

**HAVA TRAFİK AKIŞINDA  
GECİKMELERİ ENKÜÇÜKLEYEN  
İKİ AŞAMALI ÇÖZÜM YAKLAŞIMI**

**Doktora Tezi**

**Ramazan Kürşat Çeçen  
Eskişehir, 2018**

**HAVA TRAFİK AKIŞINDA GECİKMELERİ ENKÜÇÜKLEYEN  
İKİ AŞAMALI ÇÖZÜM YAKLAŞIMI**

**Ramazan Kürşat Çeçen**

**DOKTORA TEZİ**

**Hava Trafik Kontrol Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Cem ÇETEK**

**Eskişehir**

**Anadolu Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Haziran, 2018**

*Bu tez çalışması BAP Komisyonunca kabul edilen 1707F454 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.*

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

**Ramazan Kürşat ÇEÇEN** 'in “**Hava Trafik Akışında Gecikmeleri Enküçükleyen İki Aşamalı Çözüm Yaklaşımı**” başlıklı tezi 04/06/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek “Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca, Hava Trafik Kontrol Anabilim dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

	<b>Ünvanı Adı-Soyadı</b>	<b>İmza</b>
<b>Üye (Tez Danışmanı)</b>	<b>: Doç. Dr. Cem ÇETEK</b>	.....
<b>Üye</b>	<b>: Prof. Dr. Aydan CAVCAR</b>	.....
<b>Üye</b>	<b>: Prof. Dr. İnci SARIÇİÇEK</b>	.....
<b>Üye</b>	<b>: Doç. Dr. Tuğba SARAÇ</b>	.....
<b>Üye</b>	<b>: Dr. Öğr. Üyesi Özlem ŞAHİN</b>	.....

**Enstitü Müdürü**

## ÖZET

### HAVA TRAFİK AKIŞINDA GECİKMELERİ ENKÜÇÜKLEYEN İKİ AŞAMALI ÇÖZÜM YAKLAŞIMI

Ramazan Kürşat ÇEÇEN

Hava Trafik Kontrol Anabilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran 2018

Danışman: Doç. Dr. Cem ÇETEK

Bu çalışma kapsamında serbest rotalı hava sahalarındaki uçuş operasyonlarında meydana gelebilecek çakışmaların çözümlerinden kaynaklanan gecikmeler ile çözüm manevralarının neden olduğu yakıt sarfiyatının en küçüklenmesine yönelik iki aşamalı bir çözüm yaklaşımı ortaya konmuştur. Bu yaklaşım ile hava trafik yönetiminde uçuşların çevrim içi stratejik kontrolü aşamasında kullanılacak bir karar destek sistemine matematiksel bir temel sağlanması amaçlanmaktadır. Çözüm yönteminin ilk aşamasındaki matematiksel model uçakların çakışmalardan kaynaklı gecikmeleri en küçüklemek için mevcut sektör giriş noktalarının her iki yanına alternatif giriş noktası açılarak uçakların en uygun giriş noktasından sektöre giriş yapmaları sağlanmaktadır. İkinci aşamada ise gecikme sürelerine uygun ve aynı zamanda çakışmadan kaynaklı ekstra yakıt sarfiyatının da en küçükleneceği bir vektör manevrası önerilmektedir. İlk aşamanın çözümü için GAMS/CPLEX kullanılmış fakat makul bir sürede çözüm elde edilememiştir. Bu durumda problemin çözümü için genetik algoritma ve yasaklı arama algoritması çözüm yöntemi olarak kullanılmıştır. Meta sezgisellerin performansının ölçülmesi için küçük ölçekli test problemleri oluşturularak elde edilen sonuçlar GAMS/CPLEX çözücüsünün sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda her iki algoritmanın da kısa süre içerisinde en iyi çözüme yakın sonuçlar ürettiği görülmüştür. Önerilen yaklaşım ile referans duruma göre büyük boyutlu hava sahalarında meydana gelen çakışmadan kaynaklı gecikmelerde yaklaşık %88, gecikmelerden kaynaklı yakıt sarfiyatlarında ise yaklaşık %90 oranlarında iyileşmeler yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Çakışma Saptama ve Önleme, Matematiksel Modelleme, Karma Tam Sayılı Programlama, Doğrusal Olmayan Programlama, Havada Gecikme Azaltma

**ABSTRACT**  
**A TWO-STEP SOLUTION APPROACH FOR AIR TRAFFIC FLOW DELAY**  
**MINIMIZATION**

Ramazan Kürşat ÇEÇEN  
Department of Air Traffic Control

Anadolu University, Graduate School of Sciences, June 2018

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Cem ÇETEK

This study proposes a two-step solution approach for minimizing airborne delays due to conflict resolutions and fuel consumption due to resolution maneuver occurring in free route airspace. This model aims to provide a mathematical basis for a decision support system that is used during the online strategic control of flights in air traffic management. Mathematical model of the first step presents an alternative entry points on both side of existing sector entry points to minimize delays by directing aircraft to the most convenient entry points. The second step suggests a vector maneuver to minimize extra fuel consumption caused by conflict resolution. GAMS/CPLEX solver is used to solve first stage of the model but the solution is not produced in a reasonable time. To obtain feasible solutions genetic algorithm and tabu search algorithms are implemented the first stage. Small size test problems are generated to evaluate the meta-heuristic algorithms and results compared with GAMS/CPLEX solver solutions. According to this comparison both meta- heuristics algorithms produce near optimal solutions in a short time. The proposed approach has made approximately %88 and %90 improvements for airborne delays and extra fuel consumptions caused by aircraft conflicts resolution in large-scaled airspaces.

**Keywords:** Conflict Detection and Resolution, Mathematical Modelling, Mixed Integer Programming, Nonlinear Programming, Airborne Delay Reduction

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, doktora süresi boyunca değerli bilgilerini benimle paylaşan, kullandığı her kelimenin hayatıma kattığı önemini daima hatırlayacağım saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Cem Çetek'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme jürimdeki sayın hocam Prof. Dr. Aydan Cavcar ve sayın hocam İnci Sarıççek'e doktora süresi boyunca bana verdikleri desteklerden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince bana destek vererek çalışmalarımı yönlendiren Doç. Dr. Tuğba Saraç'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her safhasında hep yanımda olmuş ve bugünlere gelmemde büyük emekleri olan sevgili annem Serap Çeçen ve sevgili babam Osman Nuri Çeçen'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezi hayatıma girdiği andan bugüne dek benim yanımda olan, bana güvenen ve inanan biricik eşim Gözem'e ve doğumuyla hayatımıza bambaşka bir mutluluk katan oğlum Can'a ithaf ediyorum.

**RAMAZAN KÜRŞAT ÇEÇEN**

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

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

.....  
Ramazan Kürşat Çeçen

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

BAŞLIK SAYFASI .....	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI .....	ii
ÖZET .....	iii
ABSTRACT .....	iv
TEŞEKKÜR .....	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ .....	1
2. HAVA TRAFİK SİSTEMİ.....	4
2.1. Hava Trafik Sisteminin Elemanları .....	4
2.1.1. Hava sahası .....	4
2.1.2. Hava araçları .....	5
2.1.3. Teknik donanım.....	5
2.1.3. İnsan gücü .....	6
2.2. Hava Trafik Hizmetleri .....	6
2.2.1. Hava trafik kontrol hizmeti.....	7
2.2.2. Uçuş bilgi hizmeti .....	8
2.2.3. İkaz (uyarı) hizmeti .....	8
2.3. Hava Trafik Yönetimi.....	9
2.3.1. Hava trafik yönetiminde planlama fonksiyonu .....	9
2.3.2. Hava trafik yönetiminde kontrol fonksiyonu .....	10
2.4. Serbest Rotalama .....	12
3. KAYNAK TARAMASI .....	14
3.1. Hava Trafik Akış Yönetimi .....	14
3.1.1. Yerde bekletme yaklaşımı.....	14
3.1.2. Genel taktik akış yönetimi yaklaşımları.....	17
3.2. Çakışma Saptama ve Çözümleme Yaklaşımları .....	19
3.2.1. Kesin çözüm yaklaşımları.....	20



3.2.2. Meta-sezgisel algoritmalar.....	21
<b>4. PROBLEMİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ .....</b>	<b>23</b>
4.1. Çakışma Durumları .....	24
4.1.1. Kesişen rotalı çakışmalar .....	25
4.1.2. Aynı rotada takip durumu.....	26
4.1.3. Aynı çıkış noktası kullanımı durumu .....	27
4.1.4. Aynı giriş noktası kullanım durumu .....	28
4.2. Vektör Manevrası.....	29
4.3. Yakıt Sarfiyatı .....	30
4.4. Matematiksel Model.....	36
4.4.1. Matematiksel modelin ilk aşaması.....	37
4.4.2 Matematiksel modelin ikinci aşaması.....	42
<b>5. ÇAKIŞMADAN KAYNAKLANAN TOPLAM GECİKMELERİ AZALTMAK İÇİN SEZGİSEL YAKLAŞIM ÖNERİSİ .....</b>	<b>46</b>
5.1. Genetik Algoritma.....	46
5.1.1. Kodlama .....	47
5.1.2. Başlangıç popülasyonunun türetilmesi.....	48
5.1.3. Uyum değerinin hesaplanması .....	48
5.1.4. Seçim işlemi.....	49
5.1.5. Çaprazlama .....	50
5.1.6. Mutasyon.....	53
5.2. Yasaklı Arama Algoritması.....	53
5.2.1. Başlangıç çözümünün üretilmesi .....	55
5.2.2. Komşu çözüm arama mekanizması .....	55
5.2.3. Kısa dönem hafıza .....	56
<b>6. DENEYSEL SONUÇLAR.....</b>	<b>58</b>
6.1. Test Problemlerinde Kullanılan Sektörler.....	58
6.2. GAMS/CPLEX Çözücü İle Elde Edilen Test Problemlerinin GA ve TS İle Karşılaştırılması .....	62
6.3. Jenerik Sektör Yapısının Sonuçları.....	68
6.3.1. Çakışmadan kaynaklı gecikmelerin hesaplanması .....	68
6.3.2. Çakışmadan kaynaklı yakıt sarfiyatlarının hesaplanması .....	76
6.3.2. Çakışmadan kaynaklı geciken uçak sayıları.....	78

<b>7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>82</b>
<b>KAYNAKÇA.....</b>	<b>85</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

<b>Çizelge 4.1.</b> Uçak performans parametreleri .....	31
<b>Çizelge 4.2.</b> Uçak seyir hızları .....	33
<b>Çizelge 4.3.</b> Boeing 777-300 dönüş yakıt sarfiyat katsayıları .....	36
<b>Çizelge 4.4.</b> Airbus A320 dönüş yakıt sarfiyat katsayıları .....	36
<b>Çizelge 4.5.</b> Embraer E190 dönüş yakıt sarfiyat katsayıları .....	36
<b>Çizelge 4.6.</b> Uçak yatış hareketinde yakıt sarfiyatının hesaplanması için kullanılan korelasyon değerleri .....	45
<b>Çizelge 5.1.</b> Rulet seçimi .....	50
<b>Çizelge 5.2.</b> Referans durum giriş noktaları.....	55
<b>Çizelge 5.3.</b> Yasak listesi gösterimi .....	57
<b>Çizelge 6.1.</b> Sektör I'e ait bilgiler .....	60
<b>Çizelge 6.2.</b> Sektör II'e ait bilgiler .....	61
<b>Çizelge 6.3.</b> Sektör III'e ait bilgiler.....	62
<b>Çizelge 6.4.</b> Meta-sezgisel algoritmalarda kullanılan parametreler .....	63
<b>Çizelge 6.5.</b> 20 uçak içeren test problemleri için GA ile edilen çözüm sonuçları .....	64
<b>Çizelge 6.6.</b> 20 uçak içeren test problemleri için TS algoritması ile edilen çözüm sonuçları.....	65
<b>Çizelge 6.7.</b> 25 uçak içeren test problemleri için GA ile edilen çözüm sonuçları .....	66
<b>Çizelge 6.8.</b> 25 uçak içeren test problemleri için TS algoritması ile edilen çözüm sonuçları.....	67
<b>Çizelge 6.9.</b> Jenerik yol hava sahası sektörünün rota uzunluk bilgileri .....	70
<b>Çizelge 6.10.</b> 20 uçak içeren jenerik sektör için GA ile edilen çözüm sonuçları.....	71
<b>Çizelge 6.11.</b> 20 uçak içeren jenerik sektör için TS algoritması ile edilen çözüm sonuçları.....	72
<b>Çizelge 6.12.</b> 25 uçak içeren jenerik sektör için GA ile edilen çözüm sonuçları.....	73
<b>Çizelge 6.13.</b> 25 uçak içeren jenerik sektör için TS algoritması ile edilen çözüm sonuçları.....	74
<b>Çizelge 6.14.</b> 20 uçak için gecikmeden kaynaklı ekstra yakıt sarfiyatları(kg .....	76
<b>Çizelge 6.15.</b> 25 uçak için gecikmeden kaynaklı ekstra yakıt sarfiyatları (kg) .....	77
<b>Çizelge 6.16.</b> 20 uçak için çakışmadan dolayı geciken uçak sayıları .....	79

**Çizelge 6.17.** 25 uçak için çakışmadan dolayı geciken uçak sayıları (adet).....80

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 1.1. 2030 yılına kadar beklenen büyüme oranları .....	1
Şekil 2.1. Hava trafik hizmetleri.....	6
Şekil 2.2. Uçaklar arasındaki saha kontrol ayırması .....	7
Şekil 2.3. Uçaklar arasında korunması gereken dikey ayırmalar .....	7
Şekil.2.4. Planlama ve kontrol modeli.....	
Şekil 2.5. Kontrol fonksiyonu.....	11
Şekil 2.6. Uçuşların stratejik kontrolünün gösterimi .....	12
Şekil 4.1. Referans durum çakışma noktası.....	23
Şekil 4.2. Çoklu giriş noktası yaklaşımı çakışma noktaları.....	24
Şekil 4.3. Kesişen rotalar çakışma geometrisi .....	25
Şekil 4.4. Aynı rota kullanımı .....	27
Şekil 4.5. Aynı çıkış noktasını kullanımı .....	28
Şekil 4.6. Aynı giriş noktası ve farklı çıkış noktaları kullanımı.....	29
Şekil 4.7. Dönüş hareketi sırasında kat edilen mesafeler .....	29
Şekil 4.8. Boeing 777 için FL330 da hız değişimine göre yakıt sarfiyatı .....	32
Şekil 4.9. Airbus A320 için FL330 da hız değişimine göre yakıt sarfiyatı .....	32
Şekil 4.10. Embraer E190 için FL330 da hız değişimine göre yakıt sarfiyatı.....	33
Şekil 4.11. Uçak dönüş hareketi .....	34
Şekil 4.12. Boeing 777 için FL330 sabit hızda yatış açısına göre yakıt sarfiyatı.....	34
Şekil 4.13 Airbus A320 için FL330 sabit hızda yatış açısına göre yakıt sarfiyatı .....	35
Şekil 4.14. Embraer E190 için FL330 sabit hızda yatış açısına göre yakıt sarfiyatı.....	35
Şekil 5.1. Genetik algoritma akış şemansı.....	47
Şekil 5.2. Kromozom yapısı .....	48
Şekil 5.3. Çaprazlama işlemi .....	51
Şekil 5.4. Ebeveyn 1 giriş noktası ataması .....	52
Şekil 5.5. Çocuk 1 giriş noktası ataması.....	52
Şekil 5.6. Mutasyon işlemi .....	53
Şekil 5.7. TS algoritması için örnek başlangıç çözümü ve kodlama yapısı .....	55
Şekil 5.8. Komşu çözüm üretme mekanizması.....	56
Şekil 6.1. Sektör I .....	59

<b>Şekil 6.2.</b> Sektör II.....	60
<b>Şekil 6.3.</b> Sektör III.....	61
<b>Şekil 6.4.</b> Jenerik sektör.....	69
<b>Şekil 6.5.</b> Çakışmadan kaynaklı ortalama gecikme süreleri.....	75
<b>Şekil 6.6.</b> Gecikmeden kaynaklı ekstra yakıt sarfiyat ortalamaları .....	78
<b>Şekil 6.7.</b> Geciken toplam uçak sayısı .....	81

## KISALTMALAR DİZİNİ

ATFM	: Air Traffic Flow Management Hava Trafik Akış Yönetimi
ATM	: Air Traffic Management Hava Trafik Yönetimi
ATC	: Air Traffic Control Hava Trafik Kontrol
ÇGNY	: Çoklu Giriş Noktası Yaklaşımı
CDR	: Conflict Detection and Resolution Çakışma Saptama ve Çözümleme
CTR	: Control Zone Kontrol Bölgesi
ECAC	: European Civil Aviation Conference Avrupa Sivil Havacılık Konferansı
FIS	: Flight Information Service Uçuş Bilgi Bölgesi
FIR	: Flight Information Region Uçuş Bilgi Bölgesi
FCFS	: First Come First Serve İlk Gelene İlk Hizmet
FIFO	: First In First Out İlk Giren İlk Çıkar
FL	: Flight Level Uçuş Seviyesi
GA	: Genetic Algorithm Genetik Algoritma
GPS	: Global Positioning System Küresel Konumlandırma Sistemi
HF	: High Frequency Yüksek Frekans
NB	: Narrow Body Dar Gövdeli

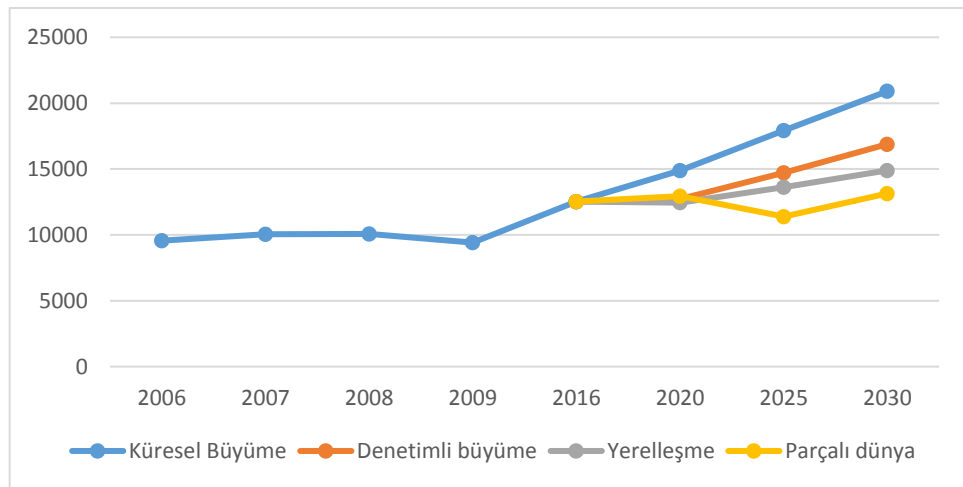
RD	: Referans Durum
RJ	: Regional Jet Bölgesel Jetler
TS	: Tabu Search Yasaklı Arama
TMA	: Terminal Control Area Terminal Kontrol Sahası
VNS	: Variable Neighborhood Search Değişken Komşuluk Arama
VHF	: Very High Frequency Çok Yüksek Frekans
WB	: Wide Body Geniş Gövdeli



## 1. GİRİŞ

Hava taşımacılığı dünyanın sosyal ve ekonomik yönden gelişmesine çok önemli katkılar sağlayan hızlı, verimli ve emniyetli bir ulaştırma sektörüdür. 2016 yılında havayollarını kullanan yolcu sayısının önceki yıla göre %8,8 artarak 3,8 milyara ulaştığı belirlenmiştir [1]. Küresel hava trafik yolcu talebinde son 5 yıllık ortalama büyümenin %6,2 olduğu saptanmıştır [2]. 2017 yılında Avrupa’ da gerçekleşen uçuş operasyon sayıları incelediğinde ise %4,5’lik bir artış görülmektedir. Bu rakam 2011’den günümüze kadar görülen en yüksek büyüme oranıdır. Ayrıca 2017 yılında Avrupa Sivil Havacılık Konferansı (European Civil Aviation Conference–ECAC) hava sahasında ortalama günlük uçuş sayısı 29.264 rakamını aşarak hava trafik yoğunluğunun en yüksek olduğu yıllardan biri olarak kayıtlara geçmiştir [3].

Eurocontrol ’ün 2012-2035 dönemi için Avrupa’da hava taşımacılığının hangi oranlarda büyüyeceğine ilişkin “küresel büyüme”, “denetimli büyüme”, “yerelleşme” ve “parçalı dünya” olmak üzere dört farklı öngörüsü bulunmaktadır. En olası senaryo olarak nitelendirilen denetimli büyümeye göre 2035 yılında 14,4 milyon uçuşun gerçekleşeceği tahmin edilmektedir. Bu sayı 2035 yılında gerçekleşecek uçuş sayısının 2012 yılına göre %50’den fazla artacağı anlamına gelmektedir. En kötü durum olan parçalı dünya senaryosuna göre bu artışın %20 ile sınırlı kalacağı en iyi durum olan küresel büyüme senaryosunda ise uçuş sayılarında %80’lik büyüme oranlarına ulaşılacağı tahmin edilmektedir [4].



Şekil 1.1. 2030 yılına kadar beklenen büyüme oranları [4]

Hava trafiğinde meydana gelen talep artışlarına rağmen hava sahası kapasitelerindeki iyileştirmeler bu artan talebe karşılık verememektedir. Bu durum hava sahalarında meydana gelen gecikmelerin artmasına neden olmaktadır. Gecikmelerin artması havayolu şirketlerin maliyetlerin artmasına, uçaklar arasındaki emniyetli ayırma ihlallerinin daha sık yaşanmasına ve hava trafik kontrolörlerinin iş yükünün artmasına yol açmaktadır. Ortaya çıkan kapasite-talep dengesi bozuklukları ve emniyet problemleri hava trafik yönetiminde gelişmiş teknolojik yapıların kullanılmasını bir zorunluluk haline getirmiştir. Hava trafik yönetiminde kullanılan otomasyon ve karar destek sistemleri hava trafik kontrolörlerinin daha doğru bilgiye daha kısa sürede ulaşarak hava trafiğinin etkili bir şekilde düzenlenmesi amacıyla kullanılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında serbest rotalı hava sahalarındaki uçuş operasyonlarında meydana gelebilecek çakışmaların çözümlerinden kaynaklanan gecikmelerin ve çözüm manevralarının neden olduğu yakıt tüketiminin en küçüklenmesine yönelik iki aşamalı bir matematiksel model ortaya konmuştur. Bu model ile hava trafik yönetiminde uçuşların çevrim içi stratejik kontrolü aşamasında kullanılacak bir karar destek sistemine matematiksel bir temel sağlanması amaçlanmaktadır. Modelde serbest rotalı hava sahası sektörlerinin mevcut sınırları, giriş ve çıkış noktaları korunmakla beraber mevcut giriş noktalarının her iki yanına birer alternatif giriş noktası açılarak havada çakışma kaynaklı oluşabilecek gecikmelerin azaltılması hedeflenmektedir. Böylelikle sektöre önceden planlanan mevcut noktalardan girecek uçakların sektör içinde oluşabilecek çakışma durumlarına göre bu alternatif noktalara yönlendirilerek çakışma geometrileri değiştirilebilecektir. Yol hava sahası sektörleri için bu yaklaşıma dayalı stratejik kontrol sağlayan bir matematiksel model literatür açısından özgün ve yenilikçidir.

Önerilen yaklaşımın ilk aşamasında sadece uçaklara uygun giriş noktası ataması yapılarak sektör içinde gecikmeye neden olmayan veya en az gecikme ile çözüm sağlanan çakışma geometrileri oluşturulmuştur. İlk aşama için oluşturulan karma tam sayılı doğrusal modelin çözümü için GAMS/CPLEX kullanılmış fakat beş saatlik bir süre sonunda başlangıç çözümü elde edilememiştir. Geliştirilen modelin hava trafik kontrolörlerine çevrim içi karar destek sistemi olarak sunulabilmesi için kısa sürede geçerli ve etkili bir çözümün elde edilmesi gerekmektedir. Bu nedenden dolayı ilk aşamanın çözülmesi için meta-sezgisel algoritmalara ihtiyaç duyulmuştur. Bu amaçla hem genetik algoritma hem de yasaklı arama algoritması kullanılmıştır. Meta sezgisel

algoritmaların performansının ölçülmesi için küçük ölçekli test problemleri oluşturularak GAMS/CPLEX çözücüsünün sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Modelin ikinci aşamasında ise çakışmalardan dolayı geciken uçakların vektör manevralarından kaynaklı yakıt tüketimini en küçükleyecek bir çözüm önerilmiştir. Bu aşamada doğrusal olmayan programlama kullanılarak GAMS/CONOPT ile çözümler elde edilmiştir.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde hava trafik sistemine ilişkin bazı temel kavramlar açıklanmıştır. Üçüncü bölümünde hava trafik akış yönetimi ve çakışma saptama ve çözümlene konuları üzerine kaynak taraması yapılmıştır. Dördüncü bölümünde problemin detaylı açıklaması, probleme ait özellikler ve önerilen matematiksel modelin her iki aşamasının detaylı olarak açıklaması yer almıştır. Beşinci bölümde önerilen matematiksel modelin çözümü için kullanılan meta-sezgisel yöntemler hakkında temel bilgiler verilip matematiksel modele nasıl uyarlandığı açıklanmıştır. Altıncı bölümünde deneysel sonuçlar incelenerek test problemlerine ait gecikme süreleri, gecikmeden kaynaklı yakıt tüketimleri ve geciken uçak sayıları detaylı olarak sunulmuştur. Çalışmanın yedinci bölümünde ise yapılan çalışma hakkında genel bir değerlendirme, elde edilen sonuçların yorumlanması ve daha sonra bu tezin üzerine yapılabilecek olan çalışmalar tartışılmıştır.

## **2. HAVA TRAFİK SİSTEMİ**

Bu bölümde hava trafik sisteminin elemanları, hava trafik hizmetleri, hava trafik yönetimi ve serbest rotalama kavramları tanıtılacaktır.

### **2.1. Hava Trafik Sisteminin Elemanları**

Hava trafik sistemi, havacılık faaliyetlerinin emniyetli, verimli ve ekonomik bir şekilde yürütülmesi amacı doğrultusunda, hava sahası, teknik donanım, hava araçları ve insan gücünden meydana gelen bir sistemdir [5].

#### **2.1.1. Hava sahası**

Hava sahaları, hava araçlarının uçuş operasyonlarını yürüttükleri yerdir. Hava sahaları kullanım durumu ve amaçlarına göre en genel olarak kontrollü ve kontrolsüz hava sahaları olmak üzere iki kısma ayrılırlar. Kontrollü hava sahaları sınırları ve boyutları belirli, içinde bulunduğu hava sahası sınıfına uygun hava trafik kontrol hizmetlerinin verildiği hava sahalarıdır [6]. Kontrolsüz hava sahaları ise pilotların hava trafik hizmetinden yararlanmadığı hava sahalarıdır. Kontrollü hava sahaları havaalanı, kontrol bölgesi, terminal kontrol sahası, hava yolları ve uçuş bilgi bölgesi olarak sınıflara ayrılabilir.

Havaalanları, hava araçlarının iniş, kalkış ve uçuş öncesi operasyonlarının düzenlenmesi için gerekli olan bina, tesis ve donanımların bulunduğu özel olarak düzenlenmiş kara veya suda bulunabilen sahalar olarak ifade edilebilir [7]. Kontrol bölgesi (CTR-Control Zone) havaalanını içine alan boyutları ve geometrisi belirli kontrollü hava sahalarıdır. Kontrol bölgeleri genellikle havaalanlarının merkezde bulunduğu yarıçapı ve yüksekliği belirli olan silindirik bir şekle benzeyen hava sahalarıdır. Terminal kontrol sahası (TMA- Terminal Control Area) içinde bir veya birden fazla havaalanının bulunduğu ve etrafındaki rotaların birleştiği alanda kurulu olan kontrollü hava sahalarıdır. Terminal hava sahaları içerisinde gelen veya giden uçakların tırmanma veya alçalma hareketlerinin yaptığı ve iniş uçakları için de trafik sıralamasının oluşturulduğu yerlerdir. Hava yolları, hava seyrüsefer cihazları ya da radyo seyrüsefer cihazları ile donatılmış koridor şeklinde tanımlanmış kontrollü bir saha ya da kontrollü bir sahanın bir bölümüdür. Uçuş bilgi bölgeleri (FIR-Flight Information Region) içinde uçaklara uçuş bilgisi ve ikaz hizmeti sağlandığı boyutları belirli olan hava sahalarıdır [6].

### **2.1.2. Hava araçları**

Hava araçları bir takım aerodinamik ve fizik kurallarına göre havada tutunarak sürdürülebilir uçuş gerçekleştirebilen havadan ağır araçlar olarak tanımlanabilir [8]. Bir hava sahası içinde bulunan tüm hava araçları hava trafik sisteminin birer elemanıdır. Uçuş halinde veya havaalanı içinde hareket halinde bulunan bütün uçaklar hava trafiği olarak isimlendirilir.

### **2.1.3. Teknik donanım**

Hava trafik hizmeti alan uçakların uçuşlarının daha emniyetli, verimli ve ekonomik gerçekleştirmesi için teknik donanımlardan faydalanılır. Teknik donanımın bileşenleri haberleşme, seyrüsefer ve gözetim olmak üzere üç ana başlıkta toplanmaktadır.

Haberleşme, hava trafik kontrolörleri ile pilotlar arasında veya pilotlar ile uçak işleticileri arasında telsiz yardımıyla çift yönlü gerçekleşen bir sistemdir. Haberleşme işlemi çok yüksek frekans (Very High Frequency–VHF) veya yüksek frekans (High Frequency-HF) üzerinden sözlü olarak yapılmaktadır. Bu iletişim sırasında iletilen mesajların anlaşılır ve açık olması gerekmektedir.

Seyrüsefer sistemleri hava sahaları içinde bulunan yolların oluşturulmasında ve uçakların bu yollar üzerinde uçuşlarının gerçekleştirmelerinde kullanılan teknik cihazlardır. Yolların sınırları, boyutları ve doğrultuları seyrüsefer sistemlerinden alınan bilgiler doğrultusunda belirlenmektedir. Ayrıca uçakların aldıkları pozisyon bilgisi de seyrüsefer yardımcılarının sayesinde elde edilmektedir [5]. Seyrüsefer yardımcıları yer tabanlı olabildiği gibi GPS (Global Positioning System-Küresel Konumlama Sistemi) gibi uydu tabanlı da olabilmektedir.

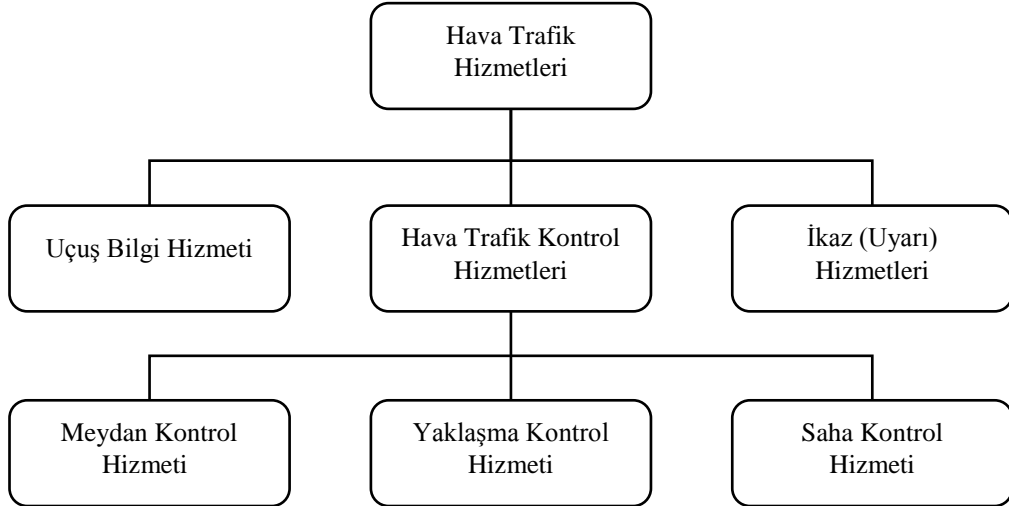
Gözetim işleminin amacı uçakların uçuşu sırasında yerden takibinin sağlanmasıdır. İzleme sistemlerinden alınan pozisyon, irtifa ve hız bilgileri ile belirli bir hava sahasında bulunan uçakların görüntüleri hava trafik kontrol birimlerine iletilir. Uçakların izlenmesi sayesinde oluşabilecek tehlikeli durumlar önceden tespit edilerek önlenmektedir.

### 2.1.3. İnsan gücü

Hava trafik sistemindeki insan gücü hava trafik kontrol kuleleri, briefing ofisleri, uçaklar ve havaalanları içinde çalışan personellerden oluşmaktadır. Hava trafik sistemindeki hava trafik kontrolörleri meydan kontrolörleri, yaklaşma kontrolörleri ve saha (yol) kontrolörleridir.

