

**SERBEST YOL YAPISINA SAHİP HAVA SAHALARI İÇİN ROTA
PLANLAMASI VE OPTİMİZASYONU**

Emre AYDOĞAN

Doktora Tezi

Hava Trafik Kontrol Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Cem ÇETEK

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Kasım 2020

Bu tez çalışması BAP Komisyonu tarafından kabul edilen 1708F477 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.

ÖZET

SERBEST YOL YAPISINA SAHİP HAVA SAHALARI İÇİN ROTA PLANLAMASI VE OPTİMİZASYONU

Emre AYDOĞAN

Hava Trafik Kontrol Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kasım 2020

Danışman: Doç. Dr. Cem ÇETEK

Gerçekleştirilen uluslararası uçuşlarda uçaklar pek çok farklı ülkenin hava sahasını kullanmaktadır. Ülkelerin hava sahalarında sağlamış oldukları hava trafik hizmetleri farklı nedenlerden ötürü değişkenlik gösterebilmektedir. Hava sahalarında yer alan rota yapısı bu değişkenliklerden bir tanesidir. Hava sahalarında kullanılan rota yapıları sabit rotalı ve serbest rotalı olmak üzere iki farklı yapıda olabilmektedir. Geleneksel olarak kullanılan sabit rotalı hava sahalarında; yol noktaları ve bu yol noktaları arasındaki hava yolları belirlenerek hava trafik hizmet sağlayıcısı tarafından ilan edilir. Kullanıcılar da bu hava yolları üzerinden uçuşlarını planlarlar. Serbest rotalı hava sahalarında ise hava sahasında sadece giriş ve çıkış noktalarının belirlenmesi yeterlidir. Kullanıcılar giriş ve çıkış noktaları arasında serbest bir şekilde rota planlaması yapabilmektedirler. Serbest rotalı hava sahaları kullanıcılara son derece esnek bir rota oluşturabilme imkanı sunmaktadır. Ancak serbest rotalı hava sahalarından etkin bir şekilde faydalanabilmek için uçuş boyunca kullanılacak olan hava sahalarının tamamının serbest rotalı hava sahası olması gerekmektedir. Uçuş boyunca kullanılacak olan hava sahaları serbest ve sabit rotalardan oluşan karma bir yapıda ise ne yazık ki serbest rotanın sağlamış olduğu esneklikten sabit rotalı hava sahaları nedeni ile tam olarak faydalanılamamaktadır. Serbest rotalı hava sahalarındaki uçuş planlaması sabit rotalı hava sahaları nedeni ile kısıtlanmaktadır. Bu durumda sabit rotalı hava sahalarını da dikkate alarak en etkin rota planlamasının yapılması gerekmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında serbest ve sabit rotalı hava sahalarından oluşan karma bir hava sahasında optimum rota planlaması amacıyla optimizasyon yöntemleri geliştirilmiştir. Karma hava sahalarında yapılacak olan rota planlamasında yakıt maliyeti, yer gecikmesi maliyeti ve hava gecikmesi maliyetini dikkate alarak, bu maliyetlerin

toplamını en küçüklemeyi amaçlayan optimizasyon çalışmaları yürütülmüştür. Karma hava sahalarında yapılan rota planlaması ile sabit rotalı hava sahasındaki yol yapısını, hava yollarının kapasitesini, uygulanan ayırma minimumlarını dikkate alan çakışmasız rotaların ve gecikme sürelerinin belirlenmesi sağlanmıştır. Bu amaçla oluşturulan matematiksel modelle birlikte büyük ölçekli problemler için tavlama benzetimi yöntemi kullanılmıştır.

Geliştirilen optimizasyon yöntemleri, hava trafik akış ve kapasite yönetiminde stratejik ve ön taktik planlama aşamalarında ilgili birimlerce kullanılabilecek bir karar destek mekanizması niteliği taşımaktadır.

Anahtar Sözcükler: Serbest rotalı hava sahası, Sabit rotalı hava sahası, Rota planlaması, Tavlama benzetimi

ABSTRACT

ROUTE PLANNING AND OPTIMIZATION FOR FREE ROUTE AIRSPACE

Emre AYDOĞAN

Department of Air Traffic Control

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, November 2020

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Cem ÇETEK

The aircraft operates in many different airspaces in international flights. The air traffic services over those airspaces can be changed because of many different reasons. The route structure is one of those reasons. The route structure of airspaces can be changed whether it has fixed route or free route structure. Conventionally the waypoints and air route network are defined and published by air navigation service provider in fixed route airspaces. The user of the fixed route airspace can plan their flight over these published waypoints and air routes. As opposed to fixed route airspace, only the entrance and exit points declaration is enough for free route airspaces. The users can freely plan their route in free route airspaces between entry and exit points. The free route airspaces give chances to their users to create much more flexible routes. Nevertheless, all the airspaces that will be used among the flight must be free route in order to effectively take advantages of free route concept. If the airspaces among the flight have a mixed structure as combined with fixed route airspaces and free route airspaces the flexibility of free route airspaces can not be exactly used because of fixed route airspaces. In this situation the route planning in free route airspaces is restricted due to the fixed route airspaces. Because of this reason the route planning must be carried out effectively with taking fixed route structure.

In the scope of this thesis, the optimization methods are developed for the search of best route planning in mixed airspaces which have fixed route and free route airspaces. The optimization search for the route planning at mixed airspaces aims to minimize the total cost which compose of fuel cost, ground delay cost and air delay cost. Determination of the conflict-free routes and delay amounts is achieved as a result of optimization for route planning which is considering of fixed routes, air route capacity and separation minimum at mixed airspaces. The simulated annealing method is used for the complex routing problem in addition to the mathematical model.

