*. Belgium, 2010.
- [70] Mao, Z.H., Feron, E. ve Bilimoria, K., "Stability of intersecting aircraft flows under decentralized conflict avoidance rules." *Ieee Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **2**, 101-109, 2000.
- [71] Dell'Olmo, P. ve Lulli, G., "A new hierarchical architecture for Air Traffic Management: Optimisation of airway capacity in a Free Flight scenario," *European Journal of Operational Research*, **144**, 179-193, 2003.
- [72] Sherali, H.D., Staats, R.W. ve Trani, A.A., "An airspace planning and collaborative decision-making model: Part I—Probabilistic conflicts, workload, and equity considerations," *Transportation Science*, **37**, 434-456, 2003.
- [73] Sherali, H.D., Smith, J.C. ve Trani, A.A., "An airspace planning model for selecting flight-plans under workload, safety, and equity considerations," *Transportation Science*, **36**, 378-397, 2002.
- [74] Sherali, H.D., Smith, J.C., Trani, A.A. ve Sale, S., "National airspace sector occupancy and conflict analysis models for evaluating scenarios under the free-flight paradigm," *Transportation Science*, **34**, 321-336, 2000.
- [75] Sherali, H.D., Staats, R.W. ve Trani, A.A., "An Airspace-Planning and Collaborative Decision-Making Model: Part II—Cost Model, Data Considerations, and Computations," *Transportation Science*, 147-164, 2006.
- [76] Le Ny, J. ve Pappas, G.J., "Joint Metering and Conflict Resolution in Air Traffic Control," *Journal of Guidance Control and Dynamics*, **34**, 1507-1518, 2011.
- [77] Alonso-Ayuso, A., Escudero, L.F., Olaso, P. ve Pizarro, C., "Collision avoidance: 0–1 linear models for conflict detection and resolution," *TOP*, **19**, 2011.

- [78] NRC, *Weather Forecasting Accuracy for FAA Traffic Flow Management: A Workshop Report*, National Academies Press, A.B.D., 2003.
- [79] ICAO, *Annex 2 to the Convention on International Civil Aviation: Rules of the Air*, Canada, 2005.