## 2.2. Hava Trafik Hizmetleri

Hava trafik hizmetleri, hava trafik faaliyetinin düzenlemesi ile uçuş ve yer emniyetinin artırılması için sağlanan hava trafik kontrol (ATC- Air Traffic Control) hizmeti, uçuş bilgi hizmeti, ikaz (uyarı) hizmeti ve hava trafik tavsiye hizmetlerinden oluşmaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Hava trafik hizmetleri

Hava trafik hizmetlerinin amaçları şu şekilde sıralanmaktadır [6];

- Uçaklar arasındaki çarpışmaları önlemek,
- Manevra sahasındaki uçakların birbirleri ile ve o sahadaki mâniyalara çarpmasını önlemek,
- Trafik akışını sürdürmek ve hızlandırmak,
- Uçuşların emniyetli ve etkili bir biçimde yürütülmesi için faydalı tavsiye ve bilgileri sağlamak,

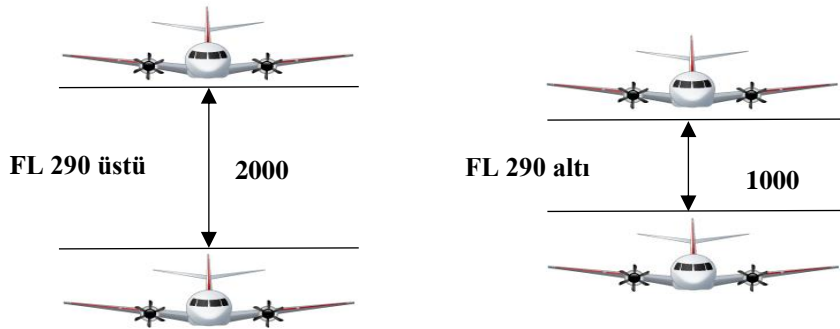
- Arama ve kurtarmaya ihtiyaç duyulan uçakları ilgili kuruluşlara iletmek ve istenildiğinde bu kuruluşlara yardımcı olmak.

### 2.2.1. Hava trafik kontrol hizmeti

Hava araçlarının yerdeki ve havadaki hareketlerini kontrol etmek ve birbirleriyle çarpışmalarını önleyerek emniyetli ve verimli bir hava trafik akışının sağlanması amacıyla verilen hizmetlerdir [6]. Hava trafik kontrolleri uçaklar arasında emniyetli ayırma mesafesini sağlamak için uçaklar arasında belirli bir mesafeyi korumak zorundadırlar. Bu mesafe aynı uçuş seviyesinde bulunan uçaklar için yaklaşma kontrol hizmetinde 3 deniz mili, saha kontrol hizmeti için ise 5 deniz mili olarak belirlenmiştir (Şekil 2.2). Farklı uçuş seviyesinde bulunan uçaklar arasındaki dikey ayırma ise FL290 (Flight Level- FL) üstü için 2000 feet FL290 altı için ise 1000 feet olarak uygulanır bu durum Şekil 2.3' te gösterilmiştir [6].



Şekil 2.2. Uçaklar arasındaki saha kontrol ayırması [9]



Şekil 2.3. Uçaklar arasında korunması gereken dikey ayrımlar [9]

Hava trafik kontrol hizmeti meydan kontrol, yaklaşma kontrol ve saha kontrol hizmetlerinden oluşmaktadır. Meydan kontrol hizmeti bir havaalanı meydanı civarında uçan, manevra sahasında hareket eden ve iniş-kalkış yapan hava araçlarına verilen hava

trafik kontrol hizmetidir [5]. Meydan kontrol hizmeti meydan kontrol kuleleri tarafından verilmektedir. Bu kontrol kulelerinde çalışan kontrolörler; hizmet verdikleri uçakların emniyetli, hızlı ve düzenli trafik akışını sağlamaktan sorumludur [5].

Yaklaşma kontrol hizmeti TMA içinde olan uçaklara verilen bir hizmettir [6]. Yaklaşma kontrol ünitesi havaalanlarına gelen uçakların sıralamalarını ve gerekli ayırmalarını yaparak havaalanlarına yönlendirilmesinden sorumludur. Benzer şekilde yaklaşma kontrol ünitesi havaalanından kalkış yapan uçakları uçuş planındaki rotalara yönlendirir.

Saha kontrol hizmeti saha kontrolü içerisinde bulunan uçuşlara verilen hava trafik hizmetidir [6]. Saha kontrol hizmetleri FIR sınırları içinde bulunan uçaklara verilmektedir. Saha kontrol hizmeti kalkış veya iniş yapacak olan uçakların tırmanma veya alçalma hareketlerinin düzenlenmesinden ya da transit uçakların emniyetli bir şekilde saha kontrolü sınırları içerisindeki uçuşlarını gerçekleştirmelerinden sorumludurlar.

Saha kontrol hizmeti büyük alanları kapsayabilmektedir ve daha kolay yönetilmesi için kendi içinde küçük parçalara bölünebilmektedir. Bölünme sonucunda ortaya çıkan sınırları belirli hava sahalarına sektör adı verilir. Sektörlendirme genel olarak iş yükünün paylaşılması amacıyla yapılan bir işlem olup havacılık emniyetini, verimliliği ve ekonomikliği olumlu yönde arttırmayı amaçlamaktadır [5].

### **2.2.2. Uçuş bilgi hizmeti**

Herhangi bir uçuş bilgi bölgesi içerisinde uçuşların emniyetli ve verimli gerçekleşmesi için yararlı tavsiyeleri ve güncel bilgileri sağlayan hizmetidir. Bu hizmet FIR içinde verilmektedir. Ayrıca hava durumu raporu, seyrüsefer yardımcılarının durumları ve uçuş emniyetini etkileyebilecek her türlü bilgiyi bu hizmeti alan bütün uçaklara veya hava trafik hizmeti veren ünitelere sağlanmaktadır [10].

### **2.2.3. İkaz (uyarı) hizmeti**

Arama-kurtarma hizmetine ihtiyaç duyan uçaklar için ilgili kuruluşları haberdar etmek amacıyla uçuş bilgi bölgeleri içerisinde verilen bir hizmettir. Yaklaşma kontrol veya meydan kontrol ünitelerinin sorumluluğundaki bir uçak ile ilgili bir acil durum görüldüğünde bu üniteler sorumlu uçuş bilgi merkezini veya saha kontrol merkezini uyardıktan sorumludur [5]. Hava sahasında uçuş gerçekleştirecek her bir uçak uçuşu ile



ilgili tüm bilgileri uçuş planı formunu doldurarak uçuş bilgi merkezlerine sunmak zorundadır.

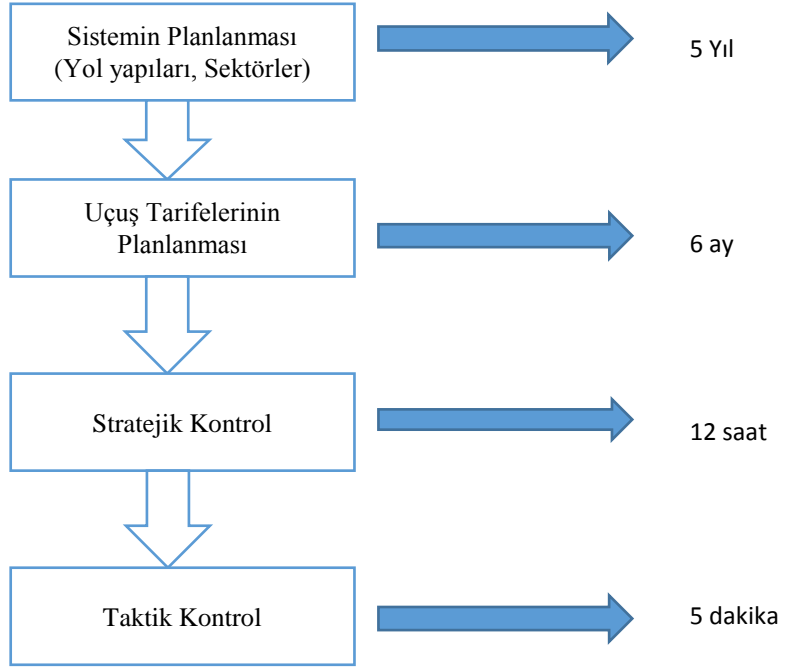
### **2.3. Hava Trafik Yönetimi**

Hava trafik yönetiminin amacı emniyetten ödün vermeden hava trafiğinde meydana gelecek olan maliyet ve gecikmelerin en küçüklenmesi sağlayan kolaylıkların bileşimi olarak ifade edilebilmektedir. Ayrıca hava trafik yönetiminin görevleri arasında emniyetli şekilde hava trafik akışının düzenlenmesi, sıralanması ve hava sahasının etkin kullanılması da yer almaktadır [5].

Hava trafik yönetimi için planlama ve kontrol fonksiyonları büyük bir öneme sahiptir. Planlama faaliyeti yönetimin en önemli basamaklarından birisini oluşturmaktadır. Bir konu üzerinde yapılacak olan görev dağılımları planlama sırasında yapılmakta ve ortaya çıkan sonuçların planlanan hedefler ile ne kadar örtüştüğünü kontrol fonksiyonu ile ölçülmektedir. Bu ölçümün sonucunda meydana gelen farkların azaltılmasına yönelik düzenlemelere oluşturulur [5].

#### **2.3.1. Hava trafik yönetiminde planlama fonksiyonu**

Hava trafik yönetimindeki (Air Traffic Management-ATM) planlama fonksiyonu zaman ufkundaki yerleri açısından kısa, orta ve uzun vadeli olarak değerlendirilmektedir. Hava trafik sisteminde kullanılan planlama ve kontrol modeli Şekil 2.4'de orta konmuştur.



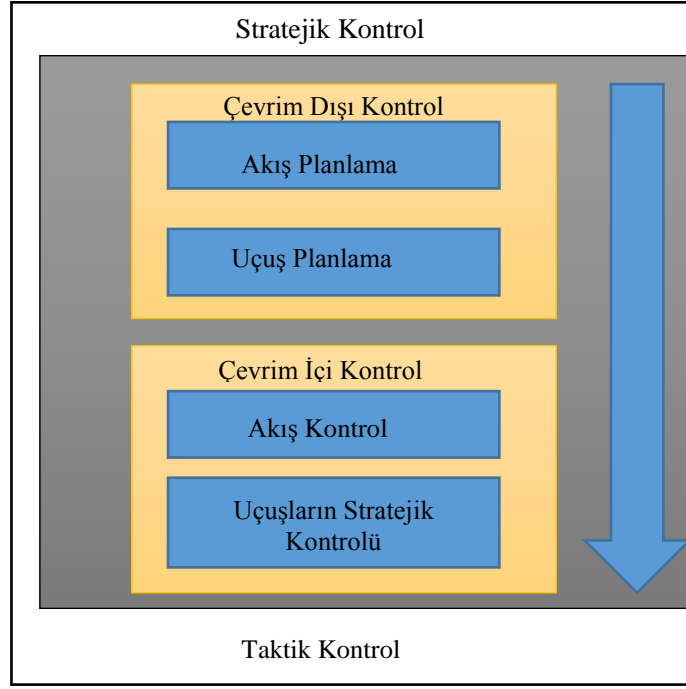
**Şekil 2.4** Planlama ve kontrol modeli [11]

Sistemin planlaması uzun vadeli planlama olarak karşımıza çıkmaktadır ve yapısal tasarım ile ilgili konuları içermektedir. Sektör yapıları, yol yapıları, prosedürler, yeni havaalanları ve birçok konu sistem planlamasına örnek olarak verilebilir.

Uçuş tarifelerinin planlanması aşamasında ilerde yaşanabilecek tıkanıklık dönemlerinin belirlenmesi sonucunda planlanan saatlerde değişikliklere gidilerek düzenlemeler yapılabilmektedir. Bu durum talep-kapasite dengesinin korunması açısından son derece önemlidir. Stratejik kontrol ise yollardaki hava trafik akışının çevrim dışı olarak uzun dönemli planlanmasıdır. Bunun tersine taktik kontrol uçuşun başlangıcından sonra gerçekleşen hava trafik kontrolörleri tarafından sunulan hizmettir [11].

### 2.3.2. Hava trafik yönetiminde kontrol fonksiyonu

Kontrol fonksiyonu için çevrim içi ve çevrim dışı olmak üzere iki farklı başlıkta değerlendirilmektedir (Şekil 2.5).



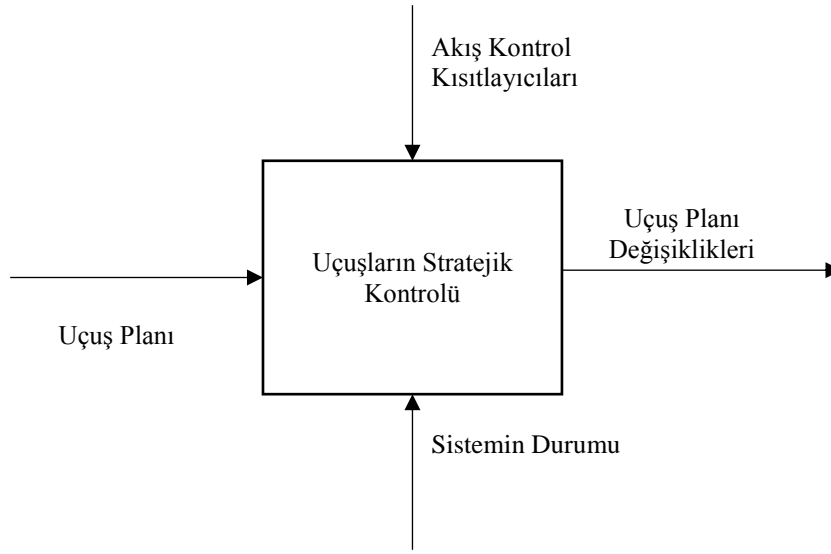
**Şekil 2.5.** Kontrol fonksiyonu [11]

Çevrim dışı kontrol yalnızca trafik tahminine dayalı yapılan süreçtir ve uçakların sisteme girişinden önce bitirilmez. Buna karşın çevrim içi kontrol sistemi ise hali hazırda bulunan trafiğe göre kontrol işlemini planlamaktır [5].

Çevrim dışı kontrol akış planlama ve uçuş planlama aşamalarından oluşmaktadır. Akış planlama birkaç saatlik bir periyod için yapılan bir işlemdir. Bu süreç içinde ve tahmin edilen trafik talebi sistem kapasitesi ile karşılaştırılır. Uçuş planlama ise akış planlama ile aynı zaman boyutunda bir faaliyet olup talep ve kapasite karşılaştırması sonucunda yeni uçuş zamanlarını belirler [5].

Çevrim içi kontrol de akış kontrol ve uçuşların stratejik kontrolü olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Akış kontrolü 15-30 dakikalık bir zaman dilimi aralığına sahip çevrim içi faaliyettir. Trafik talebindeki kısa dönemli artışların sistemde neden olabilecek etkilerini rötar yolu ile azaltmaya çalışır. Kontrollü hava sahalarında tıkanıklık bulunması durumunda akış kontrol işleminin uygulanması önem arz etmektedir. Akış kontrol kavramı tıkanıklık tahmini ve tıkanıklık önleme olarak iki farklı aşamaya ayrılabilir. Tıkanıklık tahmini bu tıkanıklığın nerede ve ne zaman olacağını belirlemesi, tıkanıklık önleme ise aşırı yüklenmenin olduğu yerlerde bu tıkanıklığın büyüklüğünün azaltılması için ilgili taktik faaliyetin yapılmasıdır [5].

Uçuşların stratejik kontrolü sistemin hali hazırdaki durumunu gözlemleyerek çakışan rotaların belirlenmesi ve çakışmaların önlenmesi için yapılan uçuş planlarının değiştirilmesi işlemlerini kapsamaktadır. Bu süreçte uçuş planları akış kontrol süreci tarafından getirilen kısıtlayıcılar ile sistemin durumuna bağlı bilgiler çerçevesinde değişikliğe uğramaktadır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Uçuşların stratejik kontrolünün gösterimi [11]

Uçuşların stratejik kontrolü aşamasında yenilenen uçuş planları aynı zamanda taktik kontrol içinde faydalı olmaktadır [11]. Uçuşların stratejik kontrolünde radar verilerine, kısa ve orta vade hava durumu tahminlerine ve ATC altyapısına bakılarak uçuşlarda uygulanacak kısıtlamalara karar verebilmektedir. Aynı nokta üzerinden geçe olan uçaklar arasında emniyetli ayırmanın sağlanması için uçuş planlarında şu değişiklikler yapılabilir [11]:

- Aynı rotada kalmak kaydıyla seviye değişikliği,
- Hız kontrol,
- Yeniden rotalama,
- Bekleme paternine giriş,
- Kalkış zamanının geciktirilmesi.

#### 2.4. Serbest Rotalama

Hava trafiğinde meydana gelen artış hava sahalarında gecikmelere neden olmakta ve hava sahası kapasitelerinde düşüşe neden olmaktadır. Ayrıca gecikmeler uçakların uçuş sürelerinin ve yakıt sarfiyatlarının artmasına yol açmaktadır. Uçaklar arasındaki

emniyetli ayırma mesafesini koruyarak hava sahasında meydana gelen gecikmelerin azaltılması hava sahası yönetimi açısından çok önemli bir hedef olarak ortaya çıkmaktadır. Uçakların uçuş sürelerinin ve yakıt sarfiyatlarının azaltılması için hava sahalarının giriş noktasından çıkış noktasına direkt olarak uçabilmesi serbest rotalama kavramı olarak ortaya çıkmaktadır. Bu kavram çerçevesinde serbest rotalı hava sahası “kullanıcıların tanımlanmış giriş ve çıkış noktaları arasında, ihtimal dahilinde yayımlanmış veya yayımlanmamış ara yol noktalarından geçmek suretiyle, hava trafik sistemindeki yol ağına bağlı kalmaksızın rotalarını hava sahasının uygunluk durumuna göre serbest şekilde planlayabildikleri özel hava sahaları” olarak tanımlanabilir [12].

Avrupa’da Eurocontrol 2008 yılında serbest rotalı hava sahası için planlamaların ve koordinasyonun başlaması için gerekli düzenlemelerin yapılmasına karar vermiştir. Bu karar ile birlikte uçuş operasyonlarının daha verimli ve daha çevre dostu olacağı öngörülmüştür. Eurocontrol’ ün yaptığı hesaplamalara göre serbest rotalı hava sahalarında günlük yapılan operasyonlardan 25.000 deniz mili daha az mesafe uçulacağı, uçuş mesafelerinin toplam da 7,5 milyon deniz mili azalacağı hesaplanmıştır. Bu durumun yıllık 45.000 ton yakıt tasarrufu yapacağı ve 150.000 ton gaz salınımını azaltacağı belirtilmiştir [12].

### **3. KAYNAK TARAMASI**

Hava sahalarındaki gecikmelerin azaltılarak hava sahası kapasitesinin ve trafik akışının iyileştirilmesini yönelik olarak geliştirilen çok sayıda çalışma literatürde mevcuttur. Bu çalışmalar hava trafik akış yönetimi (Air Traffic Flow Management-ATFM) ve uçak çakışma saptama ve çözümü (Conflict Detection and Resolution-CDR) yaklaşımları olmak üzere iki ana başlık altında sınıflandırılmıştır. Bu bölümde her iki yaklaşım üzerine yapılmış olan çalışmalar tartışılacaktır.

#### **3.1. Hava Trafik Akış Yönetimi**

ATFM problemlerinin çözümü için birçok araştırmacı 1980'li yılların sonundan itibaren farklı yaklaşımlar gerçekleştirmiştir. Bu yaklaşımlar uçaklar için yerde bekletme ve genel taktik akış yönetimi olmak üzere iki ana başlık altında sınıflandırılabilir.

##### **3.1.1. Yerde bekletme yaklaşımı**

Yerde bekletme yaklaşımı üzerine yapılan çalışmalar tek havaalanı içeren ve çok havaalanı içeren modeller olmak üzere iki kısma ayrılabilir. Ayrıca bu modeller havaalanı kapasitesindeki belirsizliklerin durumuna göre kendi içlerinde deterministik ve stokastik olarak sınıflandırılmaktadır. Deterministik modellerde havaalanı kapasitesinin kesin olarak bilindiği kabul edilmiş buna karşın stokastik modellerde ise kapasitenin kesin olarak bilinemediği kabul edilmiştir. Her iki model aynı zamanda statik ve dinamik olmak üzere iki alt kategoriye ayrılmaktadır. Statik modellerde hangi uçağın kalkış öncesi yerde bekleme alacağı ve ne kadar süre yerde bekleyeceği planlamanın başında belirlenmekte ve değişmemektedir. Dinamik modellerde ise yerde bekleme kararları gün içerisinde değişen koşullara göre güncellenebilmektedir [13]. Yapılan çalışmalar genellikle uçakların yerdeki bekleme sürelerinin ve gecikmeden kaynaklı maliyetlerinin en küçüklenmesini amaçlamaktadır.

Tek havaalanı içeren yerde bekletme yaklaşımı üzerine yapılan ilk çalışmalardan biri Anderatta ve Romain-Jacur [14] tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma aynı varış meydanına iniş yapacak olan uçakların toplam gecikme maliyetlerini en küçüklemek için kalkış öncesi yerde bekleme sürelerini belirlemeye yöneliktir. Modelde havaalanı kapasiteleri olasılık dağılımı ile belirlenmiş ve tıkanıklığın sadece merkez havaalanında bulunduğu kabul edilmiştir. Terrab ve Odoni [15] ise yine aynı varış meydanına incek uçaklar için en uygun kalkış zamanlarını belirleyen biri deterministik ve diğeri stokastik

olmak üzere iki farklı model ortaya koymuştur. Bu modeller de maliyetlerin en küçüklenmesi amaçlanmaktadır. Deterministik model için minimum maliyet akış algoritması ve stokastik model için ise problem boyutunun büyüklüğü nedeniyle sezgisel bir algoritma geliştirilmiştir. Richetta ve Odoni [16] tek havaalanı içeren yerde bekletme problemi için statik stokastik tam sayılı bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Model tıkanıklıkları azaltılmak için hangi uçağın ne kadar süre yerde bekleyeceğine karar vermektedir. Daha önce sunulan modellerde problemin karmaşıklığından dolayı sezgisel yöntemlere ihtiyaç duyulmasına karşın önerilen bu model doğrusal programlama yardımıyla normal bir bilgisayar kullanılarak çözüme ulaştırılmıştır. Modelde hava durumundan kaynaklanan belirsizlikler dikkate alınmıştır. Richetta ve Odoni [17] ise daha sonra aynı problem için dinamik stokastik tam sayılı bir model önermiştir. Bu model tıkanıklık problemlerinin çözümünde uçakların tek başlarına incelenmesinden ziyade gruplanarak çözüm aranmasını önermektedir. Modelde uçakların yerde bekleme maliyetleri her bir uçak için farklı olarak alınmasına karşın havada bekleme maliyetleri hepsi için aynı alınmıştır.

Dell'Olmo ve Lulli [18] doğrusal bir model oluşturarak dinamik programlama yöntemi ile havaalanı kapasite problemlerini çözmek istemiştir. Bu model diğer modellerden farklı olarak sadece kalkış veya iniş uçaklarını değil her ikisini de birlikte değerlendirmiştir. Modelin test edilmesi için açgözlü bir algoritma geliştirilmiş ve önerilen model ile kıyaslanmıştır. Sonuçlar arasındaki farkların %4 ile %35 arasında değiştiği görülmüştür.

Mukherjee ve Hansen [19] tek havaalanı bekletme problemi için dinamik stokastik tam sayılı bir model geliştirmişlerdir. Bu model yerde bekleme sürelerini hava durumu tahminine göre yapmakta ve zaman içerisinde değiştirmektedir. Uzun mesafe uçuşları da sisteme dâhil edilip gecikme sürelerinin belirlenmesinin adil olmasına dikkat edilmiştir. Bu model ayrıca hava yolu şirketlerinin kendi aralarında uçuş değişimi yapmasına imkân sağlayarak ortak karar mekanizmalarının çalıştırılmasına imkân sağlamıştır.

Çok havaalanı içeren yerde bekletme yaklaşımı üzerine ilk yapılan çalışmalardan biri Vranas ve arkadaşları [13] tarafından geliştirilen deterministik modeldir. Bu çalışmada havaalanı ulaşım ağı içerisinde bulunan uçakların toplam gecikme sürelerinin en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Bu problemin çözümü için tam sayılı programlama ve sezgisel bir yöntem önerilmiştir.

Vranes ve arkadaşları [20] jenerik tam sayılı çoklu hava alanı içeren bir modeli dinamik programlama ile çözerek toplam gecikme maliyetlerini en aza indirmek istemektedir. Kurulan bu model sayesinde hava durumu tahmininden kaynaklı değişikliklerin daha doğru bir şekilde yapılmasına imkân sağlanmıştır.

Vossman [21] gecikmelerin adil bir şekilde paylaşılması ve tek bir havayolu şirketinin haksız bir şekilde etkilenmemesi için çok amaçlı bir optimizasyon modeli oluşturmuştur. Geliştirilen model aynı zamanda havayolu şirketlerinin aralarında yapılabilecek olan uçuş değişikliklerinin nasıl bir fayda sağlayabileceği de araştırmıştır.

Zhang ve arkadaşları [22] havaalanı kapasitelerini daha iyi kullanmak amacıyla genetik algoritmalar ile birlikte çalışan yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Gecikmeleri en küçükmek için kalkış ve iniş trafiği birlikte değerlendirilmiş ve uçaklara en iyi zaman diliminin tahsis edilmesi sağlanmıştır.

Ball ve arkadaşları [23] çoklu havaalanı yerde bekletme sürelerinin karar verilmesinde uçuş mesafelerini de dikkate alan yeni bir yaklaşım getirmiştir. İlk olarak kısıtsız olarak sunulan bu model toplam gecikme sürelerinde iyileşmeler meydana getirirken buna karşın gecikmelerin adil bir şekilde paylaşılması konusunda kötü sonuçlar vermiştir. Model bunu önlemek amacıyla yeni kısıtlar koyarak ve daha adil ve verimli sonuçları elde etmiştir.

Wang ve ark. [24] çoklu havaalanı yerde bekletme probleminde sektör kapasitelerinin de kısıt olarak eklendiği bir model önerisi getirmiştir. Bu modelin çözümünün uzun sürmesinden dolayı sezgisel bir algoritmanın geliştirilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Model tatmin edici sonuçlar vermiştir.

Manley ve Sherry [25] çoklu havaalanı yerde bekletme probleminin çözümü için yolcu gecikmesi ile yakıt sarfıyatı arasında adaletli bir dengenin kurulduğu, havayolu eşitliğinin ve yolcu eşitliğinin de sağlandığı bir model önermiştir. Bu model yolcu sayılarını, uçak kategorilerini, uçuş mesafelerini ve her bir uçak için yakıt sarfıyatı oranlarını dikkate alarak karar vermektedir.

Andretta ve ark. [26] Amerika ve Avrupa' da yaşanan hava trafik akış problemlerinin çözümü için stokastik bir model önerisi getirmişlerdir. Bu model havaalanları arasında etkileşimleri, kapasitenin kesin olmadığı durumları ve merkez havaalanlarındaki uçuş dengesini göz önüne alarak çözüm üretmektedir. Modelin gerçek boyutlu problemlere uygulanabilir olduğu ve işbirlikçi karar verme süreçlerini içerdiği görülmektedir. Gecikmeler tek bir uçak yerine belirli uçak grupları arasında



paylaştırılmaktadır. Modelin amacı kalkış ve geliş uçakları arasındaki en uygun sayıyı bularak ve havaalanlarında meydana gelen gecikmeleri en küçüklemektir.

Glover ve Ball [27] bir tek havaalanı için yerde bekleme programını tam sayılı programlama yardımıyla çok amaçlı olarak uygulamıştır. Modelde kullanılan amaçlardan ilk olanı uçaklar arasında gecikme sürelerinin eşit dağılımını diğeri ise verimliliğini ölçmektedir. Model hava durumunu dikkate alarak karar vermektedir.

Kuhm [28] yerde bekletme problemi için gecikme süresinin en küçüklenmesini ve gecikme süreleri arasında eşitliğin sağlanmasını sağlayan iki amaçlı bir model ortaya koymuştur. Modelin çözüm yöntemi için ağırlıklı toplam yönetimini kullanmıştır. Model gerçekçi senaryolarda başarılı sonuçlar vermiştir.

Özgür ve Cavcar [29] hava trafik akış yönetimi için 0-1 tam sayılı bir model kurmuştur. Bu model uçakların kalkış zamanlarını düzenleyerek çakışmalarından kaçınması ve havaalanı kapasite-talep dengesinin korunması sağlanmıştır. Model de prosedürel hava trafik kontrol ayırma minimaları kullanılmıştır. Önerilen model izlemenin bulunmadığı sektör yapılarındaki akışların düzenlenmesini kolaylaştırmaktadır.

Yerde bekletme yaklaşımını olumsuz etkileyen faktörlerin başında hava durumu tahminlerinin iyi yapılamaması sonucunda gereksiz yer gecikmelerinin oluşması ve bu durumdan dolayı gecikme maliyetlerinin yükselmesi gelmektedir.

### **3.1.2. Genel taktik akış yönetimi yaklaşımları**

Genel taktik akış yönetimi gecikme sürelerini en küçüklemek için yerde bekletmenin yanı sıra havada bekletme, yeniden rotalama ve hız değişikliği yaklaşımlarının birini veya birkaçını kullanan bir yöntemdir. Literatürde önerilen modeller genellikle büyük hava sahaları için uygulanmış olup havaalanı ve hava sahası kapasiteleri birlikte dikkate alarak karar vermektedir.

Genel taktik akış yönetimi yaklaşımı için ilk olarak yapılan çalışmalarda biri Helme [30] tarafından önerilen çok elemanlı en düşük maliyetli ağ akış modelidir. Bu çalışmada toplam gecikme maliyetlerinin yerde ve havada bekletme kullanılarak en küçüklenmesi hedeflenmiştir. Modelde havaalanı ve hava sahası kapasitelerinin kesin bilinmediğini, kapasitenin zaman ile değiştiğini ve hava sahasında bulunan yollarda kısıtlamaların olabileceğini dikkate alarak çözüm üretilmektedir.

Bertimas ve Patterson [31] ise 0-1 tam sayılı programlama ile birden fazla havaalanı içeren deterministik bir model önermiştir. Model de hava trafik akış yönetiminin çok karmaşık bir problem türü olduğu ortaya konulmuştur. Modelin etkili ve verimli olması için Amerika Birleşik Devletleri hava sahasında bulunan kapasite değerleri dikkate alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Geliştirilen model havada olan uçaklara yeniden rotalama kalkış yapacak uçaklara ise yerde bekletme uygulayarak gecikme sürelerini en küçüklemektedir.

Bertimas ve Patterson [32] daha sonraki çalışmalarında aynı problem için dinamik, çok elemanlı ve tam sayılı bir akış modeli oluşturmuştur. Uçakların değişken hava koşullarında etkilenmesi de çalışmaya dâhil edilmiştir. Çalışmanın amacı gecikme maliyeti, yakıt maliyeti ve emniyet maliyetlerinin toplamının en küçüklemesidir. Model uçakların kalkış zamanları ile havadaki hızlarını değiştirmeye ve yeniden rotalamaya izin vermektedir.

Alonso ve ark. [33] hava durumu kaynaklı belirsizliklerin havaalanı ve hava sahası kapasitesi üzerindeki etkilerini içeren stokastik bir model önermişlerdir. 0-1 tam sayılı programlama kullanılarak oluşturulan modelin çözümü için sezgisel bir algoritma geliştirilmiştir.

Lulli ve Odoni [34] ise havaalanı ve sektör kapasitelerini dikkate alarak hem havadaki hem de yerdeki gecikme yaklaşımlarını kullanan deterministik bir matematiksel model ortaya konmuştur. Bu çalışmada havada bekletme uygulamasının belirli durumlarda yerde bekletme yaklaşımına göre toplam gecikme maliyetlerin azaltılmasında daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Gecikmelerin eşit ve aynı zamanda verimli bir şekilde uçaklar arasında paylaştırılmasının birbirleri ile çelişen unsurlar olduğu bu çalışmada gösterilmiştir.

Richard ve ark.[35] karma tam sayılı bir model oluşturup kes ve fiyatlandır (cut and price) yöntemiyle dinamik olarak hava trafik akış yönetimi problemlerine çözüm aramıştır. Fiyatlandırma alt problemi dinamik programlama ile çözülmüştür. Model yeniden rotalama ve uçuş seviyesi değişiklikleri kullanarak sektör yoğunluğuna göre en iyi dört boyutlu yörünge ataması yapmaktadır.

Bertimas ve ark. [36] büyük ölçekli hava trafik akış yönetimi problemleri için tam sayılı bir model ortaya koymuşlardır. Bu model uçakların kalkış, tırmanma, saha, alçalma ve iniş fazlarının hepsini içermektedir. Çözüm önerisi olarak yerde bekletme, havada bekletme, hız kontrolü ile yeniden rotalama yaklaşımlarının uygun bir birleşimi

kullanılmaktadır. Uçuşların emniyetli, verimli ve hızlı bir şekilde gerçekleşmesini amaçlayan bu model ile uçakların kalkış zamanları, rota seçimleri, sektör kat ediş süreleri ve tahmini varış zamanları hesaplanmaktadır.

Alonso-Ayuso ve ark. [37, 38] yeniden rotalama problemini hem deterministik hem de stokastik 0-1 tam sayılı olarak modellemiştir. Stokastik modelde havaalanı ve hava sahası kapasitelerinin zaman içerisinde değiştiği kabul edilmiştir. Modeller gerektiği zaman uçuş iptaline de olanak sağlamaktadır. Önerilen her iki modelde uçakların yerde bekleme süreleri, hava gecikmeleri, zamanında uçuşunu gerçekleştiremeyen uçak sayısı, alternatif rota kullanan uçak sayısı ve uçakların her bir sabit noktaya geliş maliyetleri hesaplanabilmektedir. Model birden fazla amacı tek bir amaç fonksiyonuna altında birleştirmiş ve bunu da en küçükmeye çalışmıştır. Amaç fonksiyonu iptal olan uçuş maliyetlerini, alternatif rota kullanma maliyetini, sabit noktalara geliş maliyetini, yerde ve havada bekletme maliyetlerini içermektedir.

Balakrishan ve Chandran [39] büyük ölçekli hava trafik akış problemlerinin çözümünde deterministik tam sayılı bir model önermişlerdir. Her bir uçak için gecikme maliyetleri ve operasyonel maliyetler sütun türetme yöntemi yardımıyla en küçükmeye çalışılmıştır. Model havaalanı ve hava sahası kısıtlarında dikkate alarak yerde bekletme, havada bekletme, hız kısıma ve uçuş iptaline olanak sağlamaktadır. Model uçakların kalkış zamanı, izleyeceği rotayı, hızını ve iptal bilgilerini vermektedir.