The developed optimization methods can be characterized as a decision support mechanism that can be used in strategic and pre-tactical stages in air traffic flow and capacity management.

Keywords: Free route airspace, Fixed route airspace, Route planning, Simulated annealing



TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması TÜBİTAK 2211 Yurt İçi Lisansüstü Burs programı kapsamında desteklenmiştir. Tez çalışmama ve doktora eğitime katkılarından ötürü TÜBİTAK’a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tezin genelinde akademik yönlendirmelerinden ve desteklerinden ötürü danışman hocam Doç. Dr. Cem ÇETEK’ e, Hava Trafik Kontrol ve Uçak Performansı alanlarında bilgi birikimime olan çok kıymetli katkılarından ötürü Prof. Dr. Aydan CAVCAR hocama, optimizasyon çalışmalarında ve Tavlama Benzetimi algoritmasında değerli fikirleri ve katkılarından ötürü Prof. Dr. İnci SARIÇİÇEK hocama teşekkürlerimi sunarım.

Emre AYDOĞAN

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 ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik 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.

Emre AYDOĞAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vii
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
TABLolar DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI.....	3
3. PROBLEMİN TANIMLANMASI	6
3.1. Probleme Ait Kabuller.....	11
3.2. Probleme Ait Veriler	12
4. UÇUŞ PLANLAMASI.....	16
4.1. Sabit Rotalı Hava Sahalarında Rota Planlaması	17
4.2. Serbest Rotalı Hava Sahalarında Rota Planlaması	18
4.3. Karma Hava Sahalarında Rota Planlaması	20
5. MATEMATİKSEL MODEL	22
5.1. Matematiksel Modele Ait Notasyonlar.....	23
5.2. Matematiksel Model Kısıtları	24
5.2.1. Rota ve akış kısıtları.....	24
5.2.2. Kapasite kısıtı	25
5.2.3. Çakışma önleme kısıtı	25
5.2.4. Yer gecikmesi kısıtı	26

5.3. Matematiksel Model Parametreleri.....	26
5.3.1. Hava araçlarına özgü parametreler	27
5.3.2. Hava sahasına özgü parametreler.....	27
5.4. Matematiksel Model Karar Değişkenleri.....	30
5.5. Matematiksel Model Amaç Fonksiyonu.....	31
6. TAVLAMA BENZETİMİ İLE ROTA PLANLAMASI VE OPTİMİZASYONU	33
6.1. Tavlama Benzetimi.....	37
6.2. Tavlama Benzetimi Yönteminin Rota Planlaması ve Optimizasyonuna Uyarlanması.....	39
6.2.1. Başlangıç çözümünün oluşturulması	40
6.2.2. Komşu çözümün türetilmesi.....	44
6.3. Tavlama Benzetimine Ait Parametrelerin Belirlenmesi.....	45
7. ANALİZLER.....	50
7.1. Matematiksel Model Çözüm Analizleri	50
7.2. Tavlama Benzetimi Çözüm Analizleri	54
7.3. Yakıt Tüketimi ve Mesafe Analizleri	55
7.4. Matematiksel Model ile Tavlama Benzetimi Çözümlerinin Karşılaştırılması	56
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	59
KAYNAKÇA.....	61
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1. 30 Nisan 2018 tarihli Londra-İstanbul uçuşları	13
Tablo 3.2. Uçaklara ait veriler.....	14
Tablo 5.1. Hava aracına özgü parametreler	27
Tablo 5.2. Hava sahasına özgü parametreler	27
Tablo 5.3. Londra-İstanbul arası rota haritası	28
Tablo 5.4. Modelde yer alan yol noktalarının kapasiteleri.....	29
Tablo 5.5. Yol noktaları arası uçuş mesafeleri.....	29
Tablo 5.6. Her bir yol noktası için ayırma minimumu.....	30
Tablo 6.1. Örnek hava sahası rota yapısı	40
Tablo 6.2. Örnek hava sahasına ait yol noktalarının kapasiteleri	41
Tablo 6.3. Beş uçaklık bir başlangıç çözümü örneği	43
Tablo 6.4. Başlangıç çözümü rota atamasından sonra kullanılabilir kapasiteler	43
Tablo 6.5. Mevcut çözümden komşu çözüm türetme	44
Tablo 6.6. Senaryo-1 tavlama benzetimi parametrelerinin belirlenmesi deney sonuçları.....	47
Tablo 6.7. Senaryo-3 tavlama benzetimi parametrelerinin belirlenmesi deney sonuçları.....	49
Tablo 7.1. Senaryo-1 için uçak karması ve planlanan kalkış saatleri	51
Tablo 7.2. Senaryo-2 için uçak karması ve planlanan kalkış saatleri	51
Tablo 7.3. Senaryo-3 için uçak karması ve planlanan kalkış saatleri	52
Tablo 7.4. Senaryo-4 için uçak karması ve planlanan kalkış saatleri	53
Tablo 7.5. Matematiksel modelin çözüm sonuçları	54
Tablo 7.6. Tavlama benzetimi çözüm analizleri	55
Tablo 7.7. Optimizasyon öncesi ve sonrasında yakıt tüketimi ve uçuş mesafesi değerleri	56
Tablo 7.8. Matematiksel model-tavlama benzetimi çözüm analizleri	57