### **3.2. Çakışma Saptama ve Çözümleme Yaklaşımları**

Hava trafik kontrolünün temel amaçlarından birisi uçaklar arasında meydana gelebilecek olan emniyetli ayırma mesafesi ihlallerinin çözümü için çakışma saptama ve çözümleme yapmaktır. Yapılan çözüm önerileri uçaklara hız değişikliği, baş açısı değişikliği, irtifa değişikliği veya bu yöntemlerin birleşimi olarak sunulabilmektedir. Çakışma algılama ve çözümleme konularında önerilen modellerde hız değişiminin en küçükmeye, baş açısı değişikliğinin en küçükmeye, irtifa değişiminin en küçükmeye yaygın olarak görülen amaç fonksiyonlarıdır. Bu problemlerin çözümü için çok sayıda kesin çözüm veren programlama yöntemleri ile meta-sezgisel algoritmalar ortaya konmuştur. Bu yaklaşımlar hakkında ayrıntılı kaynak taramaları Kuchar ve Yang [40] ile Martin-Campo [41] tarafından yapılmıştır. Bu bölümde ise karma tam sayılı doğrusal ve karma tam sayılı doğrusal olmayan çalışmalar ile meta-sezgisel yöntemler üzerinde durulacaktır.

### 3.2.1. Kesin çözüm yaklaşımları

Pallottino ve ark. [42] uçak çakışmalarının saptanması ve çözülmesi için tam sayılı doğrusal bir model geliştirmişlerdir. Modelde toplam uçuş sürelerinin en küçüklemesini amaçlamaktadır. Çalışmada çakışmaların çözülmesi için hız değişikliği ve baş açısı değişikliği kullanılmıştır fakat model sadece bir çözüm yönteminin kullanılmasına izin vermektedir. Christodoulou ve Costoulakis [43] Pallottino ve ark. yapmış olduğu çalışmayı daha ilerleterek çakışma saptama ve çözümleme problemimin çözümü için karma tam sayılı doğrusal olmayan bir model geliştirmişlerdir. Bu model yatay düzlemde hız ile baş açısı değişikliklerinin birlikte kullanılmasına olanak sağlamıştır.

Vela ve ark. [44, 45] her iki çalışmada da aynı problem için tam sayılı doğrusal bir model önerisi getirmiştir. İlk model hız ve uçuş seviyesi değişiklikleri yardımıyla çözüm üretmektedir. İlk model toplam yakıt sarfiyatını en küçüklemeyi amaçlamaktadır ve ürettiği çıktılar her bir uçak için geliş zamanı belirleme ve hız değişikliği yapmasıdır. İkinci çalışmada ise aynı amaç fonksiyonun baş açısı ve hız değişikliği kullanılarak elde edilmesi istenmiştir. Doğrusal olmayan yakıt modeli doğrusallaştırılarak modelin hızlı bir çözüm üretmesine olanak sağlanmıştır.

Cetek [46] çakışma problemin çözümü için hız değişikliği, baş açısı değişikliği ve her ikisinin birlikte uygulandığı üç farklı yöntemi modellemiş ve uçak ekonomisi bakımından yöntemleri karşılaştırmıştır. Her bir çözüm yöntemi için amaç çakışmanın en kısa sürede çözülmesini sağlamaktır. Problemden gerçekçi operasyonel kısıtlar, ayrıca gerçekçi aerodinamik ve motor kısıtları kullanılmıştır.

Alonso Ayuso ve ark. [47] bu problemin çözümü için iki tane karma tam sayılı doğrusal model geliştirmişlerdir. İlk model irtifa değişikliği sağlayarak çakışmaları çözerken diğer model ise hız değişikliği ve irtifa değişimi yöntemlerini birlikte kullanarak çözüm önerisi üretmiştir. Problemin çözümünü kısa sürede sağlandığı için model gerçek zamanlı problemlerde de kullanılabilir. Daha sonra ise Alonso-Ayuso ve ark. [48] çakışmaları çözümlenmek için hız, baş açısı ve irtifa değişimi manevralarını kullanan bir model önermişlerdir. Amaç fonksiyonu manevralar sonucunda meydana gelen toplam değişikliklerin en küçüklemesidir. Önerilen model uçakların konumlarını, hızlarını, uçuş seviyelerini ve baş açısı bilgilerini kullanarak çözüm önerileri hem yatay düzlemde hem de dikey düzlem vermektedir.

Caferi ve Rey [49] karma tam sayılı doğrusal olmayan programlama yardımıyla uçaklar arasında meydana gelebilecek çakışmalara çözüm önerisi sunmuştur. Modelde hız değişimi kullanılarak çakışmaları çözümlenmektedir. Modelin amaç fonksiyonu çözümlenecek en fazla çakışma sayısını bulmaktır.

Omer [50] uçak yörüngelerinin kesişim noktaları üzerinden çakışma saptaması yapan yakıt sarfiyatının ve gecikmelerin birlikte en küçüklenmesini isteyen karma tam sayılı doğrusal bir model önermiştir. Çakışmalar hız ve baş açısı değişiklikleri ile çözümlenmektedir.

Caferi ve Omheni [51] aynı problemin çözümü için iki aşamalı karma tam sayılı doğrusal olmayan bir model geliştirmişlerdir. İlk aşamada baş açısı değişikliği ile çözülebilecek bütün çakışmaların çözülmesi daha sonra ise çözülemeyen çakışmaların ikinci aşamada hız değişikliği yöntemi ile çözülmesi istenmiştir. Model çözülen çakışma sayısını en büyükmeyi amaçlamaktadır.

### **3.2.2. Meta-sezgisel algoritmalar**

Durand ve ark. [52] genetik algoritmaları saha kontrol operasyonlarında meydana gelen çakışmaların çözümü için kullanmışlardır. Model yatay düzlemde oluşan çakışmalara çözüm önerileri vermektedir. Ayrıca uçak yörüngeleri hesaplanırken hız belirsizliğinden kaynaklanan pozisyon hatalarını modele dâhil edilmiştir. Daha sonra aynı problemin çözümü için yapay sinir ağları kullanılmıştır [53]. Model sadece baş açısı değişikliklerine izin vererek yüksek güvenilirlikte çakışma çözümleri çok kısa bir sürede üretebilmektedir.

Birden fazla uçağın çakışmaların çözümü için Durand ve Alliot [54] karınca kolonisi algoritmasını kullanan bir model önermişlerdir. Çalışmada karınca grupları kullanılmıştır. Birden fazla uçağın karşı karşıya kaldığı çakışmalarda klasik eniyileme yöntemlerinin sonuç veremediğini gösterilip karınca kolonisi yönteminin problemin çözümü için iyi bir algoritma olduğu gösterilmiştir. Gao ve ark. [55] ise çok uçaklı çakışma problemlerinin çözümü için parçacık sürü algoritması geliştirmiştir ve amaç fonksiyonu toplam en kısa yolu bulmak olmuştur.

Meng ve Qi [56] üç farklı meta sezgisel yöntemi çakışma saptama çözümlene problemi için karşılaştırmıştır. Yöntemler karınca kolonisi, parçacık sürü algoritması ve genetik algoritmalarıdır. Modelin amaç fonksiyonları toplam yörünge uzunluğu ve yolcu

rahatlık faktörüdür. Her üç model kıyaslandığında karınca kolonisi diğer yöntemlerden daha iyi sonuç vermiştir.

Alonso-Ayuso ve ark. [57] çakışma çözümü için geliştirdikleri karma tam sayılı doğrusal olmayan modeli değişken komşuluk arama (Variable Neighborhood Search – VNS) yöntemi ile çözmüşlerdir. Bu çalışmada uçakların baş açısı değişikliği yapmasına izin verilmiştir. Geliştirilen bu model kısa sürede iyi sonuçlar elde etmektedir.

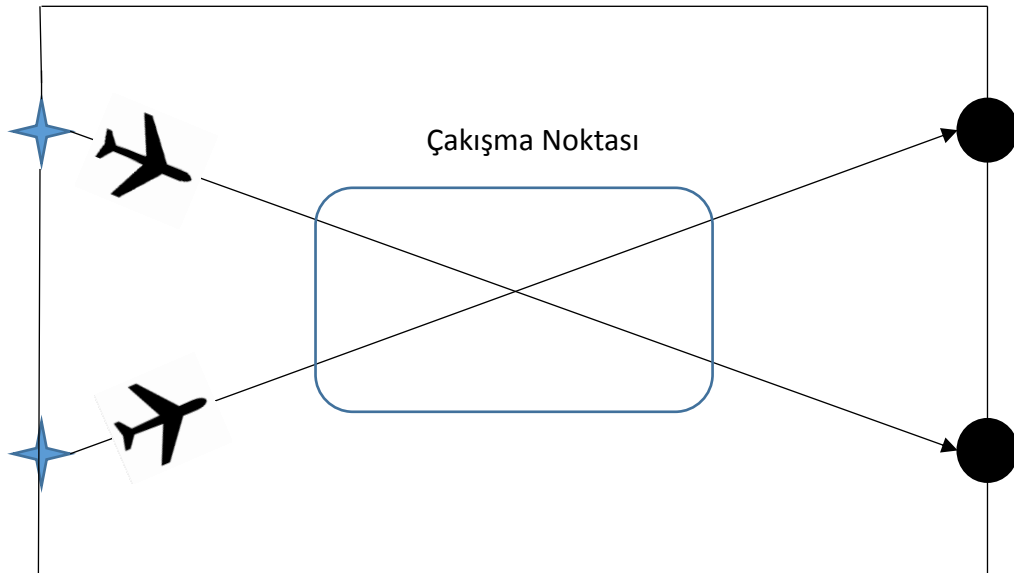
Peyronne ve ark. [58] yeni bir yörünge tahmini modeli geliştirmiştir ve bu yöntemi genetik algoritma ile birlikte kullanarak uçakların çakışma olmayan uçuş yörüngelerine atanmasını sağlamışlardır.

Mevcut literatür incelendiğinde hem hava trafik akış yönetimi konusunda hem de çakışma saptama ve çözümlenme konularında birçok çalışma yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmada çakışmaların saptanması ve çözümlenmesi işlemi sektörlerdeki giriş noktaları, rotaların kesişim noktaları ve sektörlerin çıkış noktaları üzerinden gerçekleştirilmektedir. Literatürde bu yaklaşıma benzer şekilde yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Omer [50] sektör içindeki çakışmaları yine karma tam sayılı doğrusal bir model ile yörünge kesişim noktalarını kullanarak hız değişikliği ve baş açısı değişikliği önererek çözmektedir. Çalışmanın amaç fonksiyonu hem yakıt tüketiminin hem de gecikmelerin aynı anda en küçüklenmesidir. Bizim çalışmamızda farklı olarak iki aşamadan oluşmakta ve farklı çözüm yöntemleri kullanılmıştır. İlk aşamada çakışmadan kaynaklı gecikmelerin en küçüklenmesi için sektör giriş noktası sayıları artırılmış ve uçuşların stratejik kontrolü aşamasında giriş noktası ataması için meta sezgisel algoritmalar kullanılmıştır ve ikinci aşamada önerilen vektör modeli doğrusal olmayan programlama kullanılarak çözdürülmüştür. Omer [50] çalışmasında sadece bir uçak performans kategorisi kullanmış olmasına karşın bu çalışmada üç farklı performans kategorisine ait uçaklar yer almıştır.

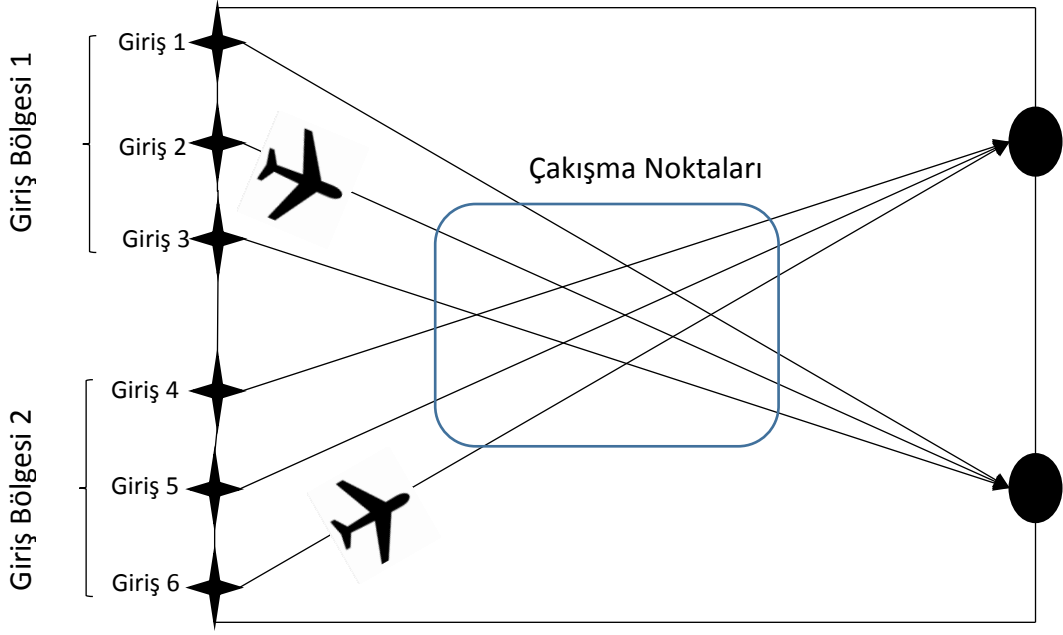
#### 4. PROBLEMİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

Uçaklar arasında meydana gelebilecek olan ayırma mesafesi ihlallerinin hava trafik kontrolörlere önceden saptanması ve çözümlenmesi hava trafiğinin emniyetli bir şekilde düzenlenmesi açısından çok önemlidir. Uçaklara verilen çözüm önerileri baş açısı değişikliği, hız değişikliği ve irtifa değişikliği veya bu yöntemlerin birlikte kullanılması olarak verilebilmektedir. Bu çalışmada hava sahasında meydana gelen çakışmalardan kaynaklı gecikmelerin ve bu gecikmelerden kaynaklanan ekstra yakıt sarfiyatlarının en küçüklenmesi için iki aşamalı bir matematiksel model ortaya konmuştur. Yaklaşımın ilk aşamasında sadece giriş noktası ataması ile gecikmeye neden olmayan veya en az gecikmenin sağlanacağı çakışma geometrilerinin oluşturulması amaçlanmıştır. Modelin ikinci aşamasında ise uçakların gecikme sürelerine uygun ve aynı zamanda yakıt sarfiyatlarının da en küçükleneceği bir vektör manevrası önerilmektedir. Çalışmada uçak hareketlerinin deterministik olduğu kabul edilmiştir.

Çalışmada mevcut serbest rotalı hava sahası referans durum (RD) olarak ifade edilmiştir (Şekil 4.1). Referans durumda uçaklar giriş noktasından çıkış noktasına direkt olarak uçmaktadırlar. Alternatif giriş noktalarının da kullanıldığı sektör yapısına ise çoklu giriş noktası yaklaşımı (ÇGNY) adı verilmiştir. Referans durum ve çoklu giriş noktası yaklaşımı sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de basit bir sektör yapısı üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Referans durum çakışma noktası



Şekil 4.2. Çoklu giriş noktası yaklaşımı çakışma noktaları

Şekil 4.1’de iki tane giriş noktası, iki tane çıkış noktası ve bir çakışma noktası bulunmasına karşın Şekil 4.2’ de iki giriş bölgesi, iki çıkış noktası, 6 giriş noktası ve 9 tane çakışma noktası bulunmaktadır. Önerilen ÇGNY yardımıyla uçakların en az gecikmeye uğrayacağı çakışma noktası üzerinden geçmeleri sağlanacaktır. Çalışmada her bir giriş bölgesine ait 3 giriş noktası tanımlanmıştır. Uçaklar hava sahasında belirli giriş ve çıkış noktalarını kullanarak bu iki nokta arasındaki en kısa mesafeyi kullanarak uçuşlarını gerçekleştirmektedir.

#### 4.1. Çakışma Durumları

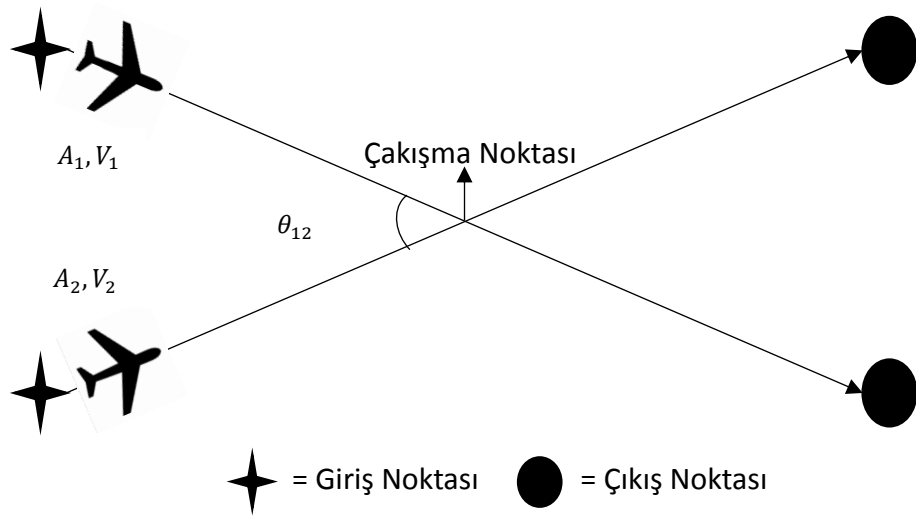
Oluşturulan modelde uçakların batı yönünden doğuya doğru uçtuğu kabul edilmiştir. Yatay düzlemde uçakların arasında ortaya çıkabilecek dört farklı çakışma durumu ele alınmıştır. Bunlar sırasıyla:

1. Giriş ve çıkış noktaları farklı olan (kesişen) rotalarda uçan uçaklar arasındaki çakışmalar;
2. Giriş noktaları aynı ancak çıkış noktaları farklı olan (ayrılan) rotalarda uçan uçaklar arasındaki çakışmalar;
3. Giriş noktaları farklı ancak çıkış noktaları aynı olan (birleşen) rotalarda uçan uçaklar arasındaki çakışmalar;
4. Giriş ve çıkış noktaları aynı olan (aynı rotayı kullanan) uçaklar arasındaki çakışmalardır.



#### 4.1.1. Kesişen rotalı çakışmalar

Kesişen rotalarda bulunan uçakların aynı nokta üzerinden geçme zamanları arasındaki ayırma süresi kesişim noktası referans alınarak belirlenmektedir. Bu durum bir örnek üzerinden açıklanmak istenirse Şekil 4.3’de rotaları kesişen  $A_1$  ve  $A_2$  uçaklarının hızlarının sırasıyla  $V_1$  ile  $V_2$  olduğunu ve rotaların kesişim açısının da  $\theta_{12}$  olduğunu kabul edelim. Aynı nokta üzerinden geçecek olan  $A_1$  ve  $A_2$  uçaklarının o nokta üzerinde bulunma zamanlarının farkının en az  $T_{12}$  kadar olması gerekmektedir. Bu değer (4.1) denklemi ile hesaplanır [42].



Şekil 4.3. Kesişen rotalar çakışma geometrisi

$$T_{12} = \frac{D_{\min}}{V_1 V_2 |\sin(\theta_{12})|} \sqrt{(V_1)^2 + (V_2)^2 - 2V_1 V_2 \cos(\theta_{12})} \quad (4.1)$$

Denklem 4.1’ de verilen  $D_{\min}$  iki uçak arasında korunması gereken emniyetli ayırma mesafesini ifade etmektedir. Çakışma noktası üzerinde iki uçağın geçiş zamanları arasında yeterli süre bulunmaz ise model çakışma olmaması için uçaklardan birisine gecikme uygulamaktadır. Uçaklar arasındaki ayırma süresi uçakların hızlarına, uygulanan ayırma mesafesine ve çakışma açısına göre değişmektedir. Gecikmenin hangi uçağa uygulanacağına ise model tarafından karar verilmektedir. Kesişen rotalarda oluşabilecek çakışmalar denklem (4.2) ve (4.3) kullanılarak kontrol edilmektedir.

$$P_{i_2k_2n} - P_{i_1k_1n} \geq sreq_{v_1v_2n} - (2 - x_{i_1k_1} - x_{i_2k_2}) \cdot M - e_1(i_1, i_2) \cdot M \quad (4.2)$$

$$\forall i_1, i_2, f_1, f_2, k_1, k_2, v_1, v_2 \mid i_1 \neq i_2, v_1 = t(i_1), v_2 = t(i_2), e(i_1) \neq e(i_2), k_1 \neq k_2, \\ f_1 = e(i_1), f_2 = e(i_2), o(k_1f_1n) = 1, o(k_2f_2n) = 1$$

$$P_{i_1k_1n} - P_{i_2k_2n} \geq sreq_{v_1v_2n} - (2 - x_{i_1k_1} - x_{i_2k_2}) \cdot M - e_1(1 - i_1, i_2) \cdot M \quad (4.3)$$

$$\forall i_1, i_2, f_1, f_2, k_1, k_2, v_1, v_2 \mid i_1 \neq i_2, v_1 = t(i_1), v_2 = t(i_2), e(i_1) \neq e(i_2), k_1 \neq k_2, \\ f_1 = e(i_1), f_2 = e(i_2), o(k_1f_1n) = 1, o(k_2f_2n) = 1$$

Denklemlerde kullanılan  $x_{ik}$  karar değişkeni  $i$ . uçağın  $k$ . giriş noktasına atanıp atanmadığını gösteren 0-1 tam sayılı bir karar değişkenidir.  $p_{ikn}$  karar değişkeni ise  $i$ . uçağın  $k$ . giriş noktandan giriş yapıp  $n$ . çakışma noktasında bulunma zamanını göstermektedir. Karar değişkeni  $e_1(i_1, i_2)$  ise hangi uçağın kesişme noktasından önce geçeceğine karar vermektedir.  $sreq_{v_1v_2n}$  parameteresi ise  $n$ . çakışma noktasında  $v_1$  ile  $v_2$  performans kategorilerine sahip uçakların arasında bulunması gereken zaman ayırmasını ifade etmektedir. Bu değer her bir çakışma noktası için MATLAB ortamında hesaplanıp modele parametre olarak eklenmiştir.

#### 4.1.2. Aynı rotada takip durumu

Önerilen modelde Şekil 4.4’de gösterilen aynı rotayı kullanan uçakların birbirlerini geçmelerine izin verilmemektedir. Dolayısıyla sektöre önce giren uçağın sektörden önce çıkması gerekmektedir. Bu durumun sağlanmasını hem giriş noktası kontrolü hem de çıkış noktası kontrolü yapılması gerekmektedir. Aynı rotadaki çakışmalar Denklem (4.4), (4.5), (4.6) ve (4.7) ile kontrol edilmektedir. Denklemlerde hangi uçağın sektöre önce girip ve önce çıkacağına  $b_1(i_1, i_2)$  karar değişkeni ile karar vermektedir.

$$q_{i_2k} - q_{i_1k} \geq \frac{D_{min}}{h_v} - (2 - x_{i_1k} - x_{i_2k}) \cdot M - b_1(i_1, i_2) \cdot M \quad (4.4)$$

$$\forall i_1, i_2, k, v \mid i_1 \neq i_2, v = t(i_1), e(i_1) = e(i_2)$$

$$q_{i_1k} - q_{i_2k} \geq \frac{D_{min}}{h_v} - (2 - x_{i_1k} - x_{i_2k}) \cdot M - b_1(1 - i_1, i_2) \cdot M \quad (4.5)$$

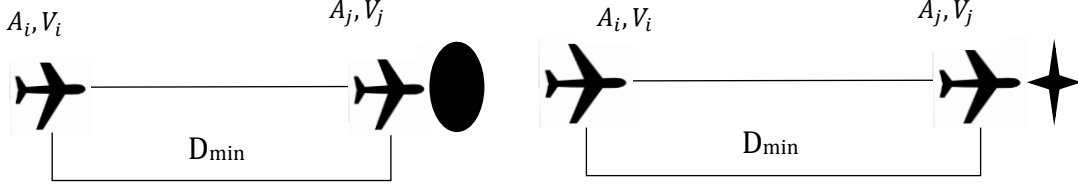
$$\forall i_1, i_2, k, v \mid i_1 \neq i_2, v = t(i_2), e(i_1) = e(i_2)$$

$$c_{i_2kf} - c_{i_1kf} \geq \frac{D_{min}}{h_v} - (2 - x_{i_1k} - x_{i_2k}) \cdot M - b_1(i_1, i_2) \cdot M \quad (4.6)$$

$$\forall i_1, i_2, k, v \mid i_1 \neq i_2, v = t(i_2), e(i_1) = e(i_2)$$

$$c_{i_1 k f} - c_{i_2 k f} \geq \frac{D_{min}}{h_v} - (2 - x_{i_1 k} - x_{i_2 k}) \cdot M - b_1(1 - i_1, i_2) \cdot M \quad (4.7)$$

$$\forall i_1, i_2, k, v \mid i_1 \neq i_2, v = t(i_1), e(i_1) = e(i_2)$$



Şekil 4.4. Aynı rota kullanımı

Şekil 4.4’de sektöre önce giriş yapan  $A_j$  uçağının sektörden daha önce çıktığı gösterilmiştir. Model de kullanılan  $q_{ik}$  ve  $c_{ikf}$  sırasıyla  $i$ . uçağın  $k$ . giriş noktasında bulunma zamanını ve  $i$ . uçağın  $k$ . giriş noktasından giriş yapıp  $f$ . çıkış noktasında bulunma zamanını göstermektedir.

#### 4.1.3. Aynı çıkış noktası kullanımı durumu

Önerilen modelde Şekil 4.5’de gösterilen farklı giriş noktalarından girip aynı çıkış noktalarına yönelen uçaklar arasındaki emniyetli ayırma Denklem (4.8) ve (4.9) ile sağlanmaktadır. Denklemlerde kullanılan  $treq_{k_1 k_2 v_1 v_2 f}$  parametresi aynı çıkış noktasını kullanan uçaklar arasında bulunması gereken zaman ayırmasını ifade etmektedir. Bu değer denklem (4.1) kullanılarak hesaplanmaktadır. Model hangi uçağın sektörden önce çıkacağına  $b_2(i_1, i_2)$  karar değişkeni ile karar vermektedir.

$$c_{i_2 k_2 f} - c_{i_1 k_1 f} \geq treq_{k_1 k_2 v_1 v_2 f} - (2 - x_{i_1 k_1} - x_{i_2 k_2}) \cdot M - b_2(i_1, i_2) \cdot M \quad (4.8)$$

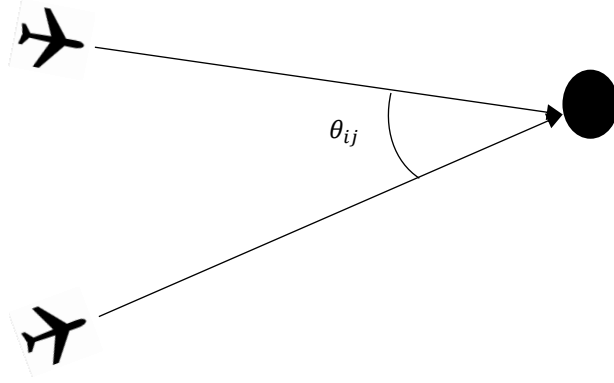
$$\forall i_1, i_2, k_1, k_2, f, v \mid i_1 \neq i_2, v_1 = t(i_1), v_2 = t(i_2), e(i_1) = e(i_2),$$

$$k_1 \neq k_2, f = e(i_1)$$

$$c_{i_1 k_1 f} - c_{i_2 k_2 f} \geq treq_{k_1 k_2 v_1 v_2 f} - (2 - x_{i_1 k_1} - x_{i_2 k_2}) \cdot M - b_2(1 - i_1, i_2) \cdot M \quad (4.9)$$

$$\forall i_1, i_2, k_1, k_2, f, v \mid i_1 \neq i_2, v_1 = t(i_1), v_2 = t(i_2), e(i_1) = e(i_2),$$

$$k_1 \neq k_2, f = e(i_1)$$



Şekil 4.5. Aynı çıkış noktasını kullanımı

#### 4.1.4. Aynı giriş noktası kullanım durumu

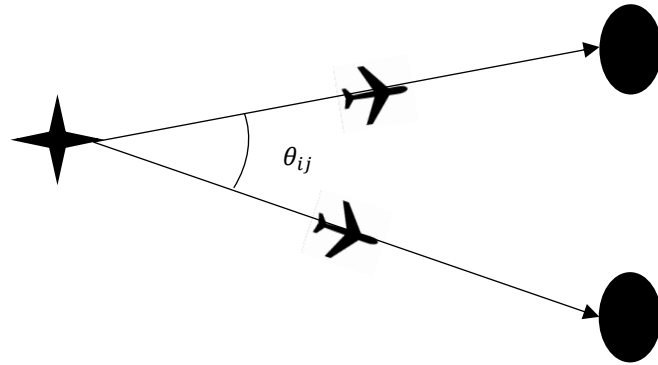
Önerilen modelde Şekil 4.6'da gösterilen aynı giriş noktalarından girip, farklı çıkış noktalarına yönelen uçaklar arasındaki ayırmayı Denklem (4.10) ve (4.11) sağlanmaktadır. Modelde kullanılan  $breq_{k_1 k_2 v_1 v_2 f}$  parametresi aynı giriş noktasını kullanan uçaklar arasında bulunması gereken ayırma zamanını ifade etmektedir. Bu değer Denklem (4.1) kullanılarak hesaplanmaktadır. Model hangi uçağın erken sektörden gireceğine  $b_3(i_1, i_2)$  karar değişkeni ile karar vermektedir.

$$q_{i_2 k} - q_{i_1 k} \geq breq_{f_1 f_2 v_1 v_2 k} - (2 - x_{i_1 k} - x_{i_2 k}) \cdot M - b_3(i_1, i_2) \cdot M \quad (4.10)$$

$$\forall i_1, i_2, f_1, f_2, k, v_1, v_2 | i_1 \neq i_2, v_1 = t(i_1), v_2 = t(i_2), e(i_1) \neq e(i_2), f_1 = e(i_1), f_2 = e(i_2)$$

$$q_{i_1 k} - q_{i_2 k} \geq breq_{f_1 f_2 v_1 v_2 k} - (2 - x_{i_1 k} - x_{i_2 k}) \cdot M - b_3(1 - i_1, i_2) \cdot M \quad (4.11)$$

$$\forall i_1, i_2, f_1, f_2, k, v_1, v_2 | i_1 \neq i_2, v_1 = t(i_1), v_2 = t(i_2), e(i_1) \neq e(i_2), f_1 = e(i_1), f_2 = e(i_2)$$

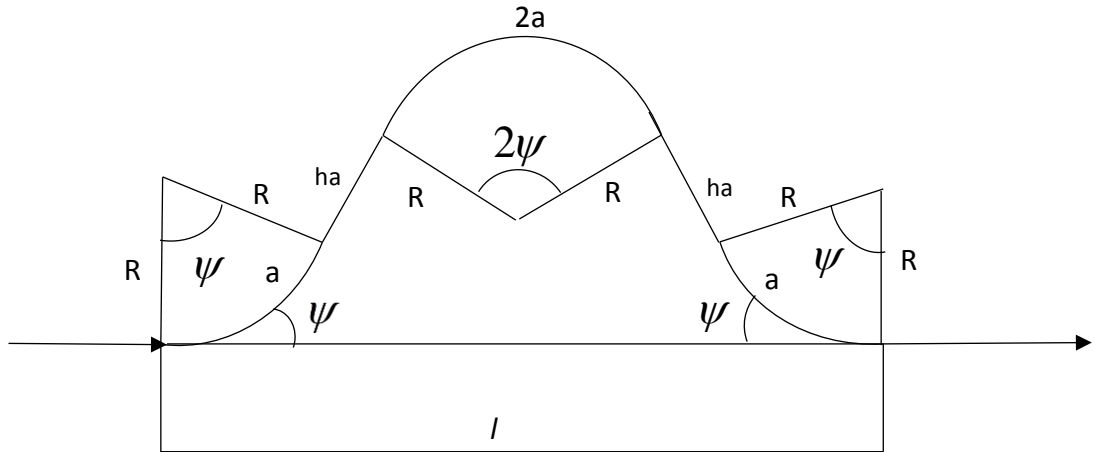


Şekil 4.6. Aynı giriş noktası ve farklı çıkış noktaları kullanımı

## 4.2. Vektör Manevrası

Uçakların aldıkları gecikme sürelerinin hangi yöntem uygulamasıyla oluştuğu bir optimizasyon konusudur. Bu çalışmada uçaklara vektör manevrası uygulanarak gecikmelerinin oluşturulacağı kabul edilmektedir. Bu durum Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Vektör manevrası sırasında kullanılan değerler aşağıda verilmiştir:

- Dönüş yarıçapı  $R(i)$ ,
- Yatış açısı  $\phi(i)$ ,
- Sapma açısı  $\psi(i)$ ,
- Manevra mesafesi  $l(i)$ ,
- Dönüş sırasında kat edilen mesafe  $a(i)$ ,
- Dönüş sırasında orijinal rotada kat edilen mesafe  $b(i)$ ,
- Manevra sırasında düz uçuşta kat edilen mesafe  $ha(i)$ ,
- Dönüş manevrası sırasında harcanan yakıt  $f_1(i)$ ,
- Dönüş manevrası sırasında düz uçuşta harcanan yakıt  $f_2(i)$ ,
- Orijinal manevra mesafesinde uçulsaydı yakılacak olan yakıt  $f_3(i)$  olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.7. Dönüş hareketi sırasında kat edilen mesafeler

Şekil 4.7’de uçakların dönüş hareketi sırasında kat ettiği mesafeler gösterilmiştir. Dönüş hareketinin koordineli olduğu dolayısıyla uçuş hızı, irtifası ve yatış açısının sabit olduğu kabul edilmiştir. Buna göre dönüş hareketinde kat edilen toplam mesafe  $(4a)$  aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir:

$$4a = 8 \cdot \pi \cdot R \cdot \frac{\psi}{360} \quad (4.12)$$

Vektör manevrası sırasında yakıt sarfiyat miktarı sapma açısı, yatış açısı ve manevra mesafesi göre değişmektedir.

### 4.3. Yakıt Sarfiyatı

Uçakların yatay düzlemdeki gerçekleştirdikleri dönüş hareketi esnasındaki yakıt sarfiyatlarının hesaplanabilmesi için 4.13-4.19 denklemleri ile verilen bağıntılar kullanılmıştır:

$$C_L = \frac{2 \cdot m \cdot g}{\rho \cdot V^2 \cdot S \cdot \cos \phi} \quad (4.13)$$

$$C_D = C_{D0} + k \cdot (C_L)^2 \quad (4.14)$$

$$D = \frac{C_D \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S}{2} \quad (4.15)$$

$$T = D \quad (4.16)$$

$$\eta = C_{f1} \cdot \left( 1 + \frac{V_{TAS}}{C_{f2}} \right) \quad (4.17)$$

$$f_{nom} = \eta \cdot T \quad (4.18)$$

$$f_{cr} = f_{nom} \cdot C_{fer} \quad (4.19)$$

Denklem 4.13-4.19'deki parametre değerlerinin belirlenebilmesi için her uçak tipine ait performans modellerinin bilinmesi gerekmektedir. Uçak modellerine ilişkin birçok farklı performans modeli mevcut olmakla beraber bu çalışmada BADA 3.11 performans modelinde verilen değerler kullanılmıştır [59]. Denklem (4.13)'de  $C_L$  uçağın aerodinamik taşıma katsayısını,  $m$  uçağın kütlesini,  $g$  yerçekimi ivmesini,  $\rho$  uçuş yapılan irtifadaki havanın yoğunluğunu,  $V$  uçağın gerçek hava hızını,  $S$  uçağın kanat planform alanını ve  $\phi$  yatış açısını ifade etmektedir. Taşıma katsayısı Denklem (4.13) kullanılarak hesaplandıktan sonra, uçağın sürekleme polerinin basit simetrik parabolik polere sahip olduğu kabulüne dayalı (4.14) denklemi ile verilen sürekleme poleri ifadesi  $C_D$  sürekleme katsayısı bulunabilir. Denklem (4.14)'de  $C_{D0}$  uçağın parazit sürüklenme katsayısını ve  $k$  ise indüklenmiş sürüklenme katsayısını ifade etmektedir. Toplam sürüklenme katsayısının

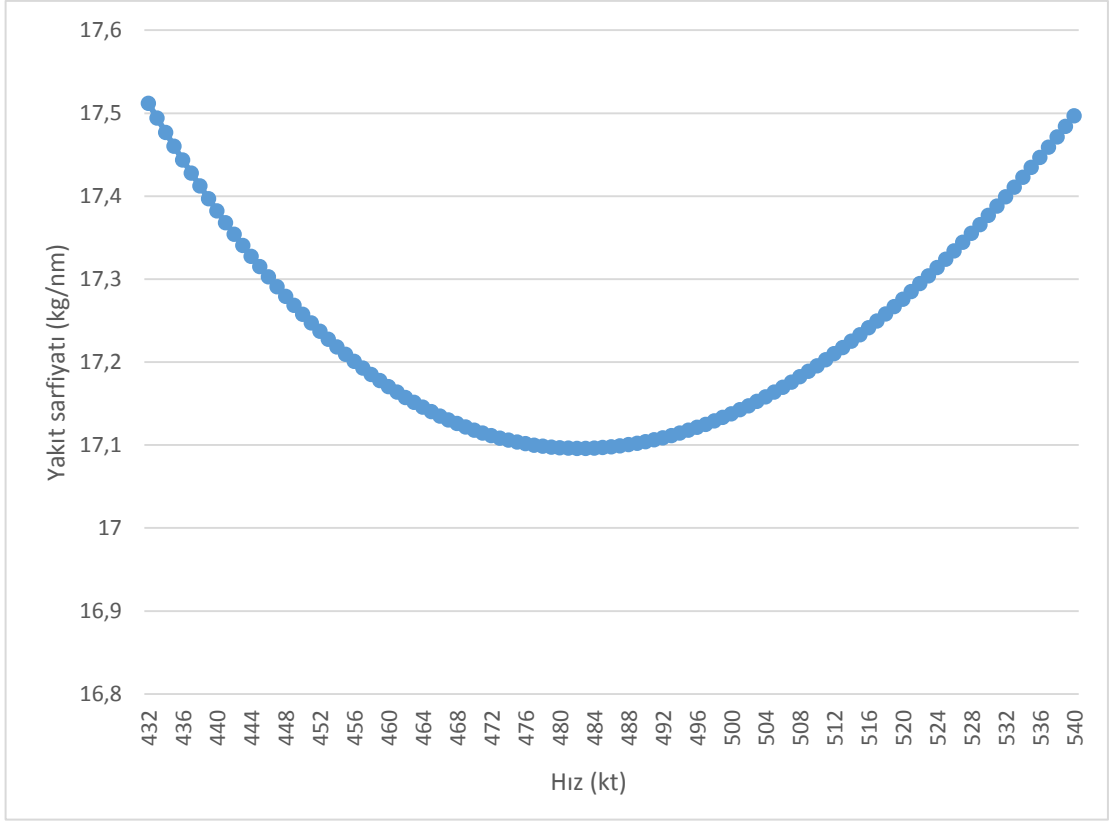
hesaplanmasından sonra uçağa etkiyen toplam aerodinamik sürüklenme kuvveti,  $D$  Denklem (4.15) kullanılarak bulunabilir. Uçakların seyir aşamasında sabit irtifa ve sabit hızda uçtukları kabul edilerek motorların ürettiği toplam itki onlara etki eden toplam sürüklenme kuvvetine eşit olacaktır (Denklem 4.16). Problemde ele alınan uçakların tepkili motorlara sahip oldukları kabul edilmiştir. Bir tepkili motorlu uçağın birim zamandan birim itki üretmek için harcadığı yakıt miktarı özgül yakıt sarfiyatı,  $\eta$  olarak tanımlanır ve Denklem 4.17’de BADA 3.11 versiyonuna göre hesaplanır [59]. Denklem 4.17’de verilen  $C_{f1}$  ve  $C_{f2}$  özgül yakıt katsayıları olup değerleri uçak tipine göre değişiklik göstermektedir. Tepkili motorlu bir uçağın birim zamandaki yakıt tüketimi,  $f_{nom}$  ürettiği itki ve özgül yakıt sarfiyatı miktarına bağlı olup Denklem (4.18) ile ifade edilebilir. Uçağın seyir aşamasındaki birim yakıt sarfiyatını,  $f_{cr}$  bulmak için ise Denklem (4.19) kullanılmıştır. Bu denklemde  $C_{fcr}$  seyir uçuşu için düzeltme katsayısını ifade etmektedir.

Hesaplamalar standart atmosfer koşulları altında 33,000 ft (FL330) irtifa seyir uçuşu gerçekleştiren ve tepkili motorlu geniş gövdeli, dar gövdeli ve bölgesel olmak üzere üç farklı performans kategorisini temsil eden uçak tipleri için gerçekleştirilmiştir. Bu hesaplamalarda kullanılan değerler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

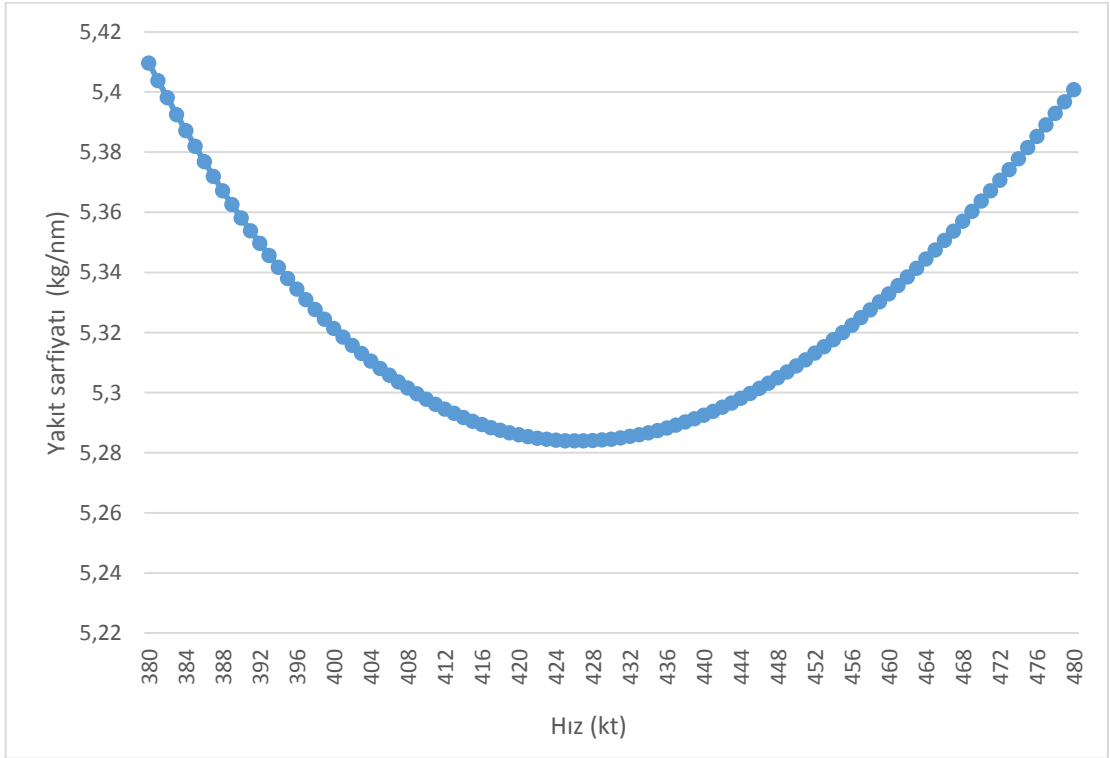
**Çizelge 4.1.** Uçak performans parametreleri (BADA 3.11) [59]

Parametreler	Uçak Tipleri		
	Boeing 777-300 (Geniş Gövde)	Airbus A320 (Dar Gövde)	Embraer E190 (Bölgesel)
$m$ (kg)	290300	64000	41000
$g$ ( $m/s^2$ )	9,81	9,81	9,81
$\rho$ ( $kg/m^3$ )	0,4097	0,4097	0,4097
$S$ ( $m^2$ )	427,82	122,6	92,53
$V_{TAS}$ ( $m/s$ )	247,96	219,15	199,60
$C_{D0}$	0,02291	0,026659	0,0248
$k$	0,042347	0,038726	0,042903
$C_{f1}$ (kg/(min·kN))	0,54124	0,75882	0,6819
$C_{f2}$ (knots)	858,42	2938,5	823,77
$C_{fcr}$	0,86812	0,96358	0,97996

Çizelge 4.1’ de verilen değerler kullanılarak uçakların farklı seyir hızlarına göre sabit irtifada gerçekleştirdikleri yakıt sarfiyatları hesaplanmıştır. Yakıt sarfiyatı bir deniz mili uçmak için harcanan yakıtı göstermektedir.

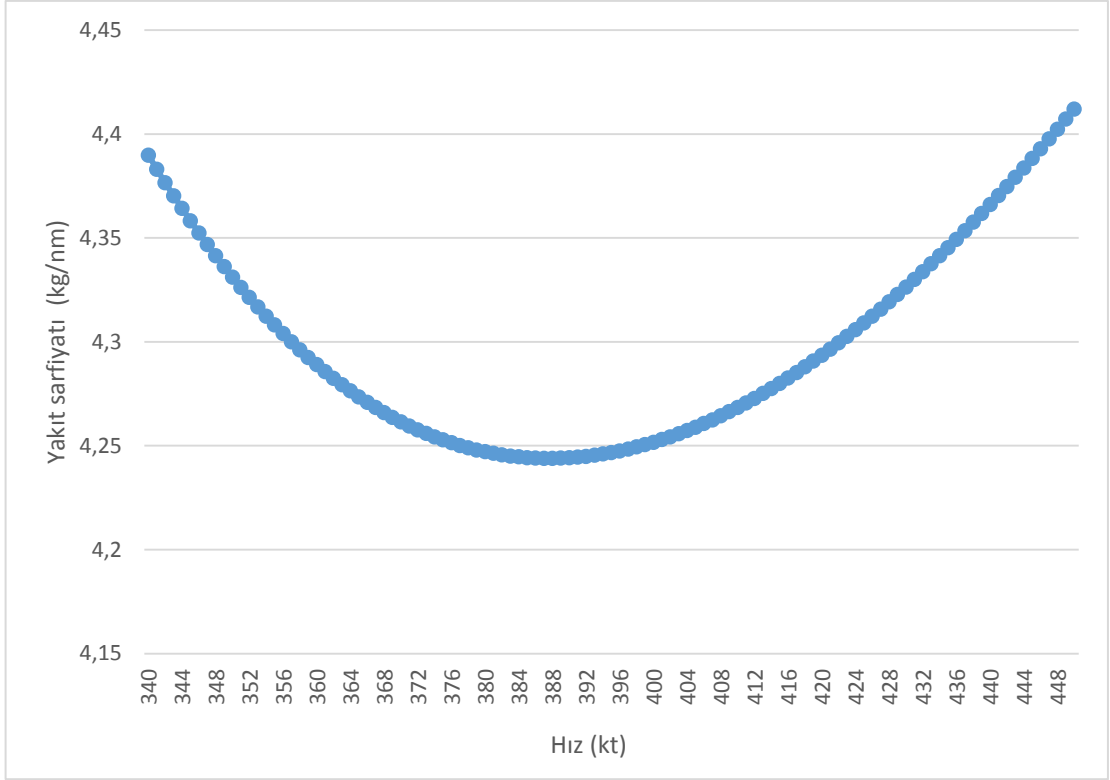


**Şekil 4.8.** Boeing 777 için FL330 da hız değişimine göre yakıt sarfiyatı



**Şekil 4.9.** Airbus A320 için FL330 da hız değişimine göre yakıt sarfiyatı



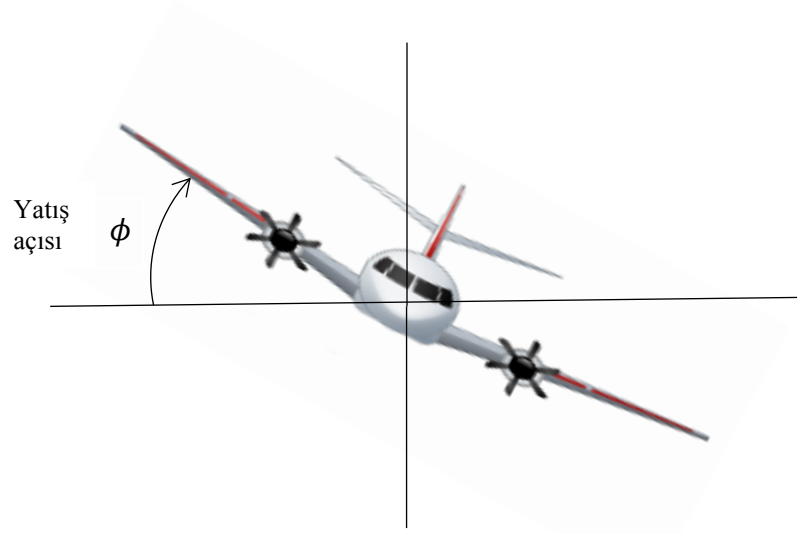


Şekil 4.10. Embraer E190 için FL330 da hız değişimine göre yakıt sarfiyatı

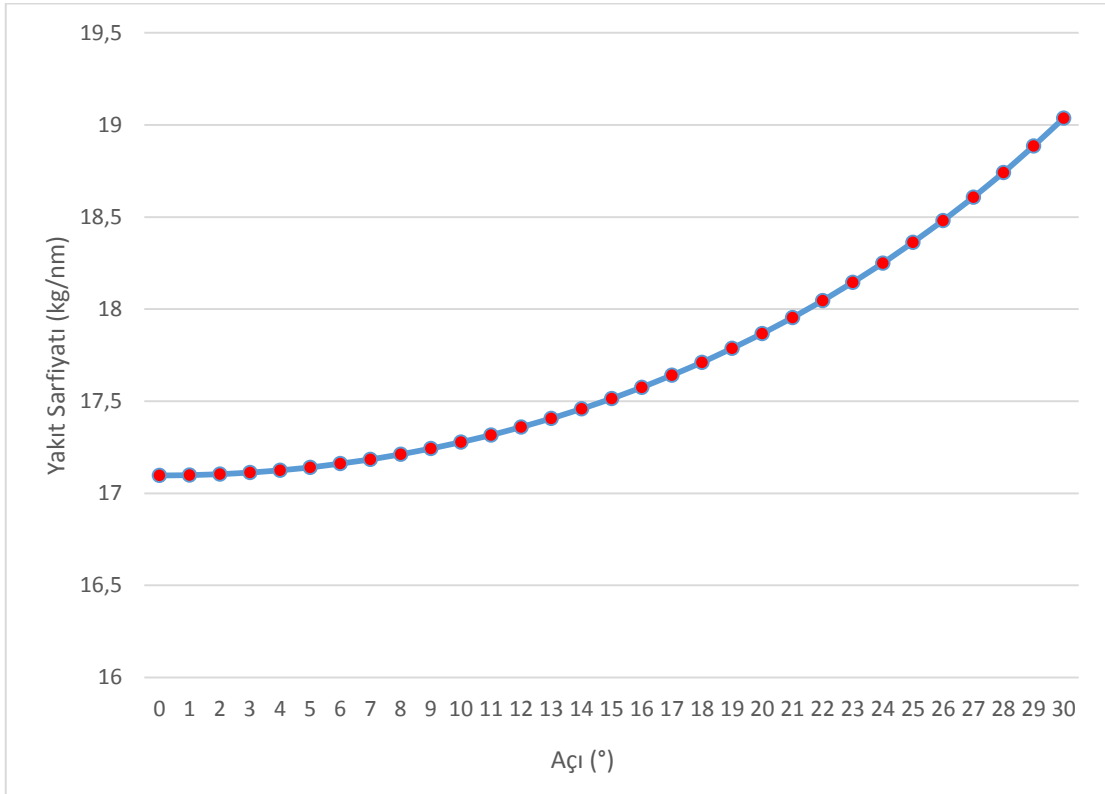
Çizelge 4.2. Uçak seyir hızları

Uçak Tipleri	FL 330 için Seyir Hızları (kt)
Boeing 777-300	482
Airbus A320	426
Embraer E190	388

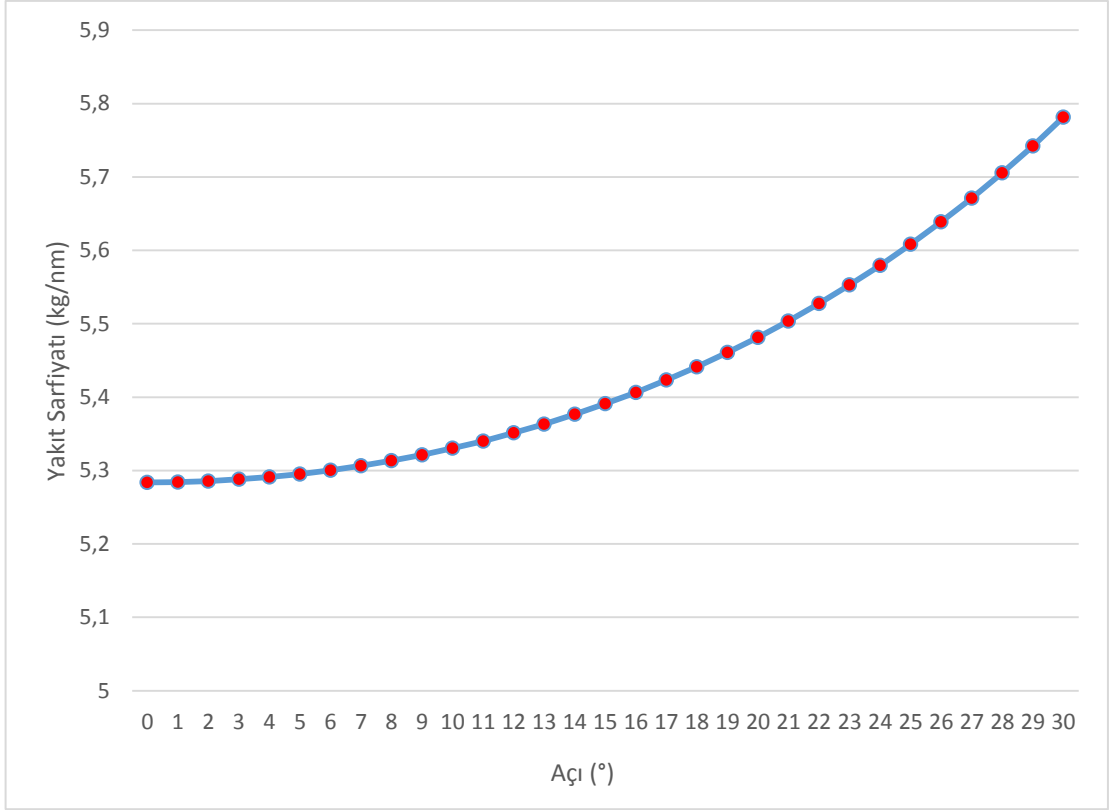
Çizelge 4.2' de Boeing 777-300, Airbus A320 ve Embraer E190 uçaklarının seyir hızları gösterilmiştir. Bu hızlar deniz mili başına en az yakıt tüketiminin gerçekleştiği değerlerdir. Uçakların dönüş hareketi sırasında sabit hızda yakıt tüketimlerinin yatış açısına göre nasıl değiştiği MATLAB programında hesaplanmıştır. Yatış açısı değişiminin  $0^\circ$  ile  $30^\circ$  arasında olabileceği kabul edilmiştir. Hesaplamaların sonuçları Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14' te gösterilmiştir.



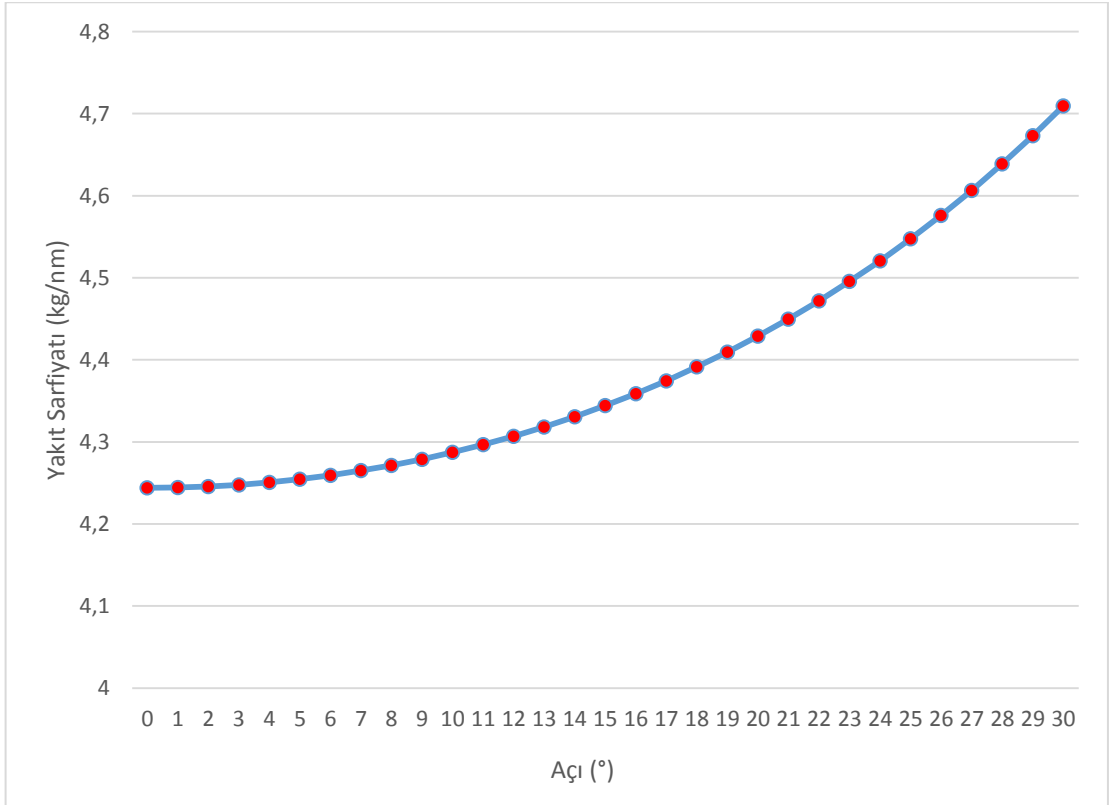
Şekil 4.11. Uçak dönüş hareketi



Şekil 4.12. Boeing 777 için FL330 sabit hızda yatış açısına göre yakıt sarfiyatı



**Şekil 4.13** Airbus A320 için FL330 sabit hızda yatış açısına göre yakıt sarfıyatı



**Şekil 4.14.** Embraer E190 için FL330 sabit hızda yatış açısına göre yakıt sarfıyatı

Yukarıda elde edilen değerler MATLAB programında bulunan eğri uydurma uygulamasında analiz edilerek her bir uçağın sabit hızda farklı yatış açıları göre yakıt sarfiyatı miktarını veren 3. dereceden bir polinom elde edilmiştir. Bu polinom derecesinde  $R^2$  değeri 1 olarak hesaplanmıştır. Boeing 777-300 için yakıt sarfiyat  $FC_1$  denklemi (4.20)' de, Airbus A320 için yakıt sarfiyat denklemi  $FC_2$  (4.21)' de ve Embraer E190 için yakıt sarfiyat denklemi  $FC_3$  (4.22)' de verilmiştir. Kullanılan katsayılar Çizelge 4.3, Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5'te verilmiştir.

$$FC_1 = \chi_{11} \cdot \phi^3 + \chi_{21} \cdot \phi^2 + \chi_{31} \cdot \phi + \chi_{41} \quad (4.20)$$

$$FC_2 = \chi_{12} \cdot \phi^3 + \chi_{22} \cdot \phi^2 + \chi_{32} \cdot \phi + \chi_{42} \quad (4.21)$$

$$FC_3 = \chi_{13} \cdot \phi^3 + \chi_{23} \cdot \phi^2 + \chi_{33} \cdot \phi + \chi_{43} \quad (4.22)$$

**Çizelge 4.3.** Boeing 777-300 dönüş yakıt sarfiyat katsayıları

Uçak Tipi	Regresyon Katsayıları (kg)				$R^2$
	$\chi_{11}$	$\chi_{21}$	$\chi_{31}$	$\chi_{41}$	
Boeing 777-300	6,416	4,572	0,2896	17,09	1

**Çizelge 4.4.** Airbus A320 dönüş yakıt sarfiyat katsayıları

Uçak Tipi	Regresyon Katsayıları (kg)				$R^2$
	$\chi_{12}$	$\chi_{22}$	$\chi_{32}$	$\chi_{42}$	
Airbus A320	1,371	0,9771	0,06189	5,282	1

**Çizelge 4.5.** Embraer E190 dönüş yakıt sarfiyat katsayıları

Uçak Tipi	Regresyon Katsayıları (kg)				$R^2$
	$\chi_{13}$	$\chi_{23}$	$\chi_{33}$	$\chi_{43}$	
Embraer E190	1,284	0,9147	0,05794	4,243	1

#### 4.4. Matematiksel Model

Önerilen yaklaşımın ilk aşaması karma tam sayılı doğrusal ikinci aşaması ise doğrusal değildir. İlk aşamada hava sahası içinde meydana gelen çakışmalardan kaynaklı gecikmelerin en küçüklenmesi amaçlanmıştır. İkinci aşamada ise uçakların gecikmeden

kaynaklı yakıt sarfiyatının en küçüklenmesi doğrusal olmayan programlama ile çözülmüştür.

#### 4.4.1. Matematiksel modelin ilk aşaması

Geliştirilen modelin ilk aşamasında kabul edilen varsayımlar aşağıda verilmiştir.

- Her uçak kendi giriş bölgesinde bulunan bir noktadan giriş yapabilir.
- Her bir giriş bölgesine ait giriş noktaları arasında on mil mesafe vardır.
- Uçakların rotaları (sektör giriş bölgesi ve çıkış noktaları) belirlidir.
- Uçuş rotası boyunca uçakların hızı ve irtifası sabittir.
- Çakışmaları önlemek için uçakların sektöre giriş zamanları değişebilmektedir.
- Aynı rotada uçan uçakların birbirlerini geçmesine izin verilmemektedir.
- Havada gecikme alan uçakların yapacakları manevralar göz ardı edilmiştir.

#### Kümeler ve indisler

Oluşturulan yaklaşımın ilk aşamasında kullanılan kümeler ve indisler aşağıda verilmiştir.

#### Kümeler:

$I = \{1, 2, 3, \dots, n1\}$ , uçak kümesi	$i, i_1, i_2 \in I$
$K = \{1, 2, 3, \dots, n2\}$ , giriş noktası kümesi	$k, k_1, k_2 \in K$
$J = \{1, 2, 3, 4\}$ , giriş bölgesi kümesi	$j, j_1, j_2 \in J$
$V = \{1, 2, 3\}$ , uçak performans kategorisi kümesi	$v, v_1, v_2 \in V$
$N = \{1, 2, 3, \dots, n3\}$ , çakışma noktası kümesi	$n \in N$
$F = \{1, 2, 3, 4\}$ , çıkış bölgesi kümesi	$f, f_1, f_2 \in F$

#### İndisler:

$i, i_1, i_2 \in I$  belirli bir uçak numarasını göstermek için kullanılan indistir.

$k, k_1, k_2 \in K$  belirli bir giriş noktası numarasını göstermek için kullanılan indistir.

$j, j_1, j_2 \in J$  belirli bir giriş bölgesi numarasını göstermek için kullanılan indistir.

$v, v_1, v_2 \in V$  belirli bir performans kategorisi numarasını göstermek için kullanılan indistir.

$n \in N$  çakışma noktasının numarasını göstermek için kullanılan indistir.

$f, f_1, f_2 \in F$  belirli bir çıkış noktası numarasını göstermek için kullanılan indistir.

### Parametreler ve karar değişkenleri

Oluşturulan modelin ilk aşamasında kullanılan parametreler ve karar değişkenleri aşağıda verilmiştir.

#### Parametreler:

$$M=10000$$

$$D_{min}= 5 \text{ deniz mili (nm)}$$

$g_i$  :  $i$ . uçağın sektöre planlanan giriş zamanı

$t_i$  :  $i$ . uçağın performans kategorisi

$r_i$  :  $i$ . uçağın sektöre giriş bölgesi

$e_i$  :  $i$ . uçağın sektörden çıkış noktası

$bg_i$  :  $i$ . uçağın referans durum için sektöre giriş noktası

$h_v$  :  $v$ . performans kategorisinin hızı

$d_{kn}$  :  $k$ . giriş noktasının  $n$ . çakışma noktasına olan uzaklığı

$TD_{kf}$  =  $k$ . giriş noktasının  $f$ . çıkış noktasına olan uzaklığı

$sreq_{v_1v_2n} = n$ . çakışma noktası üzerinde  $v_1$  ile  $v_2$  hızlarına ait uçaklar arasında bulunması gereken emniyetli ayırma süresi

$treq_{k_1k_2v_1v_2f} = f$ . çıkış noktası üzerinde  $v_1$  ile  $v_2$  hızlarında ve  $k_1$  ile  $k_2$  giriş noktalarından giriş yapan uçaklar arasında bulunması gereken emniyetli ayırma süresi

$breq_{f_1f_2v_1v_2k} = k$ . giriş noktasından  $v_1$  ve  $v_2$  hızları ile  $f_1$  ve  $f_2$  çıkış noktalarına hareket eden uçaklar arasında bulunması gereken emniyetli ayırma süresi

$$u_{jk} = \begin{cases} 1 & j. \text{ bölgeye gelen uçağın } k. \text{ giriş noktasına atanabilmesi} \\ 0 & \text{diğer durum} \end{cases}$$

$$o_{kfn} = \begin{cases} 1 & k. \text{ noktadan girip } f. \text{ noktadan çıkan uçağın } n. \text{ noktaya uğraması} \\ 0 & \text{diğer durum} \end{cases}$$

### Karar Değişkenleri:

$q_{ik}$ :  $i$ . uçağın gecikmeli olarak  $k$ . noktadan sektöre giriş zamanı

$w_i$ :  $i$ . uçağın gecikme süresi

$p_{ikn}$  =  $i$ . uçağın  $k$ . noktadan giriş yaparsa  $n$ . çakışma noktasında bulunma zamanı

$c_{ikf}$  =  $i$ . uçağın  $k$ . noktadan giriş yaparsa  $f$ . çıkış noktasında bulunma zamanı

$$e_{1i_1,i_2} = \begin{cases} 1 & i_2. \text{ uçağın çakışma noktasına } i_1. \text{ uçaktan önce gelmesi durumunda} \\ 0 & \text{diğer durum} \end{cases}$$

$$b_{1i_1,i_2} = \begin{cases} 1 & i_2. \text{ uçağın } i_1. \text{ uçaktan önce sektöre giriş yapması durumunda} \\ 0 & \text{diğer durum} \end{cases}$$

$$b_{2i_1,i_2} = \begin{cases} 1 & i_2. \text{ uçağın çıkış noktasına } i_1. \text{ uçaktan önce gelmesi durumunda} \\ 0 & \text{diğer durum} \end{cases}$$

$$b_{3i_1,i_2} = \begin{cases} 1 & i_2. \text{ uçağın giriş noktasına } i_1. \text{ uçaktan önce gelmesi durumunda} \\ 0 & \text{diğer durum} \end{cases}$$

$$x_{ik} = \begin{cases} 1 & i \text{ uçağın } k. \text{ giriş noktasına atanması} \\ 0 & \text{diğer durum} \end{cases}$$

Uçakların aynı giriş, çıkış veya çakışma noktalarını kullanması durumunda eğer aralarında yeterli zaman ayırması bulunmaz ise iki uçaktan birisinin gecikme alması gerekmektedir. Bu çalışmada da  $i$ . uçağın gecikme süresi  $w_i$  karar değişkeni ile ifade edilmiştir.