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Türkiye Hava Sahası hava trafik hizmet yol ağı (DHMI, 2019)	6
Şekil 3.2. Sabit rotalı hava sahası için Kugos-Temel noktaları arası rota planlaması	8
Şekil 3.3. Serbest rotalı hava sahası için Kugos-Temel noktaları arası rota planlaması	8
Şekil 3.4. 2020 yıl sonu için EUROCONTROL tarafından planlanan serbest rotalı hava sahaları (EUROCONTROL, 2020)	9
Şekil 3.5. Problem olarak ele alınan serbest ve sabit rotalı hava sahalarından oluşan karma yapı	10
Şekil 3.6. Londra-İstanbul arası uçuş rotalarının gösterimi.....	13
Şekil 4.1. Serbest ve sabit rotalı hava sahalarından geçen örnek uçaklar	20
Şekil 6.1. Kalkış havalimanından olası rota alternatifleri	41
Şekil 6.2. C yol noktasından olası rota alternatifleri	42

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AIP	: Aviation Information Public (Havacılık Bilgi Yayını)
ANSP	: Air Navigation Service Provider (Hava Seyrüsefer Hizmet Sağlayıcısı)
ATFCM	: Air Traffic Flow and Capacity Management (Hava Trafik Akış ve Kapasite Yönetimi)
AyırmaMin(m,n)	: m ve n Yol Noktaları Arası Tanımlı Ayırma Minimumu (dakika)
BADA	: Base of Aircraft Data (Hava Aracı Veri Tabanı)
c	: Tavlama Benzetimi Soğuma Adımı
CACD	: Central Airspace and Capacity Database (Merkezi Hava Sahası ve Kapasite Veri Bankası)
Ç0	: Tavlama Benzetimi En İyi Çözümü
Çb	: Tavlama Benzetimi Başlangıç Çözümü
Çk	: Tavlama Benzetimi k. İterasyon Çözümü
Çn	: Tavlama Benzetimi Komşu Çözümü
DDR	: Demand Data Repository (Talep Veri Havuzu)
DHMI	: Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü
ECAC	: European Civil Aviation Conference (Avrupa Sivil Havacılık Konferansı)
EGKK/LGW	: Londra Gatwick Havalimanı
EGLL/LHR	: Londra Heathrow Havalimanı
EGSS/STN	: Londra Stansted Havalimanı
EUROCONTROL	: European Organization for the Safety of Air Navigation (Avrupa Hava Seyrüsefer Emniyeti Teşkilatı)
FIR	: Flight Information Region (Uçuş Bilgi Bölgesi)
FL	: Flight Level (Uçuş Seviyesi)
FRA	: Free Route Airspace (Serbest Rotalı Hava Sahası)
FRA-IP	: Free Route Airspace with Intermediate Points (Ara Noktalı Serbest Rotalı Hava Sahası)

GAMS	: General Algebraic Modeling System (Genel Cebirsel Modelleme Sistemi)
GCD	: Great Circle Distance (Büyük Daire Mesafesi)
hg(i,m,n)	: Matematiksel Model Hava Gecikme Süresi Karar Değişkeni
HGMaliyeti(i)	: i. Uçağın Hava Gecikmesi Maliyeti (€/dakika)
ICAO	: International Civil Aviation Organization (Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü)
IFPS	: Integrated Initial Fight Plan Processing System (Uçuş Planı Entegre İşlem Sistemi)
IFR	: Instrument Flight Rules (Aletle Uçuş Kuralları)
i, i1, i2	: Matematiksel Modelde Uçakları Belirten İndisler
k	: Tavlama Benzetimi İterasyon Sayacı
Kapasite(m,n)	: m ve n Yol Noktaları Arası Tanımlı Yol Kapasitesi
Lim	: Tavlama Benzetimi İterasyon Limiti
m, n	: Matematiksel Modelde Yol Noktalarını Belirten İndisler
Mesafe(m,n)	: m ve n Yol Noktaları Arası Uçuş Mesafesi (NM)
NM	: Nautical Mile (Deniz Mili)
NMOC	: Network Manager Operations Center (Ağ Yöneticisi Harekatlar Merkezi)
NOTAM	: Notice to Airmen (Uçuş harekâtı ile ilgili görevlilere herhangi bir havacılık, hizmet, kolaylık, yöntem veya tehlikenin varlığı, koşulları ya da değişikliğine özgü bilgileri zamanında duyurmak amacıyla yapılan uyarı)
RotaHaritası(m,n)	: m ve n Yol Noktaları Arası Rota Haritası
T1	: Tavlama Benzetimi Başlangıç Sıcaklığı
TAS	: True Air Speed (Gerçek Hava Hızı)
Tlim	: Tavlama Benzetimi Sonlandırma Sıcaklığı
TMA	: Terminal Control Area (Terminal Kontrol Sahası)
UHızı(i)	: i. Uçağın Uçuş Hızı (knot)
UKalkış(i)	: i. Uçağın Talep Edilen Kalkış Zamanı (dakika)
UPVZamanı(i,m)	: i. Uçağın m Yol Noktasına Planlanan Varış Zamanı
USüresi(i,m,n)	: i. Uçağın m ve n Yol Noktaları Arasındaki Uçuş Süresi
UYT(i)	: i. Uçağın Yakıt Tüketim Katsayısı (kg/dakika)

VFR	: Visual Flight Rules (Görerek Uçuş Kuralları)
$x(i,m,n)$	: Matematiksel Model Rota Karar Değişkeni
$yg(i)$	: Matematiksel Model Yer Gecikme Süresi Karar Değişkeni
$YGLimit(i)$	: i. Uçağın Alabileceği Maksimum Yer Gecikme Süresi (dakika)
$YGMaliyeti(i)$	: i. Uçağın Yer Gecikmesi Maliyeti (€/dakika)
$YMaliyeti$	: Birim Yakıt Maliyeti (€/kg)
α	: Tavlama Benzetimi Soğuma Katsayısı



1. GİRİŞ

Havacılık faaliyetleri küresel olarak gerçekleştirilen uluslararası faaliyetlerdir. Geliştirilen uzun menzilli hava araçlarıyla birlikte artık ülkeleri değil kıtaları birbirine bağlayan uçuşlar gerçekleştirilmektedir. Bu uçuşlar sırasında pek çok farklı ülkenin hava sahası katedilmektedir. Uluslararası düzeyde gerçekleştirilen havacılık faaliyetlerinde eşgüdümü sağlamak ve standart uygulamalar ile ortak bir yapı oluşturmak havacılık emniyeti açısından son derece önemlidir. Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (International Civil Aviation Organization ICAO) kurulduğu günden beri havacılık faaliyetlerinin emniyetli ve düzenli şekilde sürdürülmesini ve standart uygulamaların geliştirilmesini açıkça görev edinmiştir. Bu görev altında ICAO havacılık emniyeti açısından son derece önemli olan hava trafik hizmetleri için pek çok standart uygulamaya öncülük etmiştir. Hava sahası tasarımları ve hava trafik hizmet yol ağının belirlenmesi bu uygulamalar arasındadır. Uçuşların gerçekleştirileceği hava sahasında yol noktalarının belirlenmesi, seyrüsefer yardımcılarının konumlandırılması ve hava trafik hizmet yol ağının belirlenmesi; uçuşların planlanabilmesi ve gerçekleştirilebilmesi için gereklidir.

Ülkeler arasında farklı nedenlerden ötürü hava sahası yapılarında farklı uygulamalar görülebilmektedir. Ülkelerin coğrafi koşulları, gelir düzeyleri, seyrüsefer yardımcıları, izleme sistemleri, teknolojik altyapıları farklı düzeylerde hava trafik hizmetlerinin verilmesini gerektirebilir. Hava sahaları arasındaki homojen olmayan bu yapı özellikle uluslararası uçuşlarda bazı sorunları beraberinde getirebilmektedir. Komşu iki hava sahasında farklı hava sahası yapılarının olması bu sorunlardan bir tanesidir. Sabit rotalı hava sahaları ile serbest rotalı hava sahaları bu farklı yapıların bir örneğidir.

Geleneksel olarak kullanılan hava sahaları sabit rotalı hava sahalarıdır. Sabit rotalı hava sahalarında önceden tanımlanmış ve ilgili ülkenin hava trafik hizmet sağlayıcısınınca yayınlanmış olan yol noktaları ve bu yol noktaları arasında tanımlanmış olan hava trafik yolları mevcuttur. Sabit rotalı hava sahalarında yapılacak olan uçuş planlamalarında bu tanımlı yol noktalarının ve yolların belirtilmesi gerekmektedir.

Yeni geliştirilen bir diğer hava sahası yapısı ise serbest rotalı hava sahasıdır. Serbest rotalı hava sahaları adından da anlaşılacağı üzere kullanıcılara serbest rota düzenleme imkanı sunan hava sahalarıdır. Serbest rotalı hava sahalarında hava sahasına giriş ve çıkış noktaları tanımlanmaktadır. Serbest rotalı hava sahaları, kullanıcılara hava trafik kontrol gözetiminde kalmak kaydı ile belirlenen giriş ve çıkış noktaları arasında diledikleri rotayı

kullanabilmeleri imkanını tanır. Giriş ve çıkış noktaları arasında kullanıcılar istemeleri halinde tanımlı olsun ya da olmasın istedikleri bir ara yol noktası üzerinden uçuş gerçekleştirebilmektedirler. Serbest rotalı hava sahaları ile daha kısa rotaların oluşturulabilmesi ve bu sayede daha ekonomik ve daha çevreci uçuşların gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Ancak serbest rotalı hava sahalarının sunmuş olduğu avantajlardan tamamen faydalanabilmek için uçuş boyunca katedilen bütün hava sahalarının serbest rotalı olması ve hava sahası geçişlerinde giriş-çıkış noktalarının oldukça verimli planlanmış olması gerekmektedir.

Günümüz koşullarında ne yazık ki bütün hava sahaları homojen yapıda değildir. Bazı ülkeler serbest rotalı hava sahasını kullanırken bazıları sabit rotalı hava sahasını kullanmaktadır. Bazı ülkelerde de serbest rotalı hava sahasına geçiş çalışmaları kademeli olarak sürdürülmekte ve karma yapı kullanılmaktadır. Bu karma yapıda sadece belirli zamanlar ya da belirli sektörlerde serbest rotalı hava sahası kullanılmaktadır. Bu durum farklı yapıdaki komşu hava sahalarına geçişlerde bazı sorunları beraberinde getirmektedir. Serbest ve sabit rotalı hava sahalarını kullanarak gerçekleştirilecek olan uçuşlar için uçuş planlarının oluşturulması bu sorunlardan bir tanesidir. Uçuş planları kalkış havalimanından varış havalimanına kadar uçuş boyunca katedilecek olan tüm hava sahalarında kullanılacak olan rotaları belirtmelidir. Serbest rotalı hava sahasından-sabit rotalı hava sahasına, sabit rotalı hava sahasından-serbest rotalı hava sahasına yapılacak olan geçişlerde kullanılacak olan geçiş noktalarının belirlenmesi rota yapısını etkilemektedir. Bu nedenle planlanacak olan rota için farklı hava sahası yapılarını dikkate alan bütüncül bir bakış açısı gerekmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında serbest ve sabit rotalı hava sahalarının iç içe yer aldığı durumlarda hem hava sahası yapılarını hem de mevcut uçuş taleplerini bir bütün olarak ele alan en iyi rota planlamasının yapılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda planlama aşamasında yapılacak olan rota atamalarının toplam yakıt tüketimini, yer gecikmelerini ve hava gecikmelerini en aza indirecek şekilde oluşturulabilmesi için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla gerçekleştirilen optimizasyon süreçlerinde matematiksel model geliştirilmiş ve daha sonra da büyük ölçekli problemler için tavlama benzetimi yöntemi probleme uyarlanmıştır.