### Amaç fonksiyonu

$$\text{En küçük } z = \sum_i w_i \quad (4.23)$$

Modelin ilk aşamasının amaç fonksiyonu hava sahasında meydana gelen toplam gecikmenin en küçüklenmesidir.

### Kısıtlar

$$q_{ik} = g_i + w_i \quad \forall i, k \quad (4.24)$$

$$p_{ikn} = q_{ik} + \frac{d_{kn}}{h_v} \quad \forall i, k, n, v | v = t(i) \quad (4.25)$$

$$c_{ikf} = q_{ik} + \frac{TD_{kf}}{h_v} \quad \forall i, k, f, v | v = t(i) \quad (4.26)$$

Denklem 4.24, 4.25 ve 4.26 sırasıyla uçakların giriş noktaları, çakışma noktaları ve çıkış noktaları üzerinden geçme zamanlarını hesaplayan kısıtlardır.

$$\sum_{k|u_{jk}=1} x_{ik} = 1 \quad \forall i, j | j = r(i) \quad (4.27)$$

$$\sum_{k|u_{jk}=1, k=bg(i)} x_{ik} = 1 \quad \forall i, j | j = r(i) \quad (4.28)$$

Denklem 4.27 uçakların her bir uçağın kendi giriş bölgesi içindeki bir giriş noktasına atanmasını garanti eder. Denklem 4.28 ise uçakların kendi bölgesine referans durum giriş noktasına atanmasını garanti eder.

$$q_{i_2k} - q_{i_1k} \geq \frac{D_{min}}{h_v} - (2 - x_{i_1k} - x_{i_2k}) \cdot M - b_1(i_1, i_2) \cdot M \quad (4.29)$$

$$\forall i_1, i_2, k, v | i_1 \neq i_2, v = t(i_1), e(i_1) = e(i_2)$$

$$q_{i_1k} - q_{i_2k} \geq \frac{D_{min}}{h_v} - (2 - x_{i_1k} - x_{i_2k}) \cdot M - b_1(1 - i_1, i_2) \cdot M \quad (4.30)$$

$$\forall i_1, i_2, k, v | i_1 \neq i_2, v = t(i_2), e(i_1) = e(i_2)$$

$$c_{i_2kf} - c_{i_1kf} \geq \frac{D_{min}}{h_v} - (2 - x_{i_1k} - x_{i_2k}) \cdot M - b_1(i_1, i_2) \cdot M \quad (4.31)$$

$$\forall i_1, i_2, k, v | i_1 \neq i_2, v = t(i_2), e(i_1) = e(i_2)$$

$$c_{i_1kf} - c_{i_2kf} \geq \frac{D_{min}}{h_v} - (2 - x_{i_1k} - x_{i_2k}) \cdot M - b_1(1 - i_1, i_2) \cdot M \quad (4.32)$$

$$\forall i_1, i_2, k, v | i_1 \neq i_2, v = t(i_1), e(i_1) = e(i_2)$$

Denklem (4.29) ve (4.30) aynı giriş ve çıkış noktalarını kullanan uçakların sektör giriş noktasındaki aralarında bulunması gereken zaman ayırmasını kontrol eder. Benzer şekilde, Denklem (4.31) ve (4.32) ise aynı durumdaki uçakların sektör çıkış noktasında aralarında bulunması gereken zaman ayırmasını kontrol eder. Model aynı giriş ve çıkış noktasını kullanan uçakların sektör içerisinde birbirlerine geçmesine izin vermediği için  $b_1(i_1, i_2)$  karar değişkeni sektöre hangi uçağın önce giriş yapmasına karar vermektedir.



$$q_{i_2k} - q_{i_1k} \geq breq_{f_1f_2v_1v_2k} - (2 - x_{i_1k} - x_{i_2k}) \cdot M - b_3(i_1, i_2) \cdot M \quad (4.33)$$

$$\forall i_1, i_2, f_1, f_2, k, v_1, v_2 | i_1 \neq i_2, v_1 = t(i_1), v_2 = t(i_2), e(i_1) \neq e(i_2), \\ f_1 = e(i_1), f_2 = e(i_2)$$

$$q_{i_1k} - q_{i_2k} \geq breq_{f_1f_2v_1v_2k} - (2 - x_{i_1k} - x_{i_2k}) \cdot M - b_3(1 - i_1, i_2) \cdot M \quad (4.34)$$

$$\forall i_1, i_2, f_1, f_2, k, v_1, v_2 | i_1 \neq i_2, v_1 = t(i_1), v_2 = t(i_2), e(i_1) \neq e(i_2), \\ f_1 = e(i_1), f_2 = e(i_2)$$

Denklem (4.33) ve (4.34) aynı giriş noktasından giriş yapıp hava sahasının farklı çıkış noktalarına yönelen uçaklar arasındaki zaman ayırmasını kontrol eder.

$$c_{i_2k_2f} - c_{i_1k_1f} \geq treq_{k_1k_2v_1v_2f} - (2 - x_{i_1k_1} - x_{i_2k_2}) \cdot M - b_2(i_1, i_2) \cdot M \quad (4.35)$$

$$\forall i_1, i_2, k_1, k_2, f, v | i_1 \neq i_2, v_1 = t(i_1), v_2 = t(i_2), e(i_1) = e(i_2), \\ k_1 \neq k_2, f = e(i_1)$$

$$c_{i_1k_1f} - c_{i_2k_2f} \geq treq_{k_1k_2v_1v_2f} - (2 - x_{i_1k_1} - x_{i_2k_2}) \cdot M - b_2(1 - i_1, i_2) \cdot M \quad (4.36)$$

$$\forall i_1, i_2, k_1, k_2, f, v | i_1 \neq i_2, v_1 = t(i_1), v_2 = t(i_2), e(i_1) = e(i_2), \\ k_1 \neq k_2, f = e(i_1)$$

Denklem (4.35) ve (4.36) farklı giriş noktalarından giriş yapıp sektörün aynı çıkış noktasına yönelen uçaklar arasındaki zaman ayırmasını kontrol eder.

$$P_{i_2k_2n} - P_{i_1k_1n} \geq sreq_{v_1v_2n} - (2 - x_{i_1k_1} - x_{i_2k_2}) \cdot M - e_1(i_1, i_2) \cdot M \quad (4.37)$$

$$\forall i_1, i_2, f_1, f_2, k_1, k_2, v_1, v_2 | i_1 \neq i_2, v_1 = t(i_1), v_2 = t(i_2), e(i_1) \neq e(i_2), \\ k_1 \neq k_2, f_1 = e(i_1), f_2 = e(i_2), o(k_1f_1n) = 1, o(k_2f_2n) = 1$$

$$P_{i_1k_1n} - P_{i_2k_2n} \geq sreq_{v_1v_2n} - (2 - x_{i_1k_1} - x_{i_2k_2}) \cdot M - e_1(1 - i_1, i_2) \cdot M \quad (4.38)$$

$$\forall i_1, i_2, f_1, f_2, k_1, k_2, v_1, v_2 | i_1 \neq i_2, v_1 = t(i_1), v_2 = t(i_2), e(i_1) \neq e(i_2), \\ k_1 \neq k_2, f_1 = e(i_1), f_2 = e(i_2), o(k_1f_1n) = 1, o(k_2f_2n) = 1$$

Denklem (4.37) ve (4.38) farklı giriş noktalarından giriş yapıp sektörün farklı çıkış noktalarına yönelen uçakların çakışma noktası üzerindeki zaman ayırmasını kontrol eder.

#### 4.4.2 Matematiksel modelin ikinci aşaması

Geliştirilen modelin ikinci aşamasında kabul edilen varsayımlar aşağıda verilmiştir.

- Uçakların ağırlıklarının manevra süresince değişmediği kabul edilmiştir.
- Uçakların hareketleri boyunca hız ve irtifaları sabit kabul edilmiştir.
- Uçakların koordineli dönüş manevrası yön değiştirdikleri ve gerekli yatış açısına anlık olarak ulaştıkları kabul edilmiştir.
- Uçağın uçuş yaptığı ortamda standart atmosferik koşulların geçerli olduğu kabul edilmiştir
- Uçağın uçuş yaptığı ortamda ve rüzgâr hızı ve ivmesi sıfırdır.

#### Kümeler ve indisler

Oluşturulan modelin ilk aşamasında kullanılan kümeler ve indisler aşağıda verilmiştir.

#### Kümeler:

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

$H = \{1, 2, 3\}$  performans kategorisi kümesi  $h \in H$

#### İndisler:

$i \in I$  belirli bir uçak numarasını göstermek için kullanılan indistir.

$h \in H$  belirli bir performans kategorisi numarasını göstermek için kullanılan indistir.

#### Parametreler ve karar değişkenleri

Oluşturulan modelin ikinci aşamasında kullanılan parametreler ve karar değişkenleri aşağıda verilmiştir.

#### Parametreler:

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$

$t_i = i.$  uçağın performans kategorisi

$dx_i = i$ . uçağın gecikme mesafesi

$V_h = h$ . performans kategorisinin hızı

$P_{iv} = \begin{cases} 1 & i . uçağın v. performans kategorisinde olması \\ 0 & diğer durum \end{cases}$

### Karar Değişkenleri:

$R(i) = i$ . uçağın dönüş yarı çapı

$\psi(i) = i$ . uçağın sapma açısı

$\phi(i) = i$ . uçağın yatış açısı

$l(i) = i$ . uçağın manevra mesafesi

$a(i) = i$ . uçağın dönüş hareketinde kat ettiği mesafe

$b(i) = i$ . uçağın dönüş süresinde esas yörüngesinde kat ettiği mesafe

$ha(i) = i$ . uçağın vektör manevrası sırasında sabit baş açısında kat ettiği mesafe

$f_1(i) = i$ . uçağın dönüş süresince harcadığı yakıt

$f_2(i) = i$ . uçağın vektör manevrası sırasında sabit baş açısı ile harcadığı yakıt

$f_3(i) = i$ . uçağın vektör manevrası yapmaması durumunda harcayacağı yakıt

### Amaç fonksiyonu

$$Enküçük \sum_i f_1(i) + f_2(i) - f_3(i) \quad (4.39)$$

Modelin ikinci aşamasının amaç fonksiyonu uçakların gecikmesinden kaynaklı toplam yakıt sarfiyatının en küçüklenmesidir.

## Kısıtlar

$$R(i) = \frac{V(h)^2}{g \cdot \tan(\phi(i))} \quad \forall i, h \mid h = t(i) \quad (4.40)$$

$$a(i) = 8 \cdot \pi \cdot R(i) \cdot \frac{\psi(i)}{2\pi} \quad \forall i \quad (4.41)$$

$$b(i) = 4 \cdot R(i) \cdot \sin(\psi(i)) \quad \forall i \quad (4.42)$$

$$ha(i) = \frac{(l(i) - b(i))}{\cos(\psi(i))} \quad \forall i \quad (4.43)$$

$$a(i) + ha(i) - l(i) - dx(i) = 0 \quad \forall i \quad (4.44)$$

$$b(i) \leq l(i) \quad \forall i \quad (4.45)$$

$$f_1(i) = (\alpha_1 \cdot \phi(i)^3 + \alpha_2 \cdot \phi(i)^2 + \alpha_3 \cdot \phi(i) + 4.243) \cdot a(i) \cdot P_{i1} + (\beta_1 \cdot \phi(i)^3 + \beta_2 \cdot \phi(i)^2 + \beta_3 \cdot \phi(i) + 5.282) \cdot a(i) \cdot P_{i2} + (\gamma_1 \cdot \phi(i)^3 + \gamma_2 \cdot \phi(i)^2 + \gamma_3 \cdot \phi(i) + 17.09) \cdot a(i) \cdot P_{i3} \quad \forall i \quad (4.46)$$

$$f_2(i) = 4.243 \cdot ha(i) \cdot P_{i1} + 5.282 \cdot ha(i) \cdot P_{i2} + 17.09 \cdot ha(i) \cdot P_{i3} \quad \forall i \quad (4.47)$$

$$f_3(i) = 4.243 \cdot l(i) \cdot P_{i1} + 5.282 \cdot l(i) \cdot P_{i2} + 17.09 \cdot l(i) \cdot P_{i3} \quad \forall i \quad (4.48)$$

$$0 \leq \psi(i) \leq \frac{\pi}{2} \quad \forall i \quad (4.49)$$

$$0 \leq \phi(i) \leq \frac{\pi}{6} \quad \forall i \quad (4.50)$$

$$0 \leq l(i) \leq 40 \quad \forall i \quad (4.51)$$

Modelin ikinci aşamasının amaç fonksiyonu (4.39) hava sahasında meydana gelen gecikmeden kaynaklı toplam yakıt sarfiyatının en küçüklenmesidir. Denklem (4.40) her uçak için dönüş yarıçapını, Denklem (4.41) uçakların dönüş hareketi boyunca kat ettiği mesafeyi, Denklem (4.42) her bir uçağın dönüş hareketi boyunca orijinal yörüngesinde kat ettiği mesafeyi, Denklem (4.43) her bir uçağın dönüş mesafesi sırasında sabit baş açısı ile kat ettiği mesafeyi hesaplamaktadır.

Denklem (4.44) vektör hareketi sırasında kat edilen mesafenin gerekli gecikme zamanını sağlamasını garanti etmektedir. Denklem (4.45) dönüş sırasında orijinal rota meydana gelen yer ilerlemesi iz düşümünün manevra için belirlenen mesafeden büyük olmamasını sağlayan kısıttır. Denklem (4.46), (4.47) ve (4.48) sırasıyla dönüş hareketi sırasında harcanan yakıt miktarının hesaplandığı, vektör manevrası sırasında sabit baş açısında uçuş süresinde harcanan yakıtın hesaplandığı ve eğer vektör manevrası yapmamış olsaydı manevra mesafesi boyunca ne kadar yakıt tüketileceğinin hesaplandığı denklemlerdir. Denklem (4.49), (4.50) ve (4.51) sırasıyla sapma açısının, yatış açısının ve manevra mesafesinin alt ve üst limitlerini göstermektedir. Denklem (4.46) de kullanılan katsayılar Çizelge 4.3, 4.4 ve 4.5’ de verilen her bir uçak kategorisine ait dönüş manevrası sırasında harcanan yakıt sarfiyatının hesaplanması için kullanılan regresyon katsayılarıdır ve kullanılan her bir katsayı değeri Çizelge 4.6’ da verilmiştir.

**Çizelge 4.6.** *Uçak yatış hareketinde yakıt sarfiyatının hesaplanması için kullanılan korelasyon değerleri*

Katsayılar	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$
Değerler	6,416	4,572	0,2896	1,371	0,9147	0,06189	1,284	0,9147	0,05794

## 5. ÇAKIŞMADAN KAYNAKLANAN TOPLAM GECİKMELERİ AZALTMAK İÇİN SEZGİSEL YAKLAŞIM ÖNERİSİ

Meta sezgisel algoritmalar makul bir zaman dilimi içerisinde karmaşık bir probleme kabul edilebilir çözümler üretmek için deneme ve yanılma yöntemlerini kullanan etkili bir yoldur. Ele alınan problemlerin karmaşıklığı muhtemel bütün çözümlerin değerlendirilmesini imkânsız bir hale getirmektedir. Meta sezgisel algoritmaların kullanım amacı geçerli ve iyi bir çözümün kabul edilebilir bir zaman dilimi içinde elde edilmek istenmesidir fakat en iyi sonucun elde edilmesi gibi bir garanti verilememektedir. Üretilen etkili ve pratik bir algoritmanın genellikle kaliteli sonuçlar üretmesi ve bulunan bu sonuçlardan bazılarının en iyi çözüme yakın olması beklenmektedir.

Çalışmada ele alınan problem için geliştirilen matematiksel modelin ilk aşaması genetik algoritma ve yasaklı arama algoritmaları kullanılarak çözülmüştür. İzleyen alt bölümlerde ilgili meta-sezgisellerden bahsedilmiştir.

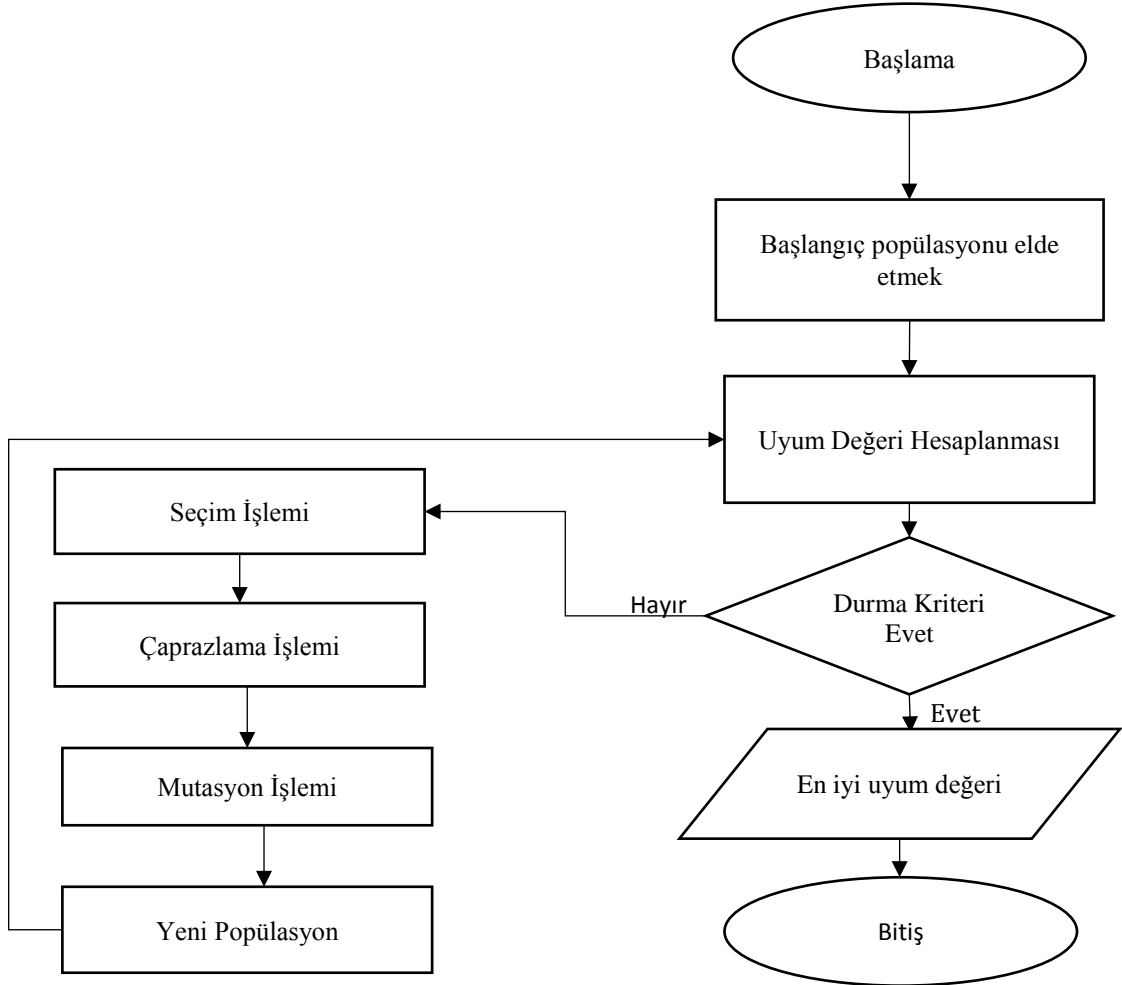
### 5.1. Genetik Algoritma

Genetik algoritmalar (Genetic Algorithm-GA) Darwin'in evrim teorisine dayanan bir arama algoritmasıdır ve John Holland tarafından 1970'li ortaya konmuştur [60]. Genetik algoritmalar doğal seçilimi taklit ederek en iyi çözüme ulaşmaya çalışırlar. Genetik algoritmalarda her bir kromozom bir çözümü temsil eder ve birden fazla kromozom bir araya gelerek popülasyonu oluştururlar. Kromozomlar seçim, çaprazlanma ve mutasyon aşamalarından geçerek genlerini bir sonraki nesillere aktarırlar. Uyum değeri yüksek olan kromozomlarını genlerini sonraki nesillere aktarma olasılığı daha yüksektir. GA genel olarak aşağıda belirtilen parçaların birleşimi olarak meydana gelmektedir:

- Kodlama
- Uyum değeri
- Seçim yöntemi
- Çaprazlama
- Mutasyon

Yeni nesillerin oluşturulması işleminde kromozomların uyum değerleri bu kromozomların kalitesi hakkında bilgi vermektedir. Kromozomlar uyum değerlerine göre seçim işlemine tabi tutularak çaprazlama işlemine katılacak olan kromozomlar belirlenir.

Çaprazlama ve mutasyon operatörleri yeni nesillerin oluşması ve gen değişiminin meydana gelmesi için kullanılırlar. Genetik algoritma MATLAB ortamında kodlanmış olup akış diyagramı Şekil 5.1’ de verilmiştir.



Şekil 5.1. Genetik algoritma akış şemansı

Şekil 5.1’de GA’ nın işlem basamaklarını gösterilmiş olup yapılan işlemler detaylı olarak bir sonraki bölümlerde açıklanacaktır.

### 5.1.1. Kodlama

Bu çalışmada kullanılan kromozom yapısı uçakların giriş bölgelerine ait hangi giriş noktasına atandığını göstermektedir. Her kromozom 3 satırdan oluşmaktadır. İlk satırında bulunan her bir gen uçak numarasını, ikinci satırdaki her bir gen giriş bölgesini ve son olarak üçüncü satırda bulunan genler ise uçağın hangi giriş noktasından sektöre giriş yapacağını ifade etmektedir. Şekil 5.2’de bir kromozom yapısı gösterilmiştir.

1	2	3	4	5	6
4	3	2	1	3	2
11	7	4	2	9	6

**Şekil 5.2.** *Kromozom yapısı*

Şekil 5.2’ da örnek olarak verilen kromozom yapısında ilk satırdaki ilk gende bir değeri bulunmaktadır. Bu değer birinci uçağı ifade etmektedir ve aynı şekilde ilk satırdaki dördüncü gende bulunan dört değeri ise dördüncü uçağı göstermektedir. İkinci satırdaki ilk gende bulunan dört değeri birinci uçağın dördüncü giriş bölgesine ait olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde ikinci satırın altıncı geni ise altıncı uçağın ikinci giriş bölgesinden giriş yapacağını ifade etmektedir. İlk iki satırda verilen bilgiler genetik algoritmaya parametre olarak eklenmektedir. Üçüncü satırın dördüncü geninde bulunan iki değeri ise dördüncü uçağın bir numaralı giriş bölgesine ait ikinci giriş noktasını kullanarak sektöre giriş yapacağını ve ikinci geninde bulunan yedi değeri ise ikinci uçağın üç numaralı giriş bölgesine ait yedinci giriş noktasını kullanarak sektöre giriş yapacağını ifade etmektedir. Bu kodlama yapısında oluşturulan her bir kromozom için uyum değeri hesaplanabilmektedir. Oluşturulan yapı uçakların sadece bir giriş noktasına atanmasına imkân tanımaktadır. Üçüncü satırdaki genlerde bulunan değerler çaprazlama ve mutasyon işlemlerinde değiştirilerek en uygun giriş noktası kombinasyonu oluşturulmak istenmektedir. İlk iki satırda bulunan değerler genetik algoritmanın her aşamasında sabit olarak kalmaktadır.

### **5.1.2. Başlangıç popülasyonunun türetilmesi**

Başlangıç popülasyonun her bir kromozomunun üçüncü satırında bulunan her bir gene kendi giriş bölgesine ait bir giriş noktasının rassal olarak atanması yardımıyla oluşturulmaktadır. Oluşturulan başlangıç popülasyonunda her bir uçağın sadece bir giriş noktasına atanması garanti edilmektedir.

### **5.1.3. Uyum değerinin hesaplanması**

Bu aşamada üretilen kromozomlar sayesinde  $x_{ik}$  karar değişkeni değeri belirlenmektedir. Uçakların kromozomlarda belirtilen giriş noktalarına uygun olarak



sektör içindeki gecikme süreleri matematiksel modelin ilk aşamasında belirtilen bütün kısıtlara bağlı kalınarak hesaplanır.

Oluşturulan algoritmalarda eğer bir çakışma var ise hangi uçağın gecikme alacağı algoritma tarafından rassal olarak belirlenmektedir. Önerilen genetik algoritma her iki uçak için rassal olarak 0 ile 1 arasında değişen bir sayı üretir ve değeri düşük olan uçak gecikme alır. Bu yöntem arama uzayında bulunan farklı çözümlere ulaşılmasına olanak sağlamaktadır. Tasarlanan algoritma bütün uçak çiftleri arasında bulunan çakışmaları çözdükten sonra tekrar çalıştırılarak bulunan çakışma çözümlerinin bir başka çakışmaya neden olup olmadığını kontrol eder. Eğer çakışmaya neden olunmuş ise bütün uçak çiftlerin için çakışma çözümlenme işlemi tekrarlanır. Bu işlem gecikme sürelerinin bir başka çakışmaya neden olmadığını gösterene kadar devam etmektedir. Daha sonra her bir kromozomun uyum değeri hesaplanır. Bu uyum değeri sektörde meydana gelen çakışmalardan kaynaklı toplam gecikmeye eşittir. Genetik operatörler diğer işlemlerini Şekil 5.2’de bulunan kromozom yapısı üzerinden gerçekleştirmektedir.

#### **5.1.4. Seçim işlemi**

Seçim işlemi popülasyonlar için çok önemli bir aşamayı oluşturmaktadır. Popülasyon çeşitliliği ve seçim baskısı genetik algoritmaların performansı önemli ölçüde etkileyen iki faktördür [61]. Eğer seçim baskısı artarsa popülasyon çeşitliliği azalır. Tam tersi durumda ise popülasyonda çeşitlilik artarsa iyi çözümler azalmaya başlamaktadır. Bu iki faktörü dengede tutmak GA’nın başarısı için önemli bir etkidir. Bu çalışmada seçim yöntemi olarak rulet seçimi kullanılmıştır. Rulet seçimi uyum değeri iyi olan kromozomların bir sonraki nesillere genlerini daha fazla aktarabilmesine olanak sağlayan bir seçim işlemidir.

Bu çalışmada hava sahasında meydana gelen çakışmadan kaynaklı toplam gecikmenin en küçüklenmesi matematiksel modelin ilk aşamasının amaç fonksiyonu olduğu için uyum değeri küçük olan kromozomun iyi uyum değerine sahip olması beklenir. Bu durumun oluşturulması için her bir uyum değeri bire bölünerek ortaya çıkan değerler toplanır ve bulunan toplam değer daha sonra her bir uyum değerine bölünerek her bir kromozomun rulet işlemi sırasındaki seçilme olasılıkları hesaplanır. Çizelge 5.1’de Rulet seçimine ait örnek verilmiştir.

**Çizelge 5.1. Rulet seçimi**

	Kromozom	Uyum Değeri	1/Uyum Değeri	Oran
Ebeveyn 1	123212	56	1/56	%10,1
Ebeveyn 2	231123	49	1/49	%11,5
Ebeveyn 3	223211	11	1/11	%51,4
Ebeveyn 4	332112	21	1/21	%26,9
Toplam		137	0,1769	%100

Çizelge 5.1’de dört farklı ebeveyn bulunmakta ve her bir kromozoma karşılık farklı uyum değerleri bulunmaktadır. Oran sütunu her bir kromozomun seçilme olasılığı göstermiştir. Seçim işlemine popülasyon büyüklüğüne ulaşıncaya kadar devam edilir.

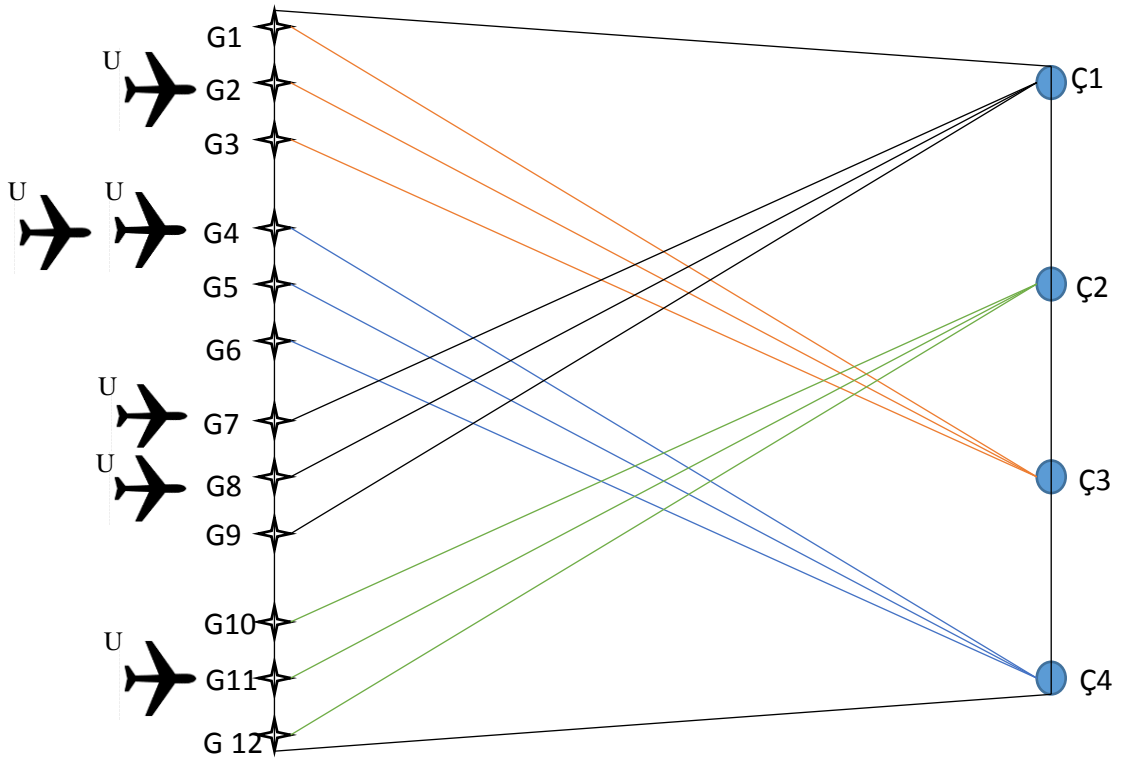
### **5.1.5. Çaprazlama**

Genetik algoritmalarda çaprazlama operatörü çok önemli bir yer tutmaktadır. Çaprazlama operatörü seçim sonrasında çaprazlamaya girecek olan kromozomların genlerinin karşılıklı değiştirilmesi sonucunda yeni bireylerin üretilmesine olanak sağlamaktadır. Bu yöntem sayesinde önceki nesillerin bazı özellikleri yeni nesillere aktarılabilir. Çaprazlama işleminin başarılı olması kromozomların probleme göre uygun bir şekilde kodlanması ile doğru orantılıdır. Bu çalışmada seçilen kromozom çiftleri arasında aynı uçağa ait genlerin karşılıklı olarak yer değiştirmesi sonucunda yeni kromozomlar üretilmektedirler. Bu işlem çok noktalı çaprazlama işlemi olarak literatürde yer almaktadır. Çaprazlama işleminde her bir gen çifti için 0 ila 1 arasında bir değer rassal olarak üretilir ve bu değer 0,5’ten büyükse genler arasında yer değiştirme işlemi gerçekleşir. Çaprazlama işlemi Şekil 5.3’ de gösterilmiştir.

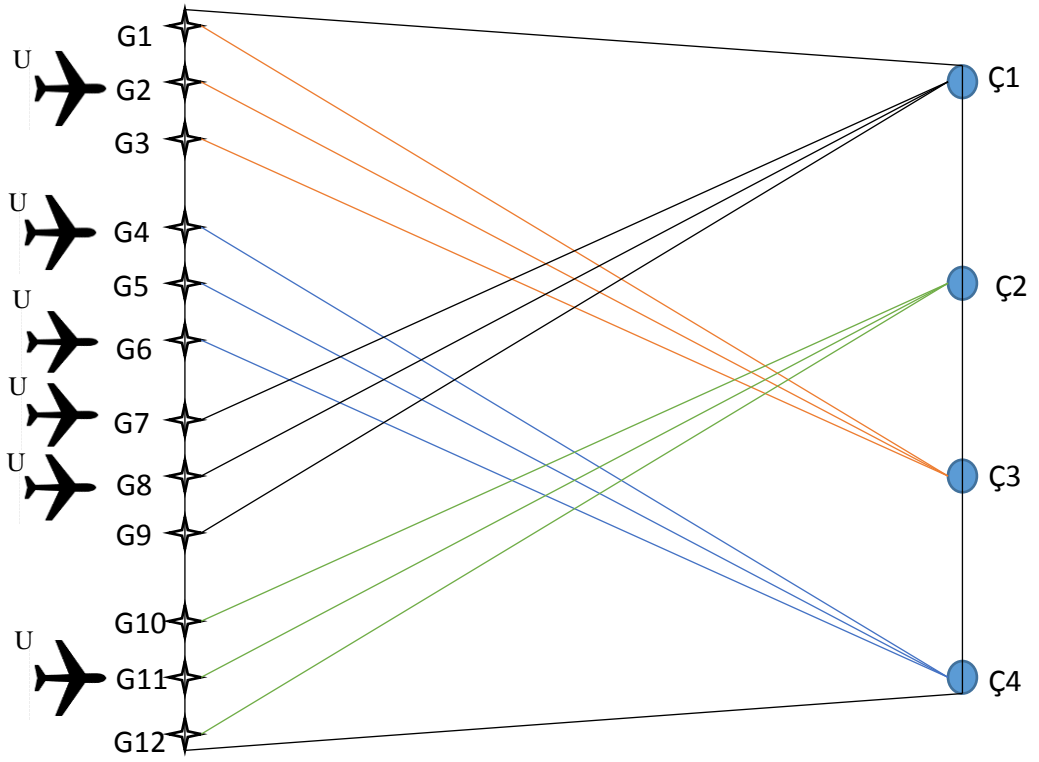
Ebeveyn1	1	2	3	4	5	6
	4	3	2	1	3	2
	11	7	4	2	8	4
Ebeveyn2	1	2	3	4	5	6
	4	3	2	1	3	2
	12	8	6	3	7	6
Üretilen rassal değer						
	0,2	0,6	0,9	0,3	0,8	0,4
Çocuk 1	1	2	3	4	5	6
	4	3	2	1	3	2
	11	8	6	2	7	4
Çocuk 2	1	2	3	4	5	6
	4	3	2	1	3	2
	12	7	4	3	8	6

**Şekil 5.3.** Çaprazlama işlemi

Şekil 5.3’de gösterilen çaprazlama işlemi sonucunda üretilen yeni kromozomlar çocuk 1 için ikinci uçağın sekizinci giriş noktasına atanmasını ve çocuk 2 için ise ikinci uçağın yedinci giriş noktasına atanmasını göstermektedir. Çaprazlama işlemleri sonucunda ebeveyn 1 ve çocuk 1 kromozomlarında belirtilen giriş noktası atanmasının hava sahasındaki yansıması Şekil 5.4 ve 5.5’de verilmiştir.