2. KAYNAK TARAMASI

Havacılık faaliyetlerinin gerçekleştirildiği hava sahasının kısıtlı bir kapasiteye sahip olması bu kapasitenin son derece verimli kullanılmasını gerekli kılmaktadır. Hava trafik akış ve kapasite yönetimi mevcut hava sahası kaynağını en verimli şekilde kullanarak hava sahası kullanıcılarının taleplerini karşılamayı amaçlamaktadır. Hava sahası kapasitesini verimli kullanabilmek etkin bir planlama ve optimizasyon süreci ile mümkündür. Hava sahası kapasitesini etkin şekilde kullanabilmek için gerçekleştirilen faaliyetlerden bir tanesi rota planlamasıdır. Hava sahası kullanıcıları kalkış ve varış havalimanları arasında yer alan uçuş rotalarını kullanarak uçuşlarını planlamaktadırlar. Yapılan rota planlamaları kullanılacak olan hava sahasına, rota yapılarına, yol kapasitelerine, tahditli hava sahalarına, tehlikeli hava sahalarına, yasaklı hava sahalarına, NOTAM'lar ile belirtilmiş özel durumlara ve meteorolojik koşullara bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir.

Pek çok farklı değişken etkene bağlı olan rota planlaması üzerine pek çok farklı akademik çalışma yürütülmüştür. Ruther ve arkadaşları uçak rota planlaması çalışmalarını uçuş mürettebatı atamaları ve uçak atamalarını dikkate alan bütüncül bir yaklaşım ile gerçekleştirmişlerdir (Ruther, Bolan, Engineer, & Evans, 2017). Gerçekleştirdikleri çalışmada uçak rota planlamalarını uçuş ekibi eşleşmelerini ve hava yolu filosundaki her bir uçağın kendi gereksinimlerini dikkate alarak gerçekleştirmişlerdir. Yang ve arkadaşları birden fazla uçak için bütün emniyet kısıtlarını dikkate alan gerçek zamanlı rota planlaması üzerine çalışmışlardır (Yang, Nan, & Tong, 2018). Sun ve arkadaşları insansız hava araçları için gerçek zamanlı rota planlaması üzerinde çalışmalar yürütmüştür (Sun, Zhang, Wang, & Jiao, 2011). Shudao ve arkadaşları insansız hava araçları rota planlaması üzerinde çalışmışlar ve karınca kolonisi optimizasyon yöntemleri ile simülasyon yöntemlerini kullanmışlardır (Shudao, Jun, & Yongqi, 2012). Liu ve arkadaşları birden fazla kısıt altında rota planlaması üzerinde çalışmışlardır (Liu, Wang, Hong, & Hong, 2020). Seenivasan ve arkadaşları birden çok hava aracı için dört boyutta rota planlaması üzerine çalışmışlardır (Seenivasan, Olivares, & Staffetti, 2020). Gerçekleştirdikleri çalışmada meteorolojik koşulları dikkate alarak fırtına oluşumlarından kaçınan, mevcut hava sahasında yer alan prosedürleri ve ayırma minimumlarını dikkate alan dört boyutta yörünge planlaması gerçekleştirmişlerdir. Lu ve arkadaşları hafif kategorideki akrobasi uçakları için rota planlaması amacı ile çalışmalar gerçekleştirmiştir (Lu, Lee, & Wang, 2013). Yaptıkları çalışmada uçakların hem yeryüzü

manialarından sakınmalarını sağlayacak hem de yerleşim alanlarına olan etkilerini en aza indirecek uygun rota planlamasını oluşturmaya çalışmışlardır. Liu ve arkadaşları uçak rota planlama problemlerine uygun çözüm yönteminin belirlenmesi amacı ile çalışmalar ve sınıflandırmalar gerçekleştirmişlerdir (Liu, Tang, Li, & Wang, 2009).