Şekil 5.4. Ebeveyn 1 giriş noktası ataması



Şekil 5.5. Çocuk 1 giriş noktası ataması

Şekil 5.4 ve 5.5’de G1’den G12’ye kadar olan isimler giriş noktalarının numaralarını, U1’den U6’ya kadar olan isimler ise uçak numaralarını ifade etmektedir. U6 değeri altıncı uçağı ve G9 değeri de dokuzuncu giriş noktasına göstermektedir.

### 5.1.6. Mutasyon

Mutasyon operatörü bir veya birden fazla gen değerinin rassal olarak değiştirilmesini ifade eder. Bu işlem sonucunda kromozomların yapısının değiştirilmesi çözüm çeşitliliğinin artırılmasına yardım eder. Ayrıca mutasyon operatörü genetik algoritmaların daha hızlı bir şekilde çözüme ulaşabilmesine imkân sağlayabilmektedir. Mutasyon işlemi sonucunda seçilen genler kendi giriş bölgesinde bulunan bir başka giriş noktası ile değiştirilerek yeni bir kromozom yapısı elde edilmektedir. Mutasyon işlemi Şekil 5.6’ da gösterilmiştir.

Kromozom 1	1	2	3	4	5	6
	4	3	2	1	3	2
	11	8	6	2	7	4
Yeni Kromozom 1	1	2	3	4	5	6
	4	3	2	1	3	2
	11	8	5	2	7	4

Şekil 5.6. Mutasyon işlemi

Şekil 5.6 ‘da gösterilen mutasyon işlemi sonucunda yeni kromozom 1 oluşmuştur. Üçüncü uçağın ikinci giriş bölgesine ait olan altıncı giriş noktasının yerine beşinci giriş noktası atanmıştır.

### 5.2. Yasaklı Arama Algoritması

Yasaklı Arama (Tabu Search-TS) algoritması Glover tarafında 1986 yılında geliştirilmiştir. TS algoritması yerel en iyilerden uzaklaşarak en iyi değeri bulan bir sezgisel yöntemdir [62]. Birçok farklı problemin çözümünde kullanılabilecek olan bu algoritma, en iyi ya da en iyiye yakın çözümler üretebilmek için esnek bir yapıya sahiptir. TS algoritmasının genel çalışma yapısı, bir başlangıç çözümü elde ettikten sonra, bu çözümü belirlenmiş dönüşüm teknikleri kullanarak en iyi çözüme ulaştırmaya çalışmaktır [62]. TS algoritmasında kullanılacak dönüşüm teknikleri değişken değerini

değiştirme, eleman eklemek ya da çıkartmak, iki çözüm arasında değerleri değiş tokuş etmek olarak sayılabilir. Bu çalışmada değişken değeri değiştirilerek komşu çözümler üretilmiştir. TS algoritmasının en iyi çözüme ulaşma performansı bu algoritmanın hafıza yapısı kullanmasından kaynaklanmaktadır.

TS algoritmasının kısa süreli hafıza yapısını kullanarak bazı çözümlerin belirli bir iterasyon sayısı boyunca üretilmesini engellemektedir. Bu engellemeler yasak olarak adlandırılır [62]. Yasakların öncelikli görevi algoritmanın yerel en iyi değerlerden kaçınarak genel en iyi değere ulaşmasını sağlamaktır. Ancak bazı durumlarda bu yasakların yıkılması gerekebilmektedir. TS algoritması öncelikle komşu çözümler üreterek bunların uyum değerlerini hesaplamaktadır. En iyi uyum değerine sahip olan komşu eğer yasak listesinde ise algoritma bu değeri daha önce bulunan en iyi değerle karşılaştırır. Eğer komşu çözüm daha iyi bir değere sahip ise artık bu çözüm yasak olarak sınıflandırılmaz. Böylelikle TS algoritması yasakları yıkarak uyum değerinin iyileşmesine yardımcı olur [62]. Algoritmada belirli bir iterasyon sayısına ulaşıldığında ilk giren ilk çıkar prensibine (First-in first-out-FIFO) göre yasak listesi güncellenir. TS algoritması kısa süreli hafıza yapısını kullanarak yavaş yavaş en iyi çözüme yaklaşmayı hedefler ve yerel en iyilerden kaçınması için belirli aralıklarla mevcut çözümden uzaklaşmaya çalışır. Bu şekilde çözüm uzayının farklı noktalarını da arayarak en iyi ya da en iyiye yakın çözümlere ulaşmaya çalışır. TS algoritması programın çalışma süreci boyunca elde ettiği en iyi çözümü uzun süreli hafızaya alır ve üretilen tüm çözümleri bu çözüm ile kıyaslar. TS algoritması adımları aşağıda detaylı bir şekilde anlatılmıştır:

1. Başlangıç çözümünü belirle ve çözümü mevcut çözüm ve en iyi çözüm olarak hafızaya al.
2. Üretilebilecek komşu çözümleri üret:
  - Yasak olmayan ya da yasak olsa bile tabu yıkma kriterlerini sağlayan bir komşu çözümü seç,
  - Mevcut çözümden yeni çözüme geçişi engellemek için yasak listesini güncelle,
  - Yeni çözüm o ana kadarki en iyi çözüm ise yeni çözümü en iyi çözüm olarak belirle.
3. Durdurma ölçütü sağlanana kadar 2. adımı tekrarla.

### 5.2.1. Başlangıç çözümünün üretilmesi

TS algoritması çözüm aramaya başlamak için öncelikle bir başlangıç çözümüne ihtiyaç duymaktadır. İyi bir başlangıç çözümünün üretilmesi başarıyı önemli ölçüde arttırmaktadır. Bu çalışmada başlangıç çözümü uçakların referans durum giriş noktalarından oluşmaktadır. Referans durum giriş noktaları Çizelge 5.2’ de verilmiştir.

**Çizelge 5.2.** Referans durum giriş noktaları

Giriş Bölgesi	Referans Durum giriş noktası
1	2
2	5
3	8
4	11

Çalışmada referans durum giriş noktaları birinci giriş bölgesi için ikinci giriş noktası, ikinci giriş bölgesi için beşinci giriş noktası, üçüncü giriş bölgesi için sekizinci giriş noktası ve dördüncü giriş noktası için on birinci giriş noktası olarak belirlenmiştir. Başlangıç çözümü için örnek gösterim Şekil 5.7’ de verilmiştir.

1	2	3	4	5	6
4	3	2	1	3	2
11	8	5	2	8	5

**Şekil 5.7.** TS algoritması için örnek başlangıç çözümü ve kodlama yapısı

TS algoritmasında kullanılan kodlama yapısı genetik algortmada kullanılan yapı ile aynıdır. Dolayısıyla ilk satır uçak numarasını, ikinci satır giriş bölgesini son satır ise giriş noktası atamasını ifade etmektedir. Şekil 5.7’ de ilk uçağın dördüncü giriş bölgesine ait on birinci giriş noktasına atandığı, beşinci uçağın ise üçüncü giriş bölgesine ait sekizinci giriş noktasına atandığı gösterilmektedir.

### 5.2.2. Komşu çözüm arama mekanizması

Komşu çözüm üretimi sayesinde mevcut çözüm üzerinden bir başka uygun çözüme geçiş yapılarak mevcut çözümlerin iyileştirilmesi hedeflenmektedir. Komşu çözümlerin üretilmesi için seçilen uçakların buldukları giriş noktaları yine kendi giriş

bölgelerine ait olan bir başka giriş noktasının rassal olarak atanması yolu ile yapılmaktadır. Öncelikle üretilmesi planlanan komşu çözüm sayısı kadar uçak rassal olarak seçilir. Şekil 5.8’ de komşu çözüm üretilmesi gösterilmiştir. Komşu çözümlerin uyum değerlerinin hesaplanması işlemi genetik algorithmda kullanılan yöntem ile aynıdır.

Mevcut Çözüm	1	2	3	4	5	6
	4	3	2	1	3	2
	11	8	5	2	8	5

Komşu Çözüm 1	1	2	3	4	5	6
	4	3	2	1	3	2
	11	7	5	2	8	5

Komşu Çözüm 2	1	2	3	4	5	6
	4	3	2	1	3	2
	11	8	5	2	8	4

**Şekil 5.8.** Komşu çözüm üretme mekanizması

Şekil 5.8’ de ikinci ve altıncı uçaklar rassal olarak seçilmiş ve mevcut çözüme ek olarak iki tane farklı komşu çözüm üretilmiştir. Üretilen ilk komşu çözümde altıncı uçağın giriş noktası değiştirilmeden ikinci uçağın giriş noktası yedi olarak değiştirilmiştir. Aynı şekilde ikinci komşu çözümde ise ikinci uçağın giriş noktası değiştirilmeden altıncı uçağın giriş noktası dört olarak değiştirilerek komşu çözüm üretimi tamamlanmıştır.

### 5.2.3. Kısa dönem hafıza

Yasak listesinin kullanım amacı belirli bir iterasyon sayısı boyunca daha önce aranan çözümlerin yasak olarak isimlendirerek çözüm uzayının farklı noktalarının araştırılmasına olanak sağlamaktır. Belirlenen iterasyon sayısı yasak listesinin uzunluğunu oluşturmaktadır. Komşu çözüm üretimi esnasında yasak listesinin bir müdahalesi bulunmamaktadır. Ancak uyum değerleri hesaplandıktan sonra yasak listesinde bulunan çözümler yasak olarak isimlendirilerek komşu çözümler arasından çıkarılır. Bu işlem kısa dönem hafıza kullanılarak yapılmaktadır [62]. Bu çalışmada hem yasak yıkma kriteri hem de kısa dönemli hafıza yapısı kullanılmıştır. Şekil 5.8’ de üretilen komşu çözümlerden en iyi uyum değerinin ikinci komşu çözümde bulunması ve yasak



listesinin uzunluğunun üç kabul edilmesi durumunda giriş noktalarının yasak listesinde nasıl tutuldukları Çizelge 5.3’de gösterilmiştir.

**Çizelge 5.3.** *Yasak listesi gösterimi*

Uçaklar	Giriş noktaları											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
6	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0

Çizelge 5.3’ de altıncı uçak için dördüncü giriş noktası üç iterasyon boyunca yasak listesinde tutulacaktır ve her bir iterasyon sonucunda değeri birer azaltılarak sıfır değerine ulaşması sonucunda altıncı uçak için dördüncü giriş noktası yasak listesinden çıkacaktır. Ayrıca listede bulunan birinci uçağın onuncu giriş noktasına atanması ve beşinci uçağın yedinci giriş noktasına atanması yasaklı durumdadır. Yasak listesinin uzunluğuna göre listede tutulan giriş noktası sayısı değişmektedir.

## 6. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde üretilen test problemleri GAMS/CPLEX çözücü, genetik algoritma ve yasaklı arama algoritmaları ile çözdürülmüştür. Tüm test problemleri için GAMS/CPLEX çözücünün çözüm süresi 900 saniye ile sınırlandırılmıştır. Küçük boyutlu test problemleri üç farklı sektör yapısı kullanılarak serbest rotalama ile oluşturulmuştur. Test problemlerinde kullanılan parametrelerin elde edilme yöntemleri detaylı bir şekilde ilerleyen alt bölümlerde açıklanmıştır. Her üç çözüm yöntemiyle test problemlerinden elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde karşılaştırılmıştır.

Modelin gerçeğe yakın olan sektör yapılarında göstereceği performansın ölçülmesi için daha karmaşık olan dördüncü bir sektör yapısı kurgulanmıştır. Bu sektör yapısında GAMS/CPLEX çözücü makul süre içerisinde çözüm üretmediği için sonuçlar sadece GA ve TS algoritması kullanılarak elde edilmiştir. Tüm testlerde 2.3 GHz Intel Core i7 işlemcili 16 GB bellek değerine sahip bir bilgisayar kullanılmıştır.

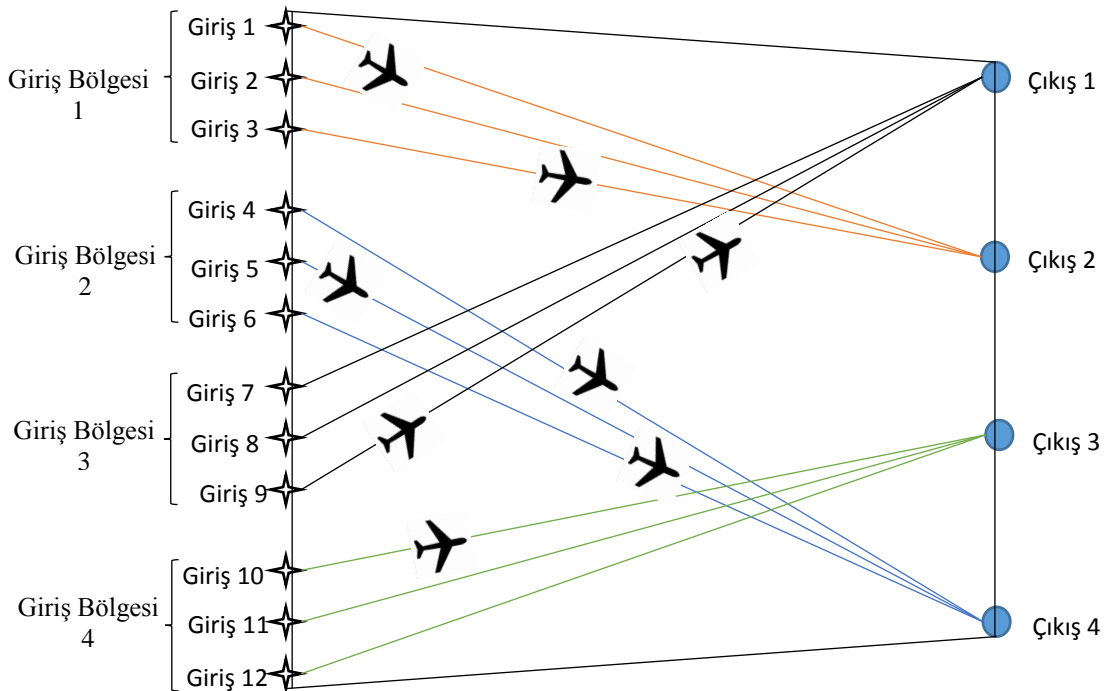
### 6.1. Test Problemlerinde Kullanılan Sektörler

Test problemleri için rota sayılarının kısıtlı olduğu sektör yapıları tercih edilmiştir. Her bir test probleminde toplam 12 rota bulunmakta ve çakışma noktası sayıları sektör I, sektör II ve sektör III için sırasıyla 27, 36 ve 45'dir. Sektörlerin alanları 180 nm<sup>2</sup>, buldukları uçuş seviyeleri FL330'dir. İlk üç sektöre ait dört giriş bölgesi, dört çıkış noktası ve on iki tane giriş noktası mevcuttur. Sektörlerin saatlik hava trafiği 20 ve 25 uçak olmak üzere belirlenmiştir. Problemlerde 3 farklı performans kategorisine ait uçaklar kullanılmıştır. Bu kategorileri temsilen bölgesel jetler, dar gövdeli uçaklar ve geniş gövdeli uçaklar çalışmada kullanılmıştır. İlk kategoride bölgesel jetleri (Regional Jet-RJ) temsilen Embraer E190 uçağı, ikinci kategoride dar gövdeli (Narrow Body-NB) uçakları temsilen Airbus A320 uçağı ve son olarak ise Geniş gövdeli (Wide Body-WB) uçak kategorisini temsilen Boeing 777-300 uçağı seçilmiştir. Uçak performans kategorileri seçilirken uçakların Avrupa hava trafiğinde bulunma oranları incelenmiştir. Embraer E190, Airbus A320 ve Boeing 777-300 uçaklarının Avrupa hava trafiğinde bulunma oranları sırasıyla %2,61, %13,91 ve %0,91'dir. Embraer E190 ve Airbus A320 uçakları kendi performans kategorilerine ait uçaklar arasında en çok kullanılan uçaklardır. Boeing 777-300 uçağı ise kendi performans kategorisine ait uçaklar arasında en çok kullanılanlardan birisidir [63]. Her bir sektör için 20 farklı test problemi üretilmiştir. Bu

problemlerin ilk on tanesinde hava trafiği saatlik 20 diğ er on tanesi ise hava trafiği saatlik 25 uçaktır. Test problemlerinin oluşturulması için uçaklara ait bazı parametreler her bir test probleminde farklılık göstermektedir. Bu değerler:

- Uçakların planlı giriş zamanları,
- Uçakların performans kategorileri,
- Uçakların giriş yapacakları bölgeleri,
- Uçakların çıkış noktaları,
- Referans durum giriş noktası bilgileridir.

Bu parametreler MATLAB ortamında üretilmiştir ve test problemlerine eklenmiştir. Uçakların planlı giriş zamanları üstel dağılım yöntemi, performans kategorileri ve giriş yapacakları bölgeler rassal olasılık dağılımlarına göre üretilmiştir. Test problemlerinin üretilmesi sırasında her bir uçağa ait performans kategorilerinin olasılık dağılımları %20 RJ, %40 NB ve %40 WB olarak belirlenmiştir. Giriş bölgelerinin üretimi sırasında her bir giriş bölgesine %25 oranında olasılık verilmiştir. Referans durum giriş noktası giriş bölgesine göre belirlenmektedir. Ayrıca uçakların test problemlerinde tek bir giriş bölgesinden sadece bir çıkış noktasına uçabilmelerinden dolayı çıkış noktaları da giriş bölgesine göre belirlenmektedir. Test problemleri için oluşturulan sektör yapıları Şekil 6.1, 6.2 ve 6.3’de verilmiştir.



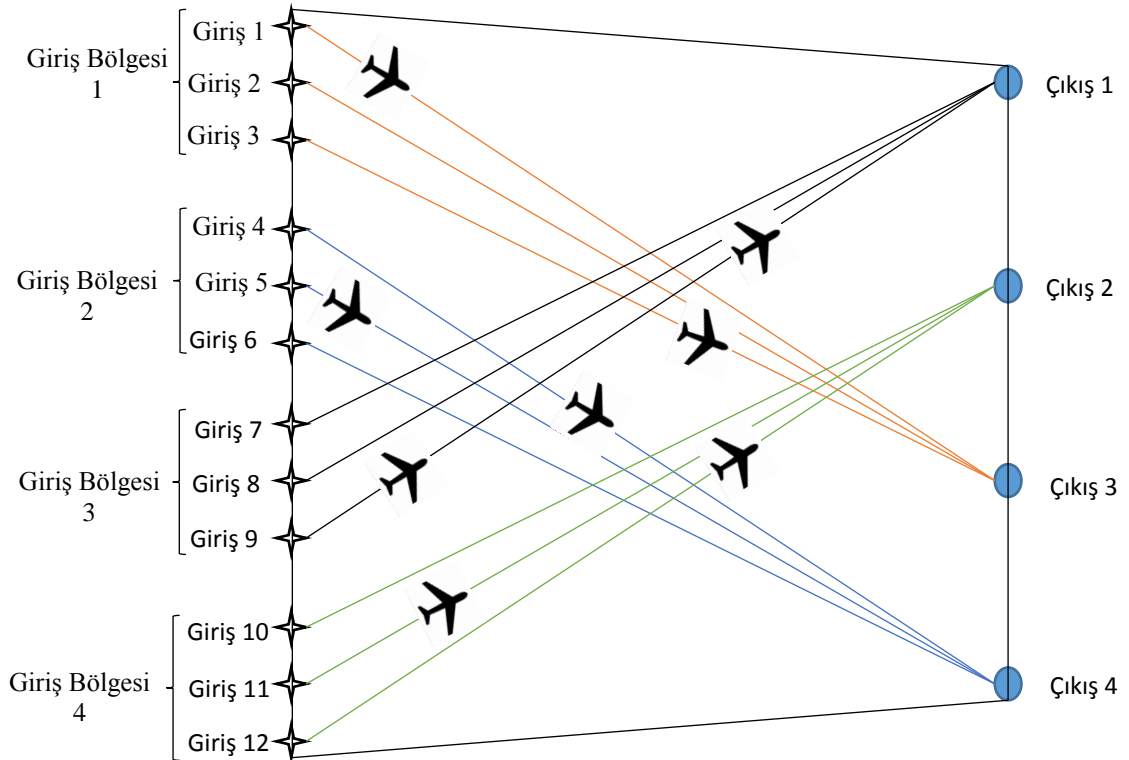
Şekil 6.1. Sektör I

Şekil 6.1’de bulunan sektör yapısına ait çakışma noktası sayısı, rotaların giriş ve çıkış noktaları ve mesafe bilgileri Çizelge 6.1’de verilmiştir.

**Çizelge 6.1. Sektör I’e ait bilgiler**

Çakışma Noktası Sayısı	Giriş Bölgesi	Giriş Noktası	Çıkış Noktası	Uzunluğu (nm)
27	1	1	2	216,3
		2		210,9
		3		205,9
	2	4	4	186,8
		5		189,7
		6		193,1
	3	7	1	193,1
		8		189,7
		9		186,8
	4	10	3	201,2
		11		205,9
		12		210,9

Sektör I’ de yirmi yedi tane çakışma noktası bulunmaktadır. Ayrıca birinci giriş bölgesine ait giriş noktalarından ikinci çıkış noktası, ikinci giriş bölgesinden dördüncü çıkış noktasına, üçüncü giriş bölgesinden birinci çıkış noktasına ve en son olarak uzanan dördüncü giriş bölgesinden üçüncü çıkış noktasına uzanan rotalar oluşturulmuştur.



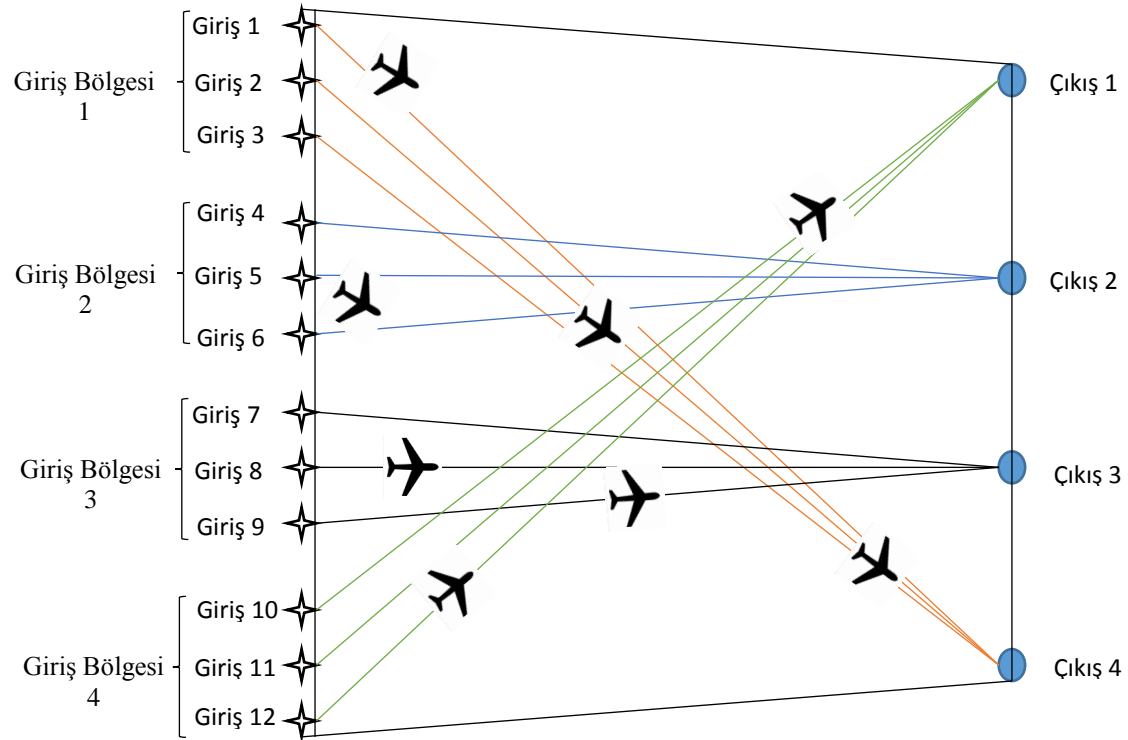
**Şekil 6.2. Sektör II**

Şekil 6.2’de bulunan sektör yapısına ait çakışma noktası sayısı, rotaların giriş ve çıkış noktaları ve mesafe bilgileri Çizelge 6.2’de verilmiştir.

**Çizelge 6.2. Sektör II’ e ait bilgiler**

Çakışma Noktası Sayısı	Giriş Bölgesi	Giriş Noktası	Çıkış Noktası	Uzunluğu (nm)
36	1	1	3	216,3
		2		210,9
		3		205,9
	2	4	4	216,3
		5		210,9
		6		205,9
	3	7	1	205,9
		8		210,9
		9		216,9
	4	10	2	201,2
		11		205,9
		12		210,9

Sektör II’ de otuz altı tane çakışma noktası bulunmaktadır. Birinci giriş bölgesine ait giriş noktalarından üçüncü çıkış noktası, ikinci giriş bölgesinden dördüncü çıkış noktasına, üçüncü giriş bölgesinden birinci çıkış noktasına ve en son olarak uzanan dördüncü giriş bölgesinden ikinci çıkış noktasına uzanan rotalar oluşturulmuştur.



**Şekil 6.3. Sektör III**

Şekil 6.3’de bulunan sektör yapısına ait çakışma noktası sayısı, rotaların giriş ve çıkış noktaları ve mesafe bilgileri Çizelge 6.3’ de verilmiştir.

**Çizelge 6.3. Sektör III’e ait bilgiler**

Çakışma Noktası Sayısı	Giriş Bölgesi	Giriş Noktası	Çıkış Noktası	Uzunluğu (nm)
45	1	1	1	247,5
		2		240,8
		3		234,3
	2	4	2	180,2
		5		180
		6		180,2
	3	7	3	181,1
		8		180,2
		9		180
	4	10	1	234,3
		11		240,8
		12		247,5

Sektör III’ de kırk beş tane çakışma noktası bulunmaktadır. Birinci giriş bölgesine ait giriş noktalarından dördüncü çıkış noktası, ikinci giriş bölgesinden ikinci çıkış noktasına, üçüncü giriş bölgesinden üçüncü çıkış noktasına ve en son olarak uzanan dördüncü giriş bölgesinden birinci çıkış noktasına uzanan rotalar oluşturulmuştur.

## **6.2. GAMS/CPLEX Çözücü İle Elde Edilen Test Problemlerinin GA ve TS İle Karşılaştırılması**

GA ve TS algoritmalarının oluşturulmasında kullanılan parametreler Çizelge 6.4’ de verilmiştir. Bu parametreler daha önceki tecrübelerle dayanılarak seçilmiştir. Her iki yöntem için iki tane durdurma kriteri vardır. İlk kriter amaç fonksiyonu değerinin sıfır olması diğer kriter ise maksimum iterasyon sayısına ulaşılmasıdır.

**Çizelge 6.4.** *Meta-sezgisel algoritmalarda kullanılan parametreler*

Genetik Algoritma		Yasaklı Arama Algoritması	
Popülasyon Büyüküğü	50	Üretilen Komşu Çözüm sayısı	20
Seçim Türü	Rulet seçimi		
Çaprazlama Oranı	0,8	Hafıza	7
Mutasyon Oranı	0,1		
İterasyon Sayısı	200	iterasyon Sayısı	500

Saatlik trafik akışının 20 uçak olduğu Sektör I, II ve III konfigürasyonları için oluşturulan test problemlerinin her üç yöntemle (GAMS/CPLEX, GA ve TS) bulunan amaç fonksiyonu değerleri Çizelge 6.5 ve 6.6’ da verilmiştir. Benzer şekilde saatlik trafik akışının 25 uçak olduğu durumdaki amaç fonksiyonu değerleri de Çizelge 6.7 ve 6.8’de sunulmuştur. Her iki saatlik akış değeri için 30 farklı test problemi koşturulmuştur. Çizelge 6.5-6.8 temel olarak üç bölümden oluşmaktadır. İlk sütunda koşturulan testlerin numaraları verilmektedir. İkinci bölümde ise her test için GAMS/CPLEX ile bulunan amaç fonksiyonu değerleri ve çözüm süreleri gösterilmektedir. Üçüncü bölümde ise meta sezgisellerin üç kez tekrarlanması sonucunda elde edilen amaç fonksiyonu değerleri, çözüm süreleri, amaç fonksiyonu ortalamaları, minimum amaç fonksiyonun değeri ve ortalama çözüm süreleri verilmiştir. Çizelge 6.5 ile 6.7’nin üçüncü bölümünde GA ait sonuçlar ve Çizelge 6.6 ile 6.8’nin son sütununda ise TS algoritmasına ait sonuçlar verilmiştir.

**Çizelge 6.5.** 20 uçak içeren test problemleri için GA ile edilen çözüm sonuçları

Test No	GAMS/CPLEX			GA							
	z	t	z <sub>1</sub>	t <sub>1</sub>	z <sub>2</sub>	t <sub>2</sub>	z <sub>3</sub>	t <sub>3</sub>	Z <sub>ort</sub>	Z <sub>min</sub>	t <sub>ort</sub>
1	<u>0</u>	111	0	0,7	0	0,7	0	0,6	0,0	<u>0</u>	0,7
2	<u>0</u>	112	0	0,6	0	0,9	0	0,6	0,0	<u>0</u>	0,7
3	<u>0</u>	109	0	4,2	0	0,9	0	1,2	0,0	<u>0</u>	2,1
4	<u>2</u>	110	2	110,1	2	108,1	2	107,5	2,0	<u>2</u>	108,6
5	<u>0</u>	113	0	4,1	5	117	0	4,6	1,7	<u>0</u>	41,9
6	<u>18</u>	114	18	120,6	18	108,4	18	108,8	18,0	<u>18</u>	112,6
7	<u>0</u>	113	0	1	0	0,7	0	1,4	0,0	<u>0</u>	1,0
8	<u>0</u>	114	0	1,1	0	0,6	0	0,6	0,0	<u>0</u>	0,8
9	<u>34</u>	113	34	125,5	34	122,6	34	124,9	34,0	<u>34</u>	124,3
10	<u>22</u>	114	30	120,5	22	123,2	22	123,7	24,7	<u>22</u>	122,5
11	<u>0</u>	144	0	3,4	0	7,2	0	0,8	0,0	<u>0</u>	3,8
12	<u>0</u>	151	0	0,7	0	0,7	0	4	0,0	<u>0</u>	1,8
13	<u>0</u>	149	0	5,9	0	0,8	0	2,5	0,0	<u>0</u>	3,1
14	<u>0</u>	150	0	0,8	0	2,4	0	0,8	0,0	<u>0</u>	1,3
15	<u>24</u>	148	24	153,8	24	149,1	30	159,5	26,0	<u>24</u>	154,1
16	<u>10</u>	148	10	146,3	10	158,3	10	142	10,0	<u>10</u>	148,9
17	<u>4</u>	149	4	132	4	131,6	12	131,8	6,7	<u>4</u>	131,8
18	<u>5</u>	150	12	155,3	5	155,4	5	149,5	7,3	<u>5</u>	153,4
19	<u>10</u>	148	10	176,8	39	180,3	21	183,4	23,3	<u>10</u>	180,2
20	<u>3</u>	152	3	147,9	3	149,8	12	147,4	6,0	<u>3</u>	148,4
21	<u>0</u>	190	0	6,1	0	13,2	0	5,7	0,0	<u>0</u>	8,3
22	<u>17</u>	187	17	221,2	17	180,2	17	174,5	17,0	<u>17</u>	192,0
23	<u>0</u>	188	0	48,1	0	1	0	26	0,0	<u>0</u>	25,0
24	<u>0</u>	191	0	1,7	0	0,9	0	0,9	0,0	<u>0</u>	1,2
25	<u>38</u>	190	38	188	38	154,2	38	155,4	38,0	<u>38</u>	165,9
26	<u>1</u>	191	1	218,9	1	170,4	1	171,6	1,0	<u>1</u>	187,0
27	<u>0</u>	189	0	1,5	0	0,8	0	0,8	0,0	<u>0</u>	1,0
28	<u>0</u>	186	0	1,5	0	0,8	0	0,8	0,0	<u>0</u>	1,0
29	<u>12</u>	190	12	217,1	12	167,5	12	167,2	12,0	<u>12</u>	183,9
30	<u>10</u>	187	10	178	10	177,1	10	169,4	10,0	<u>10</u>	174,8



**Çizelge 6.6.** 20 uçak içeren test problemleri için TS algoritması ile edilen çözüm sonuçları

Test No	GAMS/CPLEX		TS Algoritması								
	z	t	z <sub>1</sub>	t <sub>1</sub>	z <sub>2</sub>	t <sub>2</sub>	z <sub>3</sub>	t <sub>3</sub>	z <sub>ort</sub>	z <sub>min</sub>	t <sub>ort</sub>
1	<u>0</u>	111	0	2,2	0	4,1	0	2,2	0,0	<u>0</u>	2,8
2	<u>0</u>	112	0	0,2	0	0,4	0	0,3	0,0	<u>0</u>	0,3
3	<u>0</u>	109	0	1,2	0	16,6	0	0,2	0,0	<u>0</u>	6,0
4	<u>2</u>	110	2	67,1	2	68,2	2	67,8	2,0	<u>2</u>	67,7
5	<u>0</u>	113	0	9,2	0	4,7	0	41,5	0,0	<u>0</u>	18,4
6	<u>18</u>	114	18	67,6	18	67,9	18	67,1	18,0	<u>18</u>	67,5
7	<u>0</u>	113	0	1,7	0	2,5	0	8,9	0,0	<u>0</u>	4,4
8	<u>0</u>	114	0	0,3	0	0,7	0	0,2	0,0	<u>0</u>	0,4
9	<u>34</u>	113	55	72,5	55	73,8	55	73,2	55,0	55	73,2
10	<u>22</u>	114	22	78,4	22	75,0	24	74,0	22,7	<u>22</u>	75,8
11	<u>0</u>	144	0	15,6	1	100,5	0	6,4	0,3	<u>0</u>	40,8
12	<u>0</u>	151	0	1,8	0	3,5	0	3,0	0,0	<u>0</u>	2,8
13	<u>0</u>	149	0	2,8	0	3,3	0	5,8	0,0	<u>0</u>	4,0
14	<u>0</u>	150	0	0,7	0	3,1	0	3,2	0,0	<u>0</u>	2,3
15	<u>24</u>	148	24	94,6	24	96,2	24	93,4	24,0	<u>24</u>	94,7
16	<u>10</u>	148	11	88,9	10	89,1	11	88,0	10,7	<u>10</u>	88,6
17	<u>4</u>	149	4	82,1	4	82,7	4	82,3	4,0	<u>4</u>	82,4
18	<u>5</u>	150	5	95,2	5	96,3	13	95,1	7,7	<u>5</u>	95,5
19	<u>10</u>	148	10	114,6	13	113,6	17	114,0	13,3	<u>10</u>	114,1
20	<u>3</u>	152	3	95,5	3	97,8	3	99,9	3,0	<u>3</u>	97,7
21	<u>0</u>	190	0	11,4	0	7,0	0	41,7	0,0	<u>0</u>	20,1
22	<u>17</u>	187	17	111,5	17	107,8	17	108,8	17,0	<u>17</u>	109,4
23	<u>0</u>	188	0	59,6	0	21,7	4	117,1	1,3	<u>0</u>	66,2
24	<u>0</u>	191	0	3,3	0	7,9	0	2,6	0,0	<u>0</u>	4,6
25	<u>38</u>	190	38	93,6	38	89,9	38	92,9	38,0	<u>38</u>	92,2
26	<u>1</u>	191	1	108,1	1	108,9	1	109,0	1,0	<u>1</u>	108,6
27	<u>0</u>	189	0	1,0	0	1,0	0	1,1	0,0	<u>0</u>	1,0
28	<u>0</u>	186	0	0,4	0	1,6	0	2,3	0,0	<u>0</u>	1,4
29	<u>12</u>	190	12	103,9	12	104,0	12	103,1	12,0	<u>12</u>	103,7
30	<u>10</u>	187	10	103,6	10	102,6	10	102,2	10,0	<u>10</u>	102,8

**Çizelge 6.7.** 25 uçak içeren test problemleri için GA ile edilen çözüm sonuçları

Test No	GAMS/CPLEX		GA								
	z	t	z <sub>1</sub>	t <sub>1</sub>	z <sub>2</sub>	t <sub>2</sub>	z <sub>3</sub>	t <sub>3</sub>	Z <sub>ort</sub>	Z <sub>min</sub>	t <sub>ort</sub>
1	<u>21</u>	178	21	176,5	21	173,8	21	176,5	21,0	<u>21</u>	175,6
2	<u>21</u>	179	21	207,8	21	206,1	21	206,1	21,0	<u>21</u>	206,7
3	<u>0</u>	182	0	0,9	0	0,9	0	0,9	0,0	<u>0</u>	0,9
4	<u>14</u>	183	14	177,9	14	178,4	14	179,5	14,0	<u>14</u>	178,6
5	<u>0</u>	181	0	1,7	0	0,9	0	1,7	0,0	<u>0</u>	1,4
6	<u>0</u>	182	0	0,9	0	0,9	0	0,9	0,0	<u>0</u>	0,9
7	<u>14</u>	182	14	186,2	14	188,8	14	184,7	14,0	<u>14</u>	186,6
8	<u>15</u>	180	15	175,8	15	176,5	15	177,5	15,0	<u>15</u>	176,6
9	<u>0</u>	181	0	0,9	0	0,9	0	0,9	0,0	<u>0</u>	0,9
10	<u>0</u>	179	0	1,7	0	11,1	0	10,2	0,0	<u>0</u>	7,7
11	<u>65</u>	236	65	246,2	65	246,5	65	280,8	65,0	<u>65</u>	257,8
12	<u>31</u>	237	47	278,5	31	262,8	31	368,3	36,3	<u>31</u>	303,2
13	<u>0</u>	238	0	25,2	0	22,1	0	45,1	0,0	<u>0</u>	30,8
14	<u>0</u>	234	0	9,0	0	9,8	0	12,3	0,0	<u>0</u>	10,3
15	<u>3</u>	235	3	210,2	3	212,3	3	236,8	3,0	<u>3</u>	219,8
16	<u>8</u>	234	8	242,0	8	246,8	8	289,3	8,0	<u>8</u>	259,4
17	<u>0</u>	234	0	4,4	0	3,4	0	2,2	0,0	<u>0</u>	3,3
18	<u>9</u>	238	9	264,8	12	277,7	44	311,8	21,7	<u>9</u>	284,8
19	<u>0</u>	237	0	21,9	0	1,1	0	2,8	0,0	<u>0</u>	8,6
20	<u>0</u>	236	0	1,7	0	11,1	0	10,2	0,0	<u>0</u>	7,7
21	<u>0</u>	291	0	5,9	0	3,2	0	8,8	0,0	<u>0</u>	6,0
22	<u>18</u>	291	18	326,9	18	326,0	25	337,7	20,3	<u>18</u>	330,2
23	<u>13</u>	291	13	356,0	13	358,8	13	313,1	13,0	<u>13</u>	342,6
24	<u>0</u>	292	67	321,2	89	361,5	67	326,4	74,3	67	336,4
25	<u>0</u>	293	18	346,1	0	36,8	4	346,9	7,3	<u>0</u>	243,2
26	<u>44</u>	293	44	273,7	44	298,7	44	272,1	44,0	<u>44</u>	281,5
27	<u>18</u>	290	18	254,2	18	261,2	18	260,4	18,0	<u>18</u>	258,6
28	<u>0</u>	292	0	20,3	0	7,2	0	24,6	0,0	<u>0</u>	17,4
29	<u>0</u>	292	0	4,2	0	7,9	0	8,1	0,0	<u>0</u>	6,7
30	<u>0</u>	290	29	341,3	0	24,2	0	71,8	9,7	<u>0</u>	145,8

**Çizelge 6.8.** 25 uçak içeren test problemleri için TS algoritması ile edilen çözüm sonuçları

Test No	GAMS/CPLEX		TS Algoritması								
	z	t	z <sub>1</sub>	t <sub>1</sub>	z <sub>2</sub>	t <sub>2</sub>	z <sub>3</sub>	t <sub>3</sub>	Z <sub>ort</sub>	Z <sub>min</sub>	t <sub>ort</sub>
1	<u>21</u>	178	21	113,8	21	119,9	21	117,7	21,0	<u>21</u>	117,1
2	<u>21</u>	179	21	136,4	21	153,9	21	144,4	21,0	<u>21</u>	144,9
3	<u>0</u>	182	0	11,4	0	4,4	0	3,6	0,0	<u>0</u>	6,5
4	<u>14</u>	183	19	115,9	30	139,8	17	121,0	22,0	17	125,6
5	<u>0</u>	181	0	0,8	0	2,1	0	6,2	0,0	<u>0</u>	3,0
6	<u>0</u>	182	0	3,6	0	3,1	0	2,6	0,0	<u>0</u>	3,1
7	<u>14</u>	182	14	116,2	14	126,7	14	126,4	14,0	<u>14</u>	123,1
8	<u>15</u>	180	15	112,5	15	120,6	15	117,4	15,0	<u>15</u>	116,8
9	<u>0</u>	181	0	2,0	0	4,0	0	0,5	0,0	<u>0</u>	2,2
10	<u>0</u>	179	0	5,3	0	7,4	0	5,3	0,0	<u>0</u>	6,0
11	<u>65</u>	236	65	213,7	69	232,0	67	222,1	67,0	<u>65</u>	222,6
12	<u>31</u>	237	42	228,6	34	241,0	60	246,7	45,3	34	238,8
13	<u>0</u>	238	0	212,6	17	235,9	0	195,1	5,7	<u>0</u>	214,6
14	<u>0</u>	234	0	30,2	0	60,1	0	27,9	0,0	<u>0</u>	39,4
15	<u>3</u>	235	3	179,1	9	178,2	3	179,9	5,0	<u>3</u>	179,1
16	<u>8</u>	234	29	224,5	8	216,0	14	221,6	17,0	<u>8</u>	220,7
17	<u>0</u>	234	0	9,7	0	16,9	0	12,1	0,0	<u>0</u>	12,9
18	<u>9</u>	238	12	219,5	33	220,5	12	212,6	19,0	12	217,6
19	<u>0</u>	237	0	6,6	0	43,1	0	4,3	0,0	<u>0</u>	18,0
20	<u>0</u>	236	0	1,7	0	11,1	0	10,2	0,0	<u>0</u>	7,7
21	<u>0</u>	291	0	26,6	0	33,5	0	1,2	0,0	<u>0</u>	20,5
22	<u>18</u>	291	18	201,0	18	201,1	18	199,1	18,0	<u>18</u>	200,4
23	<u>13</u>	291	13	213,1	13	211,2	13	212,4	13,0	<u>13</u>	212,2
24	<u>0</u>	292	98	222,9	82	225,8	67	213,2	82,3	67	220,7
25	<u>0</u>	293	5	199,6	26	198,2	38	203,3	23,0	5	200,4
26	<u>44</u>	293	44	170,1	44	175,5	44	176,1	44,0	<u>44</u>	173,9
27	<u>18</u>	290	18	182,4	18	163,6	18	166,9	18,0	<u>18</u>	171,0
28	<u>0</u>	292	0	71,9	0	76,4	0	63,1	0,0	<u>0</u>	70,5
29	<u>0</u>	292	0	4,9	0	11,3	0	39,3	0,0	<u>0</u>	18,5
30	<u>0</u>	290	9	193,8	0	12,8	0	116,6	3,0	<u>0</u>	107,7

Test problemlerinde GAMS/CPLEX çözücü ile meta sezgisel algoritmaların aynı amaç fonksiyonunu verdiği değerler altı çizili ve kalın olarak gösterilmiştir. Saatlik hava trafiğinin 20 uçak olduğu test problemleri incelediği zaman GAMS/CPLEX çözücü tarafından hesaplanan amaç fonksiyonu değerleri ile genetik algoritmanın elde ettiği amaç fonksiyonu değerlerinin bütün test problemlerinde aynı olduğu görülmüştür. Yasaklı arama algoritmasınının 30 test probleminden 29 tanesinde en iyi değeri bulduğu sadece 1 tanesinde en iyi sonuçtan 21 saniye uzak olduğu görülmektedir.

Saatlik hava trafiğinin 25 uçak olduğu test problemlerinde ise GAMS/CPLEX çözücü tarafından hesaplanan amaç fonksiyonu değerleri ile genetik algoritmanın elde ettiği amaç fonksiyonu değerlerinin 29 tanesinin aynı olduğu sadece yirmi dördüncü test probleminde farklılık bulunduğu görülmüştür. Yasaklı arama algoritması ile elde edilen sonuçlarda ise 30 test probleminin 25 tanesinde en iyi değerin bulunduğu sadece 5 tanesinde en iyi değerden uzak olduğu görülmüştür. En iyi amaç fonksiyonu değerinin elde edilemediği 4, 12 ve 18. test problemlerinde oluşan fark 3 saniye, yirmi beşinci test probleminde oluşan fark 5 saniyedir. Yirmi dördüncü test probleminde ise hem yasaklı arama hem de genetik algoritmalar aynı değere sahip olup en iyi amaç fonksiyonu değerine yaklaşamamışlardır.

Test problemlerinde çakışma noktası sayısının ve uçak sayısının artması problemlerin GAMS/CPLEX çözücünün çözüm süresi arttırmaktadır. Bu durum hava sahasındaki rota sayının fazla olduğu sektör yapılarında programın çok uzun çözüm sürelerine ihtiyaç duyacağını göstermektedir.

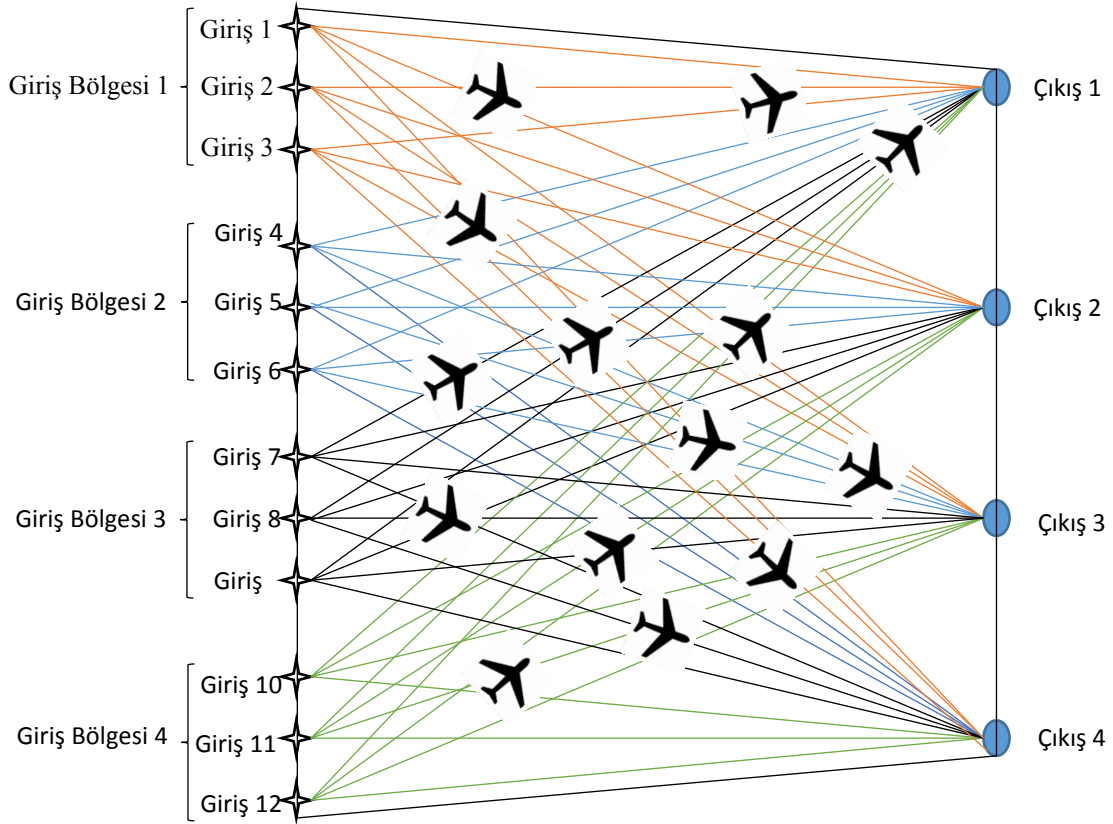
### **6.3. Jenerik Sektör Yapısının Sonuçları**

Bu bölümde jenerik sektör yapısında çakışmadan kaynaklı gecikmeler, gecikmelerden kaynaklı ekstra yakıt sarfiyatları ve geciken uçak sayıları incelenmiştir.

#### **6.3.1. Çakışmadan kaynaklı gecikmelerin hesaplanması**

Jenerik sektör yapısında uçakların giriş yaptıkları herhangi bir giriş noktasından istedikleri bir çıkış noktasına gidebilecekleri bütün rotalar tanımlanmıştır. Bu bölümde test problemlerinde olduğu gibi saatlik hava trafik akış oranı 20 ve 25 olmak üzere belirlenmiştir. Her bir uçak sayısı için 30 farklı senaryo MATLAB ortamında üretilmiştir. Bu senaryolar test problemlerinde kullanılan aynı yöntemler ile elde edilmiştir. Buna

karşın her bir uçak için çıkış noktası rassal olasılık dağılımına göre belirlenmiştir ve her bir çıkış noktasının seçilme olasılığı %25'tir.



Şekil 6.4. Jenerik sektör

Bu sektör yapısı Şekil 6.4'te ve hakkındaki bilgiler ise Çizelge 6.9' da verilmiştir. Jenerik sektör yapısı için referans durum (RD) gecikmeleri ve hesaplama süreleri MATLAB ortamında ilk gelene ilk hizmet (First Come First Serve -FCFS) yaklaşımının kullanılması sonucunda elde edilmiştir.

**Çizelge 6.9.** Jenerik yol hava sahası sektörünün rota uzunluk bilgileri

Giriş Noktası	Rota Uzunlukları (nm)			
	Çıkış Noktası 1	Çıkış Noktası 2	Çıkış Noktası 3	Çıkış Noktası 4
1	180,00	189,74	216,33	247,59
2	180,28	186,82	210,95	240,83
3	181,11	184,39	205,91	234,31
4	186,82	180,28	193,13	216,33
5	189,74	180,00	189,74	210,95
6	193,13	180,28	186,82	205,91
7	205,91	184,39	181,11	193,13
8	210,95	186,82	180,28	189,74
9	216,33	189,74	180,00	186,82
10	234,31	201,25	182,48	181,11
11	240,83	205,91	184,39	180,28
12	247,59	210,95	186,82	180,00

Saatlik hava trafiğinin 20 uçak olduğu senaryoların sonuçları Çizelge 6.10 ve 6.11, saatlik hava trafiğinin 25 uçak olduğu senaryoların sonuçları ise Çizelge 6.12 ve 6.13’de verilmiştir. Her bir çizelge üç bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm ilk sütundan oluşmakta ve senaryo numarasını ifade etmektedir. İkinci bölüm ikinci ve üçüncü sütunlardan oluşarak sırasıyla referans durum amaç fonksiyonu ve çözüm süresini göstermektedir. Üçüncü bölüm geriye kalan sütunlardan oluşmakta ve meta sezgisellerin üç kez tekrarlanması sonucunda elde edilen amaç fonksiyonu ve çözüm süreleri, amaç fonksiyonu ortalamaları, minimum amaç fonksiyonu değeri ve ortalama çözüm süreleri verilmiştir.

**Çizelge 6.10.** 20 uçak içeren jenerik sektör için GA ile edilen çözüm sonuçları.

Test No	MATLAB (RD)		GA								
	z	t	z <sub>1</sub>	t <sub>1</sub>	z <sub>2</sub>	t <sub>2</sub>	z <sub>3</sub>	t <sub>3</sub>	Z <sub>ort</sub>	Z <sub>min</sub>	t <sub>ort</sub>
1	94	4,2	0	12,4	0	20,5	0	11,1	0,0	0	14,7
2	284	4,5	3	171,7	3	179,4	3	170,3	3,0	3	173,8
3	271	4,9	1	175,5	1	175,2	1	169,9	1,0	1	173,5
4	86	4,6	0	4,7	0	4,4	0	4,3	0,0	0	4,4
5	36	4,3	0	17,1	0	9,4	0	6,2	0,0	0	10,9
6	0	4,4	0	4,2	0	4,3	0	4,3	0,0	0	4,3
7	29	4,1	0	4,7	0	4,5	0	4,4	0,0	0	4,5
8	352	4,1	36	155,6	36	163,3	36	156,1	36,0	36	158,3
9	41	4,7	0	6,1	0	5,4	0	6,1	0,0	0	5,9
10	59	4,7	0	4,4	0	4,5	0	4,3	0,0	0	4,4
11	39	4,8	0	4,5	0	4,5	0	4,3	0,0	0	4,4
12	65	4,0	14	176,5	14	176,0	14	162,2	14,0	14	171,5
13	291	4,1	32	171,0	32	176,2	32	169,4	32,0	32	172,2
14	265	4,5	21	163,5	21	162,9	21	157,8	21,0	21	161,4
15	312	4,4	2	174,5	2	179,9	2	173,3	2,0	2	175,9
16	46	4,1	0	10,1	0	5,9	0	4,5	0,0	0	6,9
17	81	4,6	0	4,4	0	4,4	0	4,4	0,0	0	4,4
18	301	4,8	20	147,7	20	152,5	20	144,8	20,0	20	148,3
19	61	4,6	18	147,5	18	152,6	18	146,9	18,0	18	149,0
20	0	4,0	0	4,8	0	4,8	0	4,2	0,0	0	4,6
21	230	4,1	35	162,0	35	220,6	35	160,3	35,0	35	181,0
22	61	4,7	0	4,9	0	8,0	0	4,3	0,0	0	5,7
23	5	4,6	0	4,9	0	7,6	0	4,4	0,0	0	5,6
24	26	4,4	0	4,9	0	7,8	0	4,8	0,0	0	5,8
25	289	4,5	40	153,7	38	209,9	40	151,6	39,3	38	171,7
26	49	4,6	5	169,3	5	204,0	5	169,5	5,0	5	180,9
27	141	4,4	20	167,8	20	172,8	20	165,5	20,0	20	168,7
28	113	4,4	4	138,5	4	136,4	4	137,4	4,0	4	137,5
29	189	4,7	2	160,2	2	156,2	2	157,4	2,0	2	157,9
30	0	4,3	0	4,8	0	4,0	0	4,8	0,0	0	4,5

**Çizelge 6.11.** 20 uçak içeren jenerik sektör için TS algoritması ile edilen çözüm sonuçları

Test No	MATLAB (RD)		TS algoritması								
	z	t	z <sub>1</sub>	t <sub>1</sub>	z <sub>2</sub>	t <sub>2</sub>	z <sub>3</sub>	t <sub>3</sub>	Z <sub>ort</sub>	z <sub>min</sub>	t <sub>ort</sub>
1	94	4,2	0	20,7	0	24,8	0	20,5	0,0	0	22,0
2	284	4,5	3	174,2	3	171,0	3	169,8	3,0	3	171,6
3	271	4,9	1	162,0	1	153,4	1	155,7	1,0	1	157,0
4	86	4,6	0	8,6	0	40,4	0	16,3	0,0	0	21,8
5	36	4,3	0	18,8	0	16,5	0	21,9	0,0	0	19,1
6	0	4,4	0	0,5	0	0,5	0	0,5	0,0	0	0,5
7	29	4,1	0	5,4	0	2,0	0	7,7	0,0	0	5,1
8	352	4,1	36	165,0	36	162,5	36	163,1	36,0	36	163,5
9	41	4,7	0	3,3	0	8,1	0	3,9	0,0	0	5,1
10	59	4,7	0	12,5	0	12,4	0	7,2	0,0	0	10,7
11	39	4,8	0	12,1	0	2,1	0	2,6	0,0	0	5,6
12	65	4,0	14	161,1	14	159,5	26	157,6	18,0	14	159,4
13	291	4,1	32	179,6	32	174,2	32	171,4	32,0	32	175,0
14	265	4,5	24	165,6	22	166,6	22	166,9	22,7	22	166,4
15	312	4,4	3	167,7	2	171,4	2	172,1	2,3	2	170,4
16	46	4,1	0	11,4	0	10,9	0	11,4	0,0	0	11,2
17	81	4,6	0	4,6	0	3,0	0	3,6	0,0	0	3,7
18	301	4,8	20	139,7	20	143,5	20	140,6	20,0	20	141,3
19	61	4,6	18	151,5	18	149,1	18	148,4	18,0	18	149,7
20	0	4,0	0	0,5	0	0,5	0	0,5	0,0	0	0,5
21	230	4,1	44	169,1	35	164,4	35	159,6	38,0	35	164,3
22	61	4,7	0	3,9	0	7,6	0	8,8	0,0	0	6,8
23	5	4,6	0	5,7	0	4,1	0	4,1	0,0	0	4,6
24	26	4,4	0	1,5	0	3,6	0	1,5	0,0	0	2,2
25	289	4,5	43	152,9	46	148,2	44	146,3	44,3	43	149,1
26	49	4,6	5	158,2	5	154,3	5	154,5	5,0	5	155,7
27	141	4,4	20	164,0	20	161,7	20	160,6	20,0	20	162,1
28	113	4,4	4	130,9	4	130,1	4	130,1	4,0	4	130,4
29	189	4,7	2	162,3	2	159,7	2	160,7	2,0	2	160,9
30	0	4,3	0	0,5	0	0,5	0	0,5	0,0	0	0,5



**Çizelge 6.12.** 25 uçak içeren jenerik sektör için GA ile edilen çözüm sonuçları

Test No	MATLAB (RD)		GA								
	z	t	z <sub>1</sub>	t <sub>1</sub>	z <sub>2</sub>	t <sub>2</sub>	z <sub>3</sub>	t <sub>3</sub>	Z <sub>ort</sub>	z <sub>min</sub>	t <sub>ort</sub>
1	242	0,6	26	249,1	26	250,5	26	257,6	26,0	26	252,4
2	195	5,6	17	234,5	17	231,9	17	228,5	17,0	17	231,6
3	13	5,2	0	5,9	0	5,5	0	5,7	0,0	0	5,7
4	412	5,0	65	327,1	61	323,4	76	327,2	67,3	61	325,9
5	18	5,0	0	5,6	0	5,0	0	4,8	0,0	0	5,1
6	91	5,6	27	247,1	27	269,3	27	247,8	27,0	27	254,7
7	305	5,0	21	248,3	21	242,0	21	244,5	21,0	21	244,9
8	247	5,4	67	290,7	36	277,4	28	282,6	43,7	28	283,6
9	122	5,2	11	230,3	11	228,4	11	226,2	11,0	11	228,3
10	7	0,6	0	6,0	0	5,6	0	5,2	0,0	0	5,6
11	162	5,4	0	6,4	0	14,2	0	5,5	0,0	0	8,7
12	180	5,8	23	279,9	38	277,6	35	272,3	32,0	23	276,6
13	110	0,6	25	234,8	25	234,1	26	241,9	25,3	25	236,9
14	512	5,1	121	374,6	156	366,7	166	376,1	147,7	121	372,4
15	206	5,7	43	316,2	34	314,5	34	319,4	37,0	34	316,7
16	221	6,0	23	246,3	23	239,5	23	235,9	23,0	23	240,6
17	319	5,6	62	308,0	83	297,0	78	299,5	74,3	62	301,5
18	83	5,5	0	6,2	0	5,3	0	7,3	0,0	0	6,3
19	266	5,9	27	334,7	27	321,4	27	325,7	27,0	27	327,3
20	419	5,4	0	27,8	0	38,4	0	34,9	0,0	0	33,7
21	119	5,6	0	5,6	0	12,7	0	5,2	0,0	0	7,9
22	143	6,0	25	222,6	25	218,5	25	216,3	25,0	25	219,1
23	32	5,9	0	6,0	0	13,3	0	18,1	0,0	0	12,5
24	194	5,4	0	16,6	0	13,2	0	5,5	0,0	0	11,8
25	94	5,0	12	256,2	16	255,5	12	263,5	13,3	12	258,4
26	146	5,8	0	8,1	0	5,2	0	5,3	0,0	0	6,2
27	498	5,8	50	339,6	48	332,1	50	334,0	49,3	48	335,2
28	278	5,1	50	287,6	50	285,0	50	290,8	50,0	50	287,8
29	3	5,1	0	6,5	0	5,5	0	5,7	0,0	0	5,9
30	157	5,1	0	10,0	0	26,5	0	20,4	0,0	0	19,0

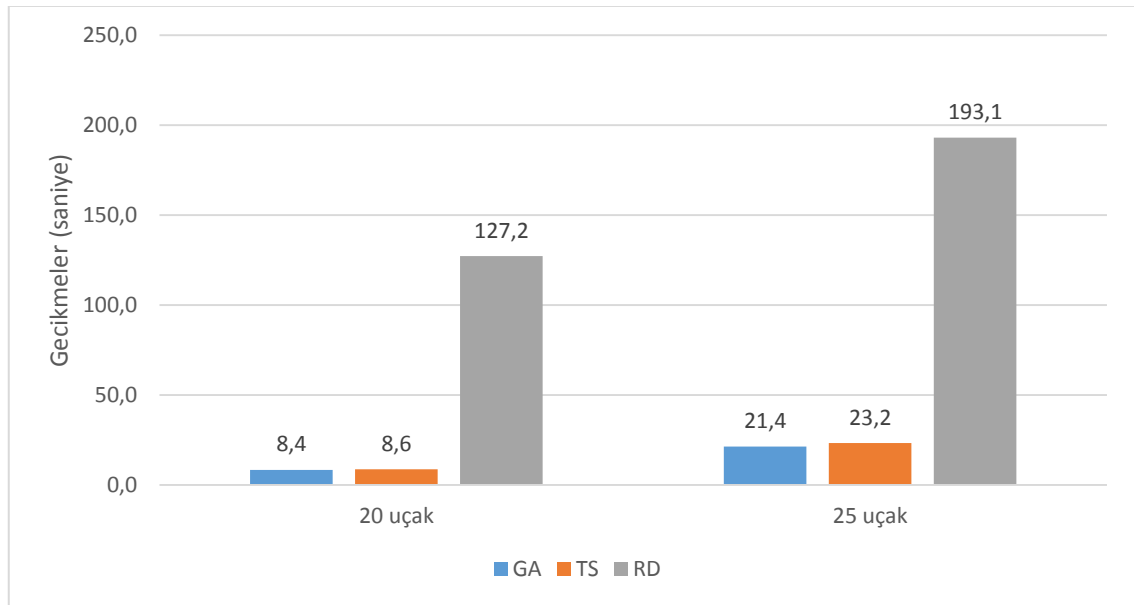
**Çizelge 6.13.** 25 uçak içeren jenerik sektör için TS algoritması ile edilen çözüm sonuçları

Test No	MATLAB (RD)		TS Algoritması								
	z	t	z <sub>1</sub>	t <sub>1</sub>	z <sub>2</sub>	t <sub>2</sub>	z <sub>3</sub>	t <sub>3</sub>	Z <sub>ort</sub>	Z <sub>min</sub>	t <sub>ort</sub>
1	242	0,6	27	256,1	26	254,4	26	253,2	26,3	26	254,6
2	195	5,6	17	241,8	17	250,2	17	245,9	17,0	17	246,0
3	13	5,2	0	6,6	0	3,2	0	2,4	0,0	0	4,1
4	412	5,0	84	337,6	102	336,5	103	338,1	96,3	84	337,4
5	18	5,0	0	3,2	0	7,3	0	6,4	0,0	0	5,6
6	91	5,6	29	259,4	33	262,1	27	254,8	29,7	27	258,8
7	305	5,0	24	256,2	28	252,1	21	247,5	24,3	21	251,9
8	247	5,4	42	280,8	40	282,1	28	278,1	36,7	28	280,4
9	122	5,2	13	218,2	41	233,0	11	219,6	21,7	11	223,6
10	7	0,6	0	2,0	0	3,9	0	3,9	0,0	0	3,3
11	162	5,4	0	54,1	0	61,2	0	35,0	0,0	0	50,1
12	180	5,8	23	279,1	33	275,3	50	268,4	35,3	23	274,3
13	110	0,6	25	222,6	25	225,4	25	223,9	25,0	25	224,0
14	512	5,1	199	346,2	129	358,0	155	337,9	161,0	129	347,4
15	206	5,7	43	319,5	34	310,0	55	314,9	44,0	34	314,8
16	221	6,0	27	255,6	25	253,6	23	248,6	25,0	23	252,6
17	319	5,6	84	311,5	78	294,7	70	310,3	77,3	70	305,5
18	83	5,5	0	38,5	0	52,8	0	36,9	0,0	0	42,8
19	266	5,9	39	329,0	38	325,1	33	323,0	36,7	33	325,7
20	419	5,4	10	267,1	6	268,3	19	268,4	11,7	6	267,9
21	119	5,6	0	178,7	0	17,0	0	26,2	0,0	0	74,0
22	143	6,0	25	208,7	25	204,8	25	223,2	25,0	25	212,2
23	32	5,9	0	32,2	0	15,4	0	4,8	0,0	0	17,4
24	194	5,4	0	18,4	0	36,2	0	24,5	0,0	0	26,4
25	94	5,0	26	257,6	29	254,6	14	263,8	23,0	14	258,7
26	146	5,8	0	11,6	0	18,9	0	15,5	0,0	0	15,3
27	498	5,8	88	310,9	87	304,3	50	307,6	75,0	50	307,6
28	278	5,1	50	276,8	50	274,1	50	265,4	50,0	50	272,1
29	3	5,1	0	4,3	0	2,5	0	1,7	0,0	0	2,8
30	157	5,1	0	16,5	0	48,5	0	41,1	0,0	0	35,4

Jenerik hava sahalarında çakışmadan kaynaklanan toplam gecikme GA ve TS algoritması kullanılarak en küçüklenmeye çalışılmıştır. Saatlik 20 uçağın olduğu senaryolar incelendiği zaman 3 senaryoda herhangi bir çakışmanın bulunmadığı referans durum hesaplamalarında elde edilmiştir. GA ve TS algoritmasının 25 senaryoda aynı amaç fonksiyonu değerini bulduğu geriye kalan 2 senaryoda ise GA'nın en fazla 5 saniye farkla TS algoritmasına göre daha iyi performans gösterdiği görülmüştür.