Rotalama problemlerine çözüm aramak için gerçekleştirilen pek çok çalışmanın yanında optimizasyon çalışmaları da yürütülmüştür. Optimizasyon çalışmaları ile belirli kısıtlar altında belirli bir amaca yönelik en iyi rota planlamasının bulunabilmesi için çalışılmıştır. Gao ve Zheng kaos genetik algoritmaları kullanarak rota optimizasyonu çalışmaları gerçekleştirmişlerdir (Gao & Zheng, 2010). Yaptıkları çalışma ile rotalama problemlerini üç boyuttan iki boyuta dönüştürerek belirli kısıtlar altında en iyi yörüngeyi belirlemeyi amaçlamışlardır. Hui ve arkadaşları rotalama problemlerine parçacık sürüsü optimizasyon yöntemi ile çözüm bulmaya çalışmışlardır (Hui, Xin, & Min, 2010). Xu ve arkadaşları aerodinamik etkileri dikkate alarak birden fazla uçaktan oluşan kol uçuşunda rota optimizasyonu üzerinde çalışmalar yürütmüşlerdir (Xu, Ning, Bower, & Kroo, 2014). Marzuoli ve arkadaşları yol safhasındaki uçuşlara yönelik veri tabanlı optimizasyon süreci geliştirmişlerdir (Marzuoli, Gariel, Vela, & Feron, 2014). Gerçekleştirdikleri çalışmada kontrolör iş yükünü ve meteorolojik koşulların etkilerini dikkate alacak şekilde yol safhasındaki uçuşların optimizasyonunu amaçlamışlardır. Mendoza ve arkadaşları yapay arı kolonisi algoritması yardımı ile yol safhasındaki uçuşlar için dört boyutta yakıt verimli uçuş yörüngelerinin belirlenmesi üzerine çalışmışlardır (Mendoza, Botez, & Bunel, Four-dimensional aircraft en route optimization algorithm using the artificial bee colony, 2018). Azadeh ve arkadaşları VFR (Visual Flight Rules Görerek Uçuş Kuralları) olarak gerçekleştirilecek olan uçuşlar için minimum uçuş süresini amaçlayan çakışmasız rotaların belirlenmesi amacı ile iki aşamalı bir optimizasyon algoritması geliştirmişlerdir (Azadeh, Bierlaire, & Maknoon, 2019). Ho-Huu ve arkadaşları kalkış rotalarının tasarımı ve atanmasına yönelik optimizasyon süreci geliştirmişlerdir (Ho-Huu, Hartjes, Visser, & Curran, 2019). Ho-Huu ve arkadaşları bir başka çalışmalarında ise terminal rotalarında gürültü azaltmaya yönelik ayırtırmaya dayalı çok amaçlı evrimsel algoritma kullanarak optimizasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir (Ho-Huu, Hartjes, Geijselaers, Visser, & Curran, 2017). Barea ve arkadaşları terminal sahası yaklaşma rotası seçimi, pist atama ve uçak yörünge optimizasyonu süreçlerini bütüncül olarak ele alan optimizasyon çalışmaları gerçekleştirmişlerdir (Barea, Celis, & Cadasro, 2019). Jevtic ve arkadaşları karınca

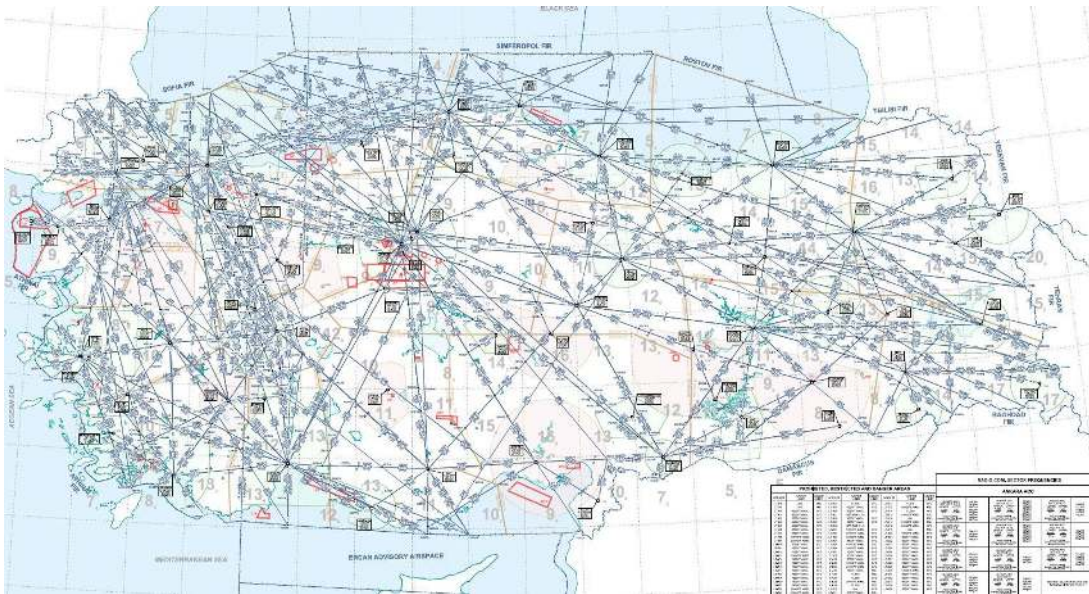
sistemi algoritması ile insansız hava araçlarının tanımlı görevleri sırasında uçuş mesafesini en aza indiren optimizasyon çalışmalarında bulunmuşlardır (Jevtic, Andina, Jaimes, Gomez, & Jamshidi, 2010). Motta ve arkadaşları kıyıdan uzakta gerçekleştirilen helikopter operasyonları için genetik algoritmalar ile yakıt tüketimini ve uçuş mesafesini en aza indirmeye çalışan optimizasyon çalışmaları gerçekleştirmişlerdir (Motta, Vieira, & Soletti, 2011). Tian ve arkadaşları gecikme maliyetlerine göre rota seçim yöntemlerinin belirlenmesinde rassal simülasyonlar ile optimizasyon çalışmaları gerçekleştirmişlerdir (Tian, Ye, Estupina, & Wan, 2018). Mendoza ve arkadaşları ele aldıkları rota probleminde dikey uçuş profillerini uçuş maliyetini en aza indireyecek şekilde belirlemeye çalışmışlardır (Mendoza, Ternisien, Beuze, & Botez, 2018).