Saatlik 25 uçağın olduğu senaryolar incelendiği zaman GA ve TS algoritmasının 23 senaryoda aynı amaç fonksiyonu değerini bulduğu görülmüştür. Diğer senaryolarda ise GA algoritmasının biraz daha başarılı olduğu görülmüştür. İki algoritmanın farklı bulduğu amaç fonksiyonu değerlerinden altı tanesinde fark on saniyeden fazla değildir fakat dördüncü senaryoda fark 23 saniyedir.

Her iki farklı hava trafik sayısına göre elde edilen ortalama gecikme sürelerinin referans durum ile karşılaştırılması Şekil 6.5' de verilmiştir.



Şekil 6.5. Çakışmadan kaynaklı ortalama gecikme süreleri

Şekil 6.5'te 20 uçak için referans durum ortalama gecikme süresinin 127,2 saniyeden GA için 8,4 saniyeye TS için 8,6 saniyeye indiği görülmüştür. GA ve TS için iyileşme yüzdeleri sırasıyla %93,4 ve %93,3 'tür. 25 uçak için referans durum ortalama gecikme süresinin 193,1 saniyeden GA için 21,4 saniyeye TS için 23,2 saniyeye indiği görülmüştür. GA ve TS için iyileşme yüzdeleri sırasıyla %88,9 ve %88'dir. Her iki algoritma da başarılı sonuçlar vermiştir.

### 6.3.2. Çakışmadan kaynaklı yakıt sarfiyatlarının hesaplanması

Bu bölümde saatlik 20 ve 25 hava trafiği için GA ve TS'nin bulunduğu çakışmadan kaynaklı gecikme sürelerine uygun ekstra yakıt sarfiyatları ile referans durumda meydana gelen yakıt sarfiyatları hep birlikte Çizelge 6.14 ve 6.15' te verilmiştir. Çizelgelerin ilk sütunu senaryo numarasını, ikinci, üçüncü ve dördüncü sütunları sırasıyla GA, TS algoritması ve referans durum (RD) gecikmelerinin neden olduğu ekstra yakıt sarfiyatlarını göstermektedir.

**Çizelge 6.14.** 20 uçak için gecikmeden kaynaklı ekstra yakıt sarfiyatları(kg)

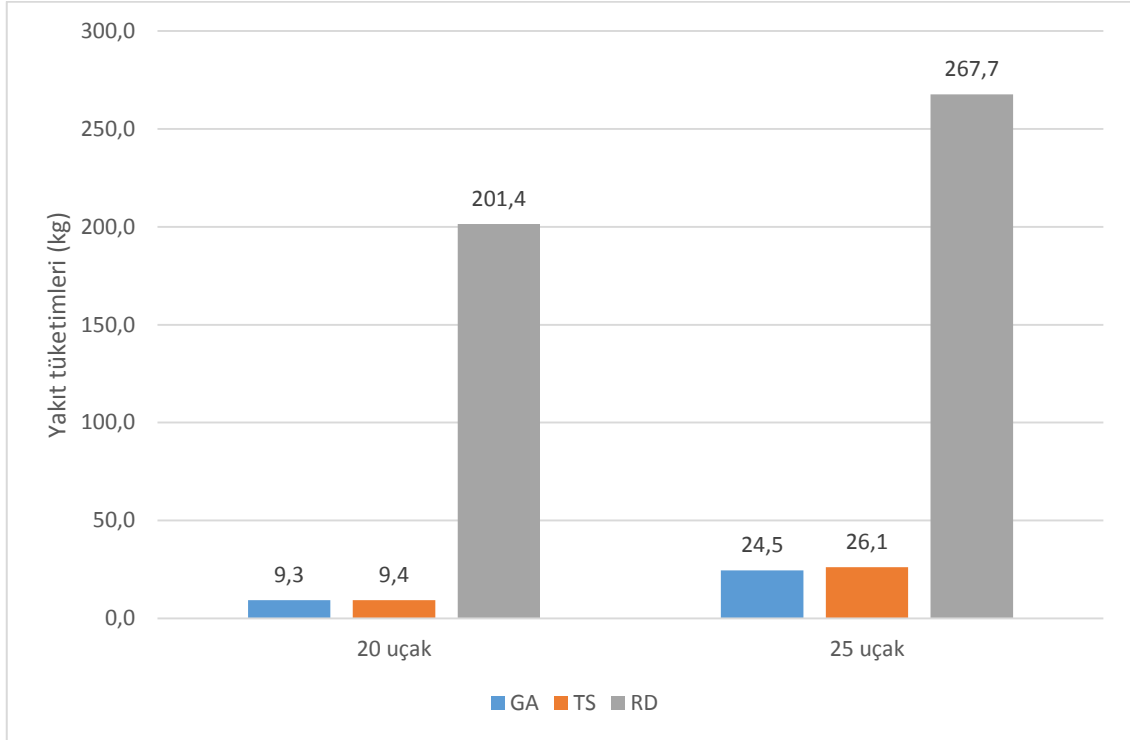
Senaryo No	GA	TS	RD
1	0,0	0,0	182,28
2	1,9	1,9	638,64
3	0,6	0,6	170,69
4	0,0	0,0	53,12
5	0,0	0,0	16,78
6	0,0	0,0	0
7	0,0	0,0	18,3
8	83,6	83,6	403,88
9	0,0	0,0	95,19
10	0,0	0,0	64,43
11	0,0	0,0	90,57
12	20,9	20,9	103,62
13	20,1	20,1	473,5
14	15,2	15,3	498,86
15	7,1	7,1	568,93
16	0,0	0,0	106,74
17	0,0	0,0	50,96
18	12,6	12,6	618,74
19	8,3	8,3	39,42
20	0,0	0,0	0
21	25,2	25,2	444,4
22	0,0	0,0	141,64
23	0,0	0,0	11,76
24	0,0	0,0	60,5
25	47,9	49,3	276,37
26	12,5	12,5	66,59
27	9,3	9,3	146,51
28	9,4	9,4	261,83
29	4,7	4,7	437,79
30	0,0	0,0	0
Ortalama	9,309	9,36	201,4

**Çizelge 6.15.** 25 uçak için gecikmeden kaynaklı ekstra yakıt sarfiyatları (kg)

Senaryo No	GA	TS	RD
1	11,90	11,90	439,03
2	10,70	10,70	354,47
3	0,00	0,00	8,23
4	91,00	105,50	384,05
5	0,00	0,00	11,41
6	17,00	17,00	152,33
7	24,60	24,60	452,02
8	31,40	31,40	211,66
9	5,40	5,40	127,42
10	0,00	0,00	16,42
11	0,00	0,00	331,98
12	12,58	12,58	170,02
13	15,70	15,70	197,55
14	138,00	158,90	699,73
15	50,40	50,40	235,45
16	14,50	14,50	439,81
17	32,40	35,80	430,29
18	0,00	0,00	86,38
19	40,90	55,01	367,17
20	0,00	0,00	270,53
21	0,00	0,00	260,96
22	15,70	15,70	198,04
23	0,00	0,00	74,39
24	0,00	0,00	398,77
25	16,20	8,80	105,24
26	0,00	0,00	188,11
27	89,80	94,40	564,78
28	115,60	115,60	600,61
29	0,00	0,00	7,09
30	0,00	0,00	249,33
Ortalama	24,45	26,12	267,7

Çizelge 6.14 incelediği zaman yakıt sarfiyatları sadece iki senaryoda farklı görülmüştür. Bu durum gecikme sürelerinin farklı olmasından kaynaklanmıştır. Her iki algoritmanın bulduğu sonuçların yakıt sarfiyat ortalamaları birbirlerine çok yakındır. Çizelge 6.15 sonuçları değerlendirildiği zaman yakıt sarfiyatlarının yirmi üç senaryoda aynı olduğu görülmüştür. Diğer 7 senaryonun 6 tanesinde GA'nın bulduğu gecikme sürelerine dayalı yakıt sarfiyat oranları TS algoritmasına göre daha iyi sonuç vermiştir fakat yirmi beşinci senaryoda TS algoritmasının bulduğu gecikme süresi daha fazla iken yakıt tüketimi GA'ya oranla daha az çıkmıştır. Bu durum uçaklar arasındaki performans farklılıklarından ortaya çıkmaktadır. İlk aşamada önerilen model gecikme sürelerini en

küçüklemeyi hedeflediği için gecikme verilen uçakların yakıt sarfiyat değerleri göz önünde bulundurmamıştır. Her iki hava trafik talebinin gecikmeden kaynaklı ekstra yakıt sarfiyat ortalamaları Şekil 6.6’ da verilmiştir.



**Şekil 6.6.** Gecikmeden kaynaklı ekstra yakıt sarfiyat ortalamaları

Şekil 6.6’ da 20 uçak için referans durum ortalama gecikmeden kaynaklı süresinin yakıt sarfiyatı 201,4 kilogramdan GA için 9,3 kilografa ve TS için 8,6 kilografa indiği görülmüştür. GA ve TS algoritmaları kullanılarak elde edilen iyileşme yüzdeleri yaklaşık %95,4 ‘tür. 25 uçak için referans durum ortalama gecikme süresinin 267,7 kilogramdan GA için 24,5 kilografa TS için 26,1 kilografa indiği görülmüştür. GA ve TS için iyileşme yüzdeleri sırasıyla %90,9 ve %90,2’dir. Her iki algoritmanın ürettiği giriş noktası atamaları ekstra yakıt sarfiyatını önemli oranlarda azaltmıştır.

### 6.3.2. Çakışmadan kaynaklı geciken uçak sayıları

Bu bölümde saatlik hava trafiğinin 20 ve 25 uçak olduğu senaryolarda gecikme alan uçak sayıları verilmiştir ve bu değerler sırasıyla Çizelge 6.16 ve 6.17 verilmiştir. Çizelgelerin ilk sütunu senaryo numarasını, ikinci, üçüncü ve dördüncü sütunları sırasıyla GA, TS algoritması ve referans durum (RD) geciken uçak sayılarını vermektedir.

**Çizelge 6.16.** 20 uçak için çakışmadan dolayı geciken uçak sayıları

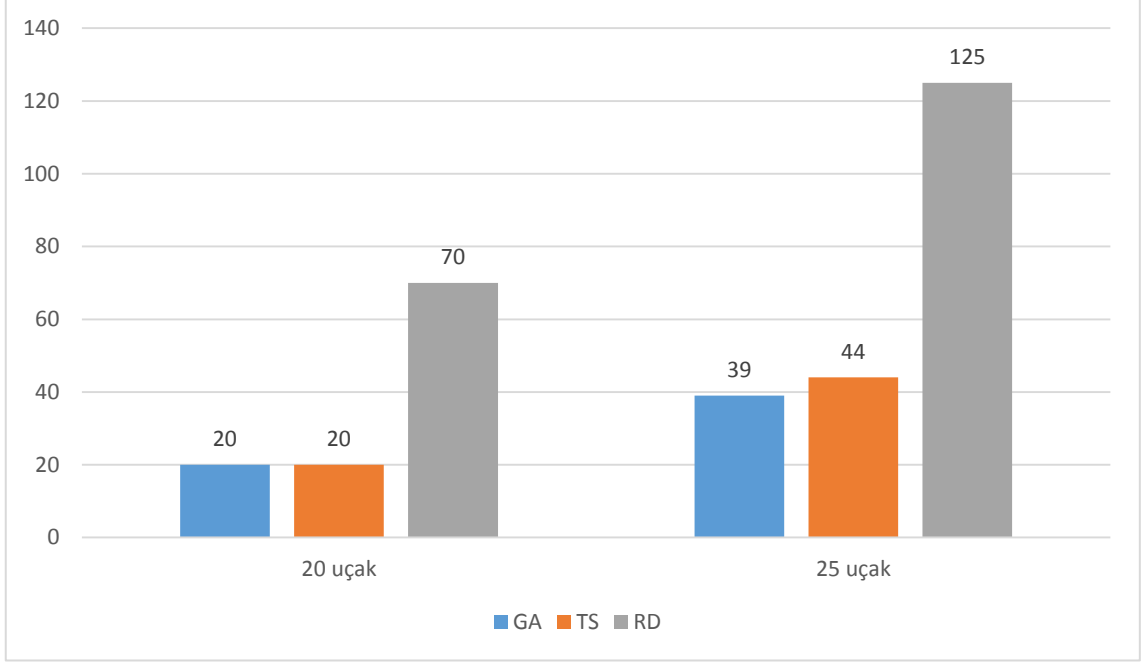
Senaryo No	GA	TS	RD
1	0	0	2
2	1	1	3
3	1	1	7
4	0	0	2
5	0	0	2
6	0	0	0
7	0	0	1
8	1	1	6
9	0	0	1
10	0	0	2
11	0	0	1
12	2	2	2
13	2	2	5
14	1	1	5
15	1	1	5
16	0	0	1
17	0	0	1
18	1	1	3
19	1	1	2
20	0	0	0
21	1	1	3
22	0	0	2
23	0	0	1
24	0	0	1
25	3	3	6
26	1	1	2
27	2	2	3
28	1	1	2
29	1	1	3
30	0	0	0
Toplam	20	20	74

**Çizelge 6.17.** 25 uçak için çakışmadan dolayı geciken uçak sayıları (adet)

Senaryo No	GA	TS	RD
1	1	1	3
2	1	1	3
3	0	0	1
4	3	3	6
5	0	0	2
6	1	1	3
7	1	3	5
8	3	3	8
9	2	2	5
10	0	0	1
11	0	0	2
12	3	3	4
13	1	1	3
14	5	7	8
15	2	2	4
16	2	2	7
17	3	3	6
18	0	0	3
19	2	3	6
20	0	2	9
21	0	0	4
22	1	1	3
23	0	0	1
24	0	0	2
25	2	1	5
26	0	0	2
27	5	4	9
28	1	1	5
29	0	0	1
30	0	0	4
Toplam	39	44	125

Şekil 6.7' de bütün senaryolardaki toplam geciken uçak sayıları verilmiştir. Şekilde her bir hava trafik talebi için referans durum ile meta sezgisel algoritmaların bulmuş olduğu geciken uçak sayıları karşılaştırılmıştır.





**Şekil 6.7.** Geciken toplam uçak sayısı

Çizelge 6.16 incelediğini zaman saatlik 20 hava trafiği olan senaryolarda toplam referans durumda geciken toplam uçak sayısı 70 olarak hesaplanmıştır. GA ve TS algoritmalarının çoklu giriş noktası yaklaşımını kullanması sonucunda geciken uçak sayısı her iki algoritma için 20 olarak hesaplanmıştır. Geciken uçak sayılarında meydana gelen iyileşme oranı %71,42 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 6.17 incelediğini zaman saatlik 25 hava trafiği olan senaryolarda toplam referans durumda geciken toplam uçak sayısı 125 olarak hesaplanmıştır. GA ve TS algoritmalarının çoklu giriş noktası yaklaşımını kullanması sonucunda geciken uçak sayısı sırasıyla 39 ve 44 olarak hesaplanmıştır. Geciken uçak sayılarında meydana gelen iyileşme oranı GA ve TS algoritması için sırasıyla %68,8 ve %64,8 olarak hesaplanmıştır.

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada serbest rotalı hava sahalarındaki uçuş operasyonlarında meydana gelen çakışma çözümlerinden kaynaklanan gecikmelerin ve bu gecikmelerden kaynaklı manevraların neden olduğu yakıt sarfiyatlarının en küçüklenmesine yönelik iki aşamalı bir çözüm yaklaşımı ortaya konmuştur. İlk aşama oluşturulan model hem genetik algoritma hem de yasaklı arama algoritması ile çözülmüştür. Önerilen meta sezgisel algoritmaların performansının incelemesi için test problemleri hazırlanmış ve GAMS/CPLEX çözücünün elde ettiği en iyi amaç fonksiyonu değerleri ile karşılaştırılmıştır. Oluşturulan sektörlerde en iyi amaç fonksiyonu değerinin hesaplanması için rota sayıları kısıtlı tutulmuştur. Birçok test probleminde hem GA'nın hem de TS'nin en iyi amaç fonksiyonu değerini bulduğu görülmüştür. En iyi değer bulunmadığı test problemlerinde ise en iyi değere yakın bir değer bulunmuştur.

Önerilen yaklaşımın rota sayısının fazla olduğu sektör yapılarındaki performansını ölçmek için farklı bir sektör yapısı tasarlanmış ve bu hava sahasında mümkün olan bütün rotalar tanımlanmıştır. Bu sektörde saatlik 20 hava trafiğinin olduğu 30 farklı senaryonun 28 tanesinde GA ve TS algoritması aynı sonucu bulmuş geriye kalan diğer iki senaryoda birbirlerine yakın çözümler bulmuştur. GA ve TS algoritmasının kullanılması sonucunda çakışmalardan kaynaklı ortalama gecikmelerde referans duruma göre sırasıyla %93,4 ve %93,3 oranlarında iyileşmeler görülmektedir. Her iki algoritmanın etkili bir çözüm bulma süresi GA ve TS algoritmaları için sırasıyla ortalama 86 ve 83 saniyedir.

Saatlik hava trafiğinin 25 uçak olduğu 30 senaryonun 23 tanesinde GA ve TS algoritması aynı sonuçları bulmuşlardır. Geriye kalan yedi senaryonun altısında genetik algoritma ile TS algoritmasının elde ettiği değerler birbirlerine çok yakındır. Sadece bir senaryoda GA algoritması 23 saniye daha iyi bir sonuç bulmuştur. GA ve TS algoritmasının çakışmadan kaynaklı ortalama gecikmelerde referans duruma göre sırasıyla %88,9 ve %88 oranlarda iyileştirmeler yaptığı görülmektedir. GA ve TS algoritması sırasıyla ortalama 170 ve 183 saniyede etkili bir çözüm üretmişlerdir.

Gecikmeden kaynaklı ekstra yakıt sarfiyatı incelendiğinde ise 20 uçağın bulunduğu senaryolarda referans duruma göre GA ve TS algoritmalarının meydana getirdiği iyileşme oranları ikisi içinde yaklaşık %95,4' tür. 25 uçaklık senaryolarda ise referans duruma göre iyileşme oranları GA için %90,9 ve TS için %90,2'dir.

Her iki hava trafik talebine ait geciken uçak sayıları incelediğinde saatlik 20 ve 25 uçağın olduğu 30 farklı senaryoda referans durum için toplam geciken uçak sayısı sırasıyla 70 ve 125 olarak hesaplanmıştır. 20 uçağın olduğu senaryolarda GA ve TS algoritmasının elde ettiği geciken uçak sayıları her ikisi içinde 20'dir. 25 uçağın bulunduğu senaryolarda ise GA ve TS için geciken uçak sayısı sırasıyla 39 ve 44'tür. Önerilen çoklu giriş noktası yaklaşımı ile uçaklara sadece giriş noktası ataması yapılarak çakışmadan dolayı geciken uçak sayılarında saatlik 20 uçağın bulunduğu senaryolarda referans duruma göre %71,4 oranında bir iyileşme görülmüştür. Saatlik 25 uçağın bulunduğu senaryolarda ise referans duruma göre GA ve TS algoritmalarının sırasıyla %68,8 ve %64,8 oranında iyileşmeler yaptığı görülmüştür.

Bu çalışmada uçak ayırmaları çakışma noktaları üzerinden kontrol edilmiştir. Bu yaklaşım hem genetik algoritma hem de yasaklı arama algoritmasının kısa sürede etkili ve iyi bir çözüm bulabilmesine imkân tanımıştır. Hava sahalarında yaşanabilecek olan çakışmalarının uçaklar hava sahasına girmeden önce saptanması ve çözüm önerilerinin sunulması, önerilen matematiksel modelin hava trafik kontrolörlerince kullanılan bir karar destek sistemi olmasına imkân tanımaktadır. Ayrıca önerilen vektör modelinde manevra mesafesinin limit değerleri hava trafik kontrolörlerince belirlenebilecektir. Modelin ürettiği vektör manevrası gecikmeden kaynaklı yakıt sarfiyatını en küçükleyerek gereksiz yakıt sarfiyatının önüne geçecektir.

Önerilen modelin ilk aşaması çakışmaları önceden tespit edip uçakların sadece giriş noktalarını değiştirerek geciken uçak sayılarında ciddi oranda azalmalar meydana getirmiştir. Bu durum uçak çakışma geometrilerinin değiştirilmesi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Çakışma geometrilerinin değiştirilmesi uçakların farklı çakışma noktaları üzerinde farklı zamanlarda bulunmasına imkân tanıyarak oluşabilecek çakışmaların büyük bölümünü ortadan kaldırmaktadır. Model uçak hızlarında ve irtifalarında herhangi bir değişiklik yapmadığı ve sadece vektör manevrası kullanması nedeniyle kolay bir çözüm üretmektedir. Vektör manevraları uçaklara sektöre girdikleri anda veya sektöre girmeden kısa bir süre önce önerilmektedir fakat bu durum kontrolörlerin tercihine bırakılarak çakışma noktasına gelmeden önce veya bir başka çakışmaya neden olmayacakları bir zaman dilimi içinde de uygulanabilecektir.

Serbest rotalı hava sahalarında kesişen rota sayısı sabit rotalı hava sahalarına göre daha fazladır ve bu durum çakışma ihtimalini arttırmaktadır.

Gelecek çalışmalarda gecikme zamanı ile yakıt sarfiyatının aynı anda en iyilenmesinin hedeflendiği çok amaçlı matematiksel modelin oluşturulması planlanmaktadır. Uçaklar arasındaki çakışma çözüm manevralarının hız ve irtifa değişimlerini de içerecek şekilde genişletilmesi halinde model daha gerçekçi yol ve terminal hava sahalarına da uygulanabilecektir.

Bu alışma ile önerilen model aynı zamanda Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatı'nın yayınlamış olduğu 2013-2028 küresel hava seyrüsefer planında bulunan seyir uçuşu yörüngelerinin çeşitliliğinin arttırılması ile uçuş operasyonlarının daha da geliştirilmesi hedeflerini de desteklemektedir [64].

## KAYNAKÇA

- [1] IATA. (2017). "Economic Performance of the Airline Industry". Montreal, Canada:IATA.
- [2] Boeing. (2017). "Current Market Outlook 2017-2036". Seattle, WA, USA: Boeing.
- [3] Eurocontrol. (2017). "Eurocontrol Seven-Year Forecast September 2017". Brétigny-sur-30 Orge Cedex, France: Eurocontrol.
- [4] Eurocontrol. (2013). "Challenges of Growth 2013". Brétigny-sur-30 Orge Cedex, France: Eurocontrol,
- [5] Cavcar A. (1998). "Temel Hava Trafik Yönetimi". Eskişehir, Türkiye: Anadolu Üniversitesi Yayınları.
- [6] ICAO. (2009). "Annex 11, Air Traffic Services", Montreal, Canada: International Civil Aviation Organization Publications.
- [7] ICAO. (2009). "Annex 14, Airport and Airport Equipment, Montreal, Canada: International Civil Aviation Organization Publications.
- [8] ICAO. (2009). "Annex 2, Rules of Air, Montreal, Canada: International Civil Aviation Organization Publications.
- [9] ICAO. Doc 4444, Procedures for Air Navigation Services, Air Traffic Management (ICAO), 2001
- [10] Çınar E. (2003). "Hava trafik akış yönetimi ve İstanbul atatürk havalimanındaki taksi sürelerinin kalkış slotu tahsisine etkisi". Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi,Sosyal Bilimler Enstitüsü, Eskişehir,
- [11] Bianco, L., & Bielli, M. (1992). "Air traffic management: Optimization models and algorithms". *Journal of Advanced Transportation*, 26(2), 131-167.
- [12] Eurocontrol. (2012). "Free Route Developments in Europe". Brétigny-sur-30 Orge Cedex, France: Eurocontrol,
- [13] Vranas, P. B., Bertsimas, D. J., & Odoni, A. R. (1994). The multi-airport ground-holding problem in air traffic control. *Operations Research*, 42(2), 249-261.
- [14] Andreatta, G., & Romanin-Jacur, G. (1987). Aircraft flow management under congestion. *Transportation Science*, 21(4), 249-253.
- [15] Terrab, M., & Odoni, A. R. (1993). Strategic flow management for air traffic control. *Operations Research*, 41(1), 138-152.

- [16] Richetta, O., & Odoni, A. R. (1993). Solving optimally the static ground-holding policy problem in air traffic control. *Transportation science*, 27(3), 228-238.
- [17] Richetta, O., & Odoni, A. R. (1994). Dynamic solution to the ground-holding problem in air traffic control. *Transportation research part A: Policy and practice*, 28(3), 167-185.
- [18] Dell'Olmo, P., & Lulli, G. (2003). A dynamic programming approach for the airport capacity allocation problem. *IMA Journal of Management Mathematics*, 14(3), 235-249.
- [19] Mukherjee, A., & Hansen, M. (2007). A dynamic stochastic model for the single airport ground holding problem. *Transportation Science*, 41(4), 444-456.
- [20] Vranas, P. B., Bertsimas, D., & Odoni, A. R. (1994). Dynamic ground-holding policies for a network of airports. *Transportation Science*, 28(4), 275-291.
- [21] Vossen, T. W. M. (2002). Fair allocation concepts in air traffic management (Doctoral dissertation, PhD thesis, Supervisor: MO Ball, University of Maryland, College Park, Md).
- [22] ZHANG, H. H., & HU, M. H. (2009). Multi-runway collaborative scheduling optimization of aircraft landing. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 9(3), 86-91.
- [23] Ball, M. O., Hoffman, R., & Mukherjee, A. (2010). Ground delay program planning under uncertainty based on the ration-by-distance principle. *Transportation Science*, 44(1), 1-14.
- [24] Lili, W. A. N. G., & ZhANG, Z. (2005). A RECURSION EVENT-DRIVEN MODEL TO SOLVE THE SINGLE AIRPORT GROUND-HOLDING PROBLEM. In *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies* (Vol. 5, pp. 500-506).
- [25] Manley, B., & Sherry, L. (2010). Analysis of performance and equity in ground delay programs. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18(6), 910-920.
- [26] Andreatta, G., Dell'Olmo, P., & Lulli, G. (2011). An aggregate stochastic programming model for air traffic flow management. *European Journal of Operational Research*, 215(3), 697-704.

- [27] Glover, C. N., & Ball, M. O. (2013). Stochastic optimization models for ground delay program planning with equity–efficiency tradeoffs. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 33, 196-202.
- [28] Kuhn, K. D. (2013). Ground delay program planning: delay, equity, and computational complexity. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 35, 193-203.
- [29] Özgür, M., & Cavcar, A. (2014). 0–1 integer programming model for procedural separation of aircraft by ground holding in ATFM. *Aerospace science and technology*, 33(1), 1-8.
- [30] Helme, M. P. (1992, October). Reducing air traffic delay in a space-time network. In *Systems, Man and Cybernetics, 1992.*, IEEE International Conference on (pp. 236-242). IEEE.
- [31] Bertsimas, D., & Patterson, S. S. (1998). The air traffic flow management problem with enroute capacities. *Operations research*, 46(3), 406-422.
- [32] Bertsimas, D., & Patterson, S. S. (2000). The traffic flow management rerouting problem in air traffic control: A dynamic network flow approach. *Transportation Science*, 34(3), 239-255.
- [33] Alonso, A., Escudero, L. F., & Ortuno, M. T. (2000). A stochastic 0–1 program based approach for the air traffic flow management problem. *European Journal of Operational Research*, 120(1), 47-62.
- [34] Bertsimas, D., Lulli, G., & Odoni, A. (2008, May). The air traffic flow management problem: An integer optimization approach. In *International Conference on Integer Programming and Combinatorial Optimization* (pp. 34-46). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [35] Richard, O., Constans, S., & Fondacci, R. (2011). Computing 4D near-optimal trajectories for dynamic air traffic flow management with column generation and branch-and-price. *Transportation Planning and Technology*, 34(5), 389-411.
- [36] Bertsimas, D., Lulli, G., & Odoni, A. (2011). An integer optimization approach to large-scale air traffic flow management. *Operations research*, 59(1), 211-227.
- [37] Agustí, A., Alonso-Ayuso, A., Escudero, L. F., & Pizarro, C. (2012). On air traffic flow management with rerouting. Part I: Deterministic case. *European Journal of Operational Research*, 219(1), 156-166.

- [38] Agustí, A., Alonso-Ayuso, A., Escudero, L. F., & Pizarro, C. (2012). On air traffic flow management with rerouting. Part II: Stochastic case. *European Journal of Operational Research*, 219(1), 167-177.
- [39] H. Balakrishnan, B.G. Chandran, "Optimal large scale air traffic flow management", unpublished.
- [40] Kuchar, J. K., & Yang, L. C. (2000). A review of conflict detection and resolution modeling methods. *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, 1(4), 179-189.
- [41] Campo, F. J. M. (2010). The collision avoidance problem: Methods and algorithms (Doctoral dissertation, Universidad Rey Juan Carlos).
- [42] Pallottino, L., Feron, E. M., & Bicchi, A. (2002). Conflict resolution problems for air traffic management systems solved with mixed integer programming. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 3(1), 3-11.
- [43] Christodoulou, M., & Costoulakis, C. (2004, May). Nonlinear mixed integer programming for aircraft collision avoidance in free flight. In *Electrotechnical Conference, 2004. MELECON 2004. Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean (Vol. 1, pp. 327-330)*. IEEE.
- [44] Vela, A., Solak, S., Singhose, W., & Clarke, J. P. (2009, December). A mixed integer program for flight-level assignment and speed control for conflict resolution. In *Decision and Control, 2009 held jointly with the 2009 28th Chinese Control Conference. CDC/CCC 2009. Proceedings of the 48th IEEE Conference on (pp. 5219-5226)*. IEEE.
- [45] Vela, A. E., Solak, S., Clarke, J. P. B., Singhose, W. E., Barnes, E. R., & Johnson, E. L. (2010). Near real-time fuel-optimal en route conflict resolution. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 11(4), 826-837.
- [46] Cetek, C. (2009). Realistic speed change maneuvers for air traffic conflict avoidance and their impact on aircraft economics. *International Journal of Civil Aviation*, 1(1).
- [47] Alonso-Ayuso, A., Escudero, L. F., Olaso, P., & Pizarro, C. (2013). Conflict avoidance: 0-1 linear models for conflict detection & resolution. *Top*, 21(3), 485-504.



- [48] Alonso-Ayuso, A., Escudero, L. F., & Martín-Campo, F. J. (2016). An exact multi-objective mixed integer nonlinear optimization approach for aircraft conflict resolution. *TOP*, 24(2), 381-408.
- [49] Cafieri, S., & Rey, D. (2017). Maximizing the number of conflict-free aircraft using mixed-integer nonlinear programming. *Computers & Operations Research*, 80, 147-158.
- [50] Omer, J. (2015). A space-discretized mixed-integer linear model for air-conflict resolution with speed and heading maneuvers. *Computers & Operations Research*, 58, 75-86.
- [51] Cafieri, S., & Omheni, R. (2017). Mixed-integer nonlinear programming for aircraft conflict avoidance by sequentially applying velocity and heading angle changes. *European Journal of Operational Research*, 260(1), 283-290.
- [52] Durand, N., Alliot, J. M., & Noailles, J. (1996, February). Automatic aircraft conflict resolution using genetic algorithms. In *Proceedings of the 1996 ACM symposium on Applied Computing* (pp. 289-298). ACM.
- [53] Durand, N., Alliot, J. M., & Médioni, F. (2000). Neural nets trained by genetic algorithms for collision avoidance. *Applied Intelligence*, 13(3), 205-213.
- [54] Durand, N., & Alliot, J. M. (2009, June). Ant colony optimization for air traffic conflict resolution. In *ATM Seminar 2009, 8th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar*.
- [55] Gao, Y., Zhang, X., & Guan, X. (2012, August). Cooperative multi-aircraft conflict resolution based on co-evolution. In *Instrumentation & Measurement, Sensor Network and Automation (IMSNA), 2012 International Symposium on* (Vol. 1, pp. 310-313). IEEE.
- [56] Meng, G., & Qi, F. (2012, October). Flight conflict resolution for civil aviation based on ant colony optimization. In *Computational Intelligence and Design (ISCID), 2012 Fifth International Symposium on* (Vol. 1, pp. 239-241). IEEE.
- [57] Alonso-Ayuso, A., Escudero, L. F., Martín-Campo, F. J., & Mladenović, N. (2015). A VNS metaheuristic for solving the aircraft conflict detection and resolution problem by performing turn changes. *Journal of Global Optimization*, 63(3), 583-596.

- [58] Peyronne, C., Conn, A. R., Mongeau, M., & Delahaye, D. (2015). Solving air traffic conflict problems via local continuous optimization. *European Journal of Operational Research*, 241(2), 502-512.
- [59] Eurocontrol. User Manuel for the Base of Aircraft Data (BADA). Rev. 3.11. Brétigny-sur-Orge Cedex, France: Eurocontrol, 2013.
- [60] Holland, J. H. (1992). Genetic algorithms. *Scientific American*, 267(1), 66-73.
- [61] Affenzeller, M., Beham, A., Kofler, M., Kronberger, G., Wagner, S. A., & Winkler, S. (2009). Metaheuristic Optimization. In *Hagenberg Research* (pp. 103-155). Springer Berlin Heidelberg.
- [62] Glover, F., & Laguna, M. (2013). Tabu Search\*. In *Handbook of combinatorial optimization* (pp. 3261-3362). Springer New York.
- [63] Sheehan, C. (2007). Coverage of 2012 European Air Traffic for the Base of Aircraft Data (BADA)-Revision 3.11.
- [64] ICAO. (2013). “2013–2028 Global Air Navigation Plan”. Montreal, Canada: International Civil Aviation Organization Publications