Hava araçları için gerçekleştirilen rota optimizasyonu çalışmalarında farklı kısıtlar altında farklı amaçların en iyilenmesine çalışılmıştır. Yapılan çalışmalara bakıldığında analitik modellerle birlikte sezgisel ve meta sezgisel yöntemlerin kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca gerçekleştirilen çalışmaların çoğunda yakıt tüketimi ya da uçuş mesafesinin azaltılmasına yönelik optimizasyonların yapıldığı görülmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında serbest ve sabit rotalı hava sahalarının iç içe yer aldığı durumlarda hem hava sahası yapılarını hem de mevcut uçuş taleplerini bir bütün olarak ele alan bir optimizasyon çalışmasının yapılması amaçlanmaktadır. Bu sayede serbest rotalı hava sahalarında yapılacak olan rota planlamasında sabit rotalı hava sahalarının etkilerinin de dikkate alınması ve resmin tamamı için bir optimizasyon sürecinin gerçekleştirilmesi sağlanacaktır. Yapılacak olan optimizasyon çalışmaları ile yakıt maliyetlerini, yer gecikmesi maliyetlerini ve hava gecikmesi maliyetlerini dikkate alan; toplam maliyeti en küçükleyen çakışmasız rota planlamasının yapılması amaçlanmaktadır. Çalışmada yer alan kısıtlar ile hava sahası rota yapıları, yol kapasiteleri, uygulanan ayırma minimumları gibi rota planlamasına etki eden pek çok dinamik etken incelenebilecektir. Geliştirilecek olan optimizasyon süreci ile hava sahası ağ yöneticisine hava trafik akış ve kapasite yönetimi amacı ile rehberlik sağlayabilecek olan bir karar destek mekanizmasının elde edilmesi amaçlanmaktadır.

3. PROBLEMİN TANIMLANMASI

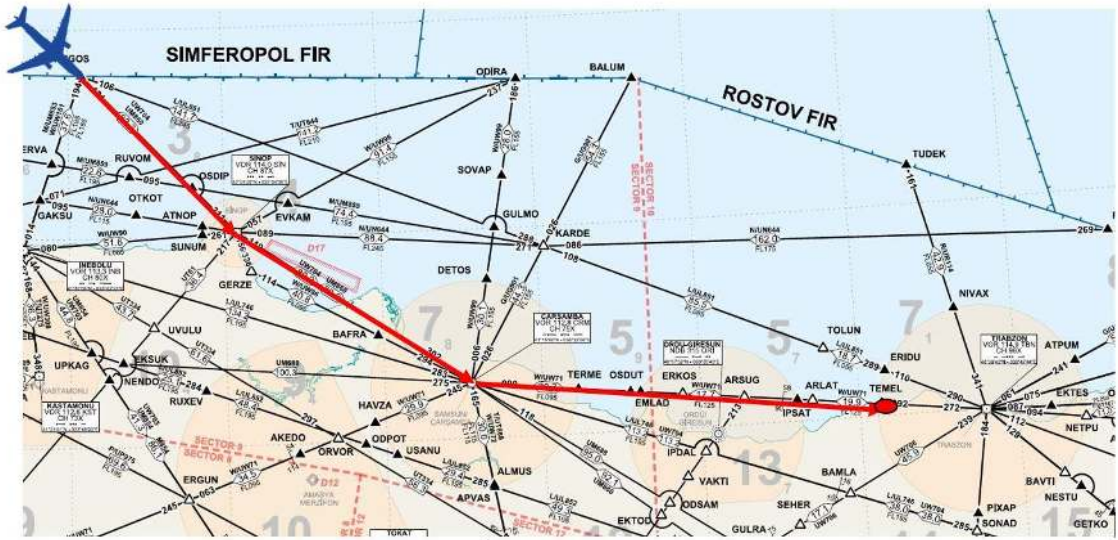
Havacılık sektörü gün geçtikçe gelişmekte ve hızla büyümektedir. EUROCONTROL 2025 yılı için 2019 yılına göre %12,16'lık bir artış ile toplamda 12,47 milyon IFR uçuşun gerçekleşeceğini öngörmektedir (EUROCONTROL, EUROCONTROL seven-year forecast autumn, 2019). Hava trafiğindeki bu artış hava sahasının etkin ve verimli kullanımını giderek önemli hale getirmektedir. Bir hava sahasının kapasitesini etkileyen unsurlar olarak ayırma minimumları, seyrüsefer ekipmanları ve hassasiyetleri, tahditli ve yasak sahalar, rota konfigürasyonu, yol ağı, sektörizasyon, sektör geçişleri, hava durumu, kontrolör iş yükü ve pilot reaksiyon süresi sayılabilir (Tobaruela, Majumdar, & Ochieng, 2012). Bu unsurlardan rota konfigürasyonu hava sahası kapasitesini oldukça etkilemektedir. Hava sahası üzerinde seyrüsefer yardımcı sistemleri ile oluşturulan belirlenmiş yol noktalarının bir araya getirilmesi ile hava yolları; bu yolların bir araya getirilmesi ile de rotalar oluşturulmaktadır. Günümüzde konvansiyonel sistemde hava araçları hava trafik kontrolörünün gözetimi altında uçuş planlarında belirttikleri bu rotaları kullanmaktadırlar. Uçuş rotalarında kullanılan hava yolları iki ya da daha fazla yol noktasının bir araya getirilmesi ile oluşturulmuştur. Bu yollar kendi içlerinde dikeyde farklı irtifalara ayrılmaktadır. Uçuşların gerçekleştirildiği ve hava trafik hizmet sağlayıcısınınca tasarlanıp ilan edilen uçuş yollarının bir örneği Şekil 3.1'de yer almaktadır.



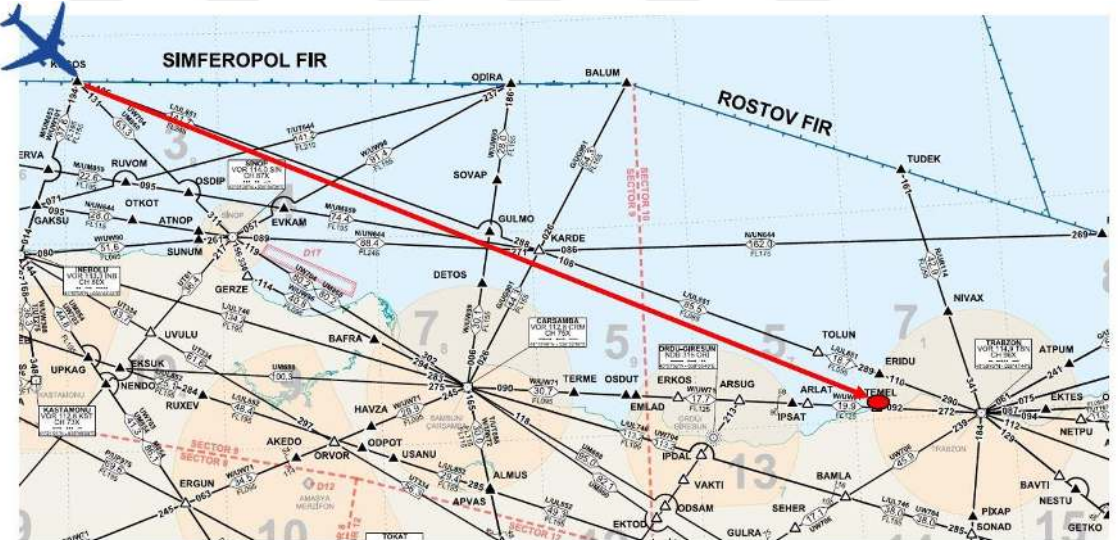
Şekil 3.1. Türkiye Hava Sahası hava trafik hizmet yol ağı (DHMI, 2019)

Belirli rotalar üzerinden uçuşun gerçekleştirilmesi hava trafiğinin yönetimi, yörünge tahmini ve çakışma saptama açısından kolaylık getirir de uçuş profili açısından uygun olmayan bir rota yapısı oluşabilmektedir. Pek çok uçak için yakıt zaman maliyetini optimize kılan rota kalkış ve varış meydanları arasındaki en kısa mesafe yani “great circle distance” (GCD) dır. Ancak sabit tanımlı rotalardan oluşan bir hava sahasında çoğu zaman GCD mesafesince uçmak neredeyse olanaksızdır. Rotaların yapısı çoğu zaman GCD mesafesinin dışında farklı bir yapıda olmaktadır. Bu da hava araçlarının hava sahasını daha fazla meşgul etmesine ve daha uzun süreli uçuşlara neden olmaktadır. Bu durum hava sahası kapasitesini olumsuz etkilemektedir.

Konvansiyonel sistemde yer alan hava seyrüsefer hizmet sağlayıcısının tasarladığı hava sahası ve hava yolu yapısının kapasiteye olan bu olumsuz etkisini azaltmak amacı ile EUROCONTROL 2008 yılında “Serbest Rotalı Hava Sahası” (Free Route Airspace FRA) kavramını ortaya çıkarmıştır. Serbest rotalı hava sahasında hava sahası kullanıcıları, hava trafik kontrolörünün gözetimi altında giriş ve çıkış noktaları arasında standart hava trafik yol ağına bağlı kalmaksızın; dilediği şekilde yayınlanmış veya yayınlanmamış yol noktalarını seçerek kendi rotasını oluşturabilir ve bu rotada uçuşunu gerçekleştirebilir. Serbest rotalı hava sahası bu yapısı ile hava sahası kullanıcılarına daha esnek rotalar sunmaktadır. Serbest rotalı hava sahalarının sunduğu direkt rotalar sayesinde uçuş mesafesi günlük bazda 500.000 NM kısalmakta bu da yaklaşık 3.000 ton yakıt tasarrufu dolayısıyla emisyon değerlerinde 10.000 ton azalma sağlayarak 3 milyon Avroluk bir tasarruf oluşturmaktadır (EUROCONTROL, 2020). Sabit rotalı hava sahası ile serbest rotalı hava sahası rota planlamasındaki temel farklılık Şekil 3.2 ve Şekil 3.3 de görülmektedir.



Şekil 3.2. Sabit rotalı hava sahası için Kugos-Temel noktaları arası rota planlaması



Şekil 3.3. Serbest rotalı hava sahası için Kugos-Temel noktaları arası rota planlaması

Serbest rotalı hava sahalarının hava sahası kapasitesi, yakıt verimliliği, zaman tasarrufu ve çevreye verdiği emisyon oranlarındaki azalma sayesinde tercih edirliliği her geçen gün artmaktadır. Ancak serbest rotalı hava sahalarının uygulamaya alınmasında bazı zorluklar yer almaktadır. İniş kalkış trafiklerinin serbest rotalı hava sahasına geçişleri, farklı ülke hava sahaları arasındaki geçişler, tahditli ve yasaklı hava sahaları, farklı yol yapılarını kullanan hava trafik hizmet sağlayıcıları serbest rotalı hava sahalarının uygulanmasında karşılaşılan problemlerden bazılarıdır.

Bu tez çalışmasında heterojen olarak dağılmış sabit rotalı ve serbest rotalı hava sahalarını içeren geniş bir hava sahası için rota planlaması ve planlanan rotanın optimizasyonu amaçlanmaktadır. Her ülke kendi hava sahası içerisinde serbest rotalı ya da sabit rotalı hava trafik hizmeti sunabilmektedir. Özellikle farklı ülkelerin hava sahası geçiş bölgelerinde serbest rota yapısından sabit rota yapısına ya da sabit rota yapısından serbest rota yapısına geçişler yaşanmaktadır. ECAC bölgesinde yer alan ülkelerin 2020 yıl sonu itibari ile serbest rotalı hava sahasına geçişi Şekil 3.4 de yer almaktadır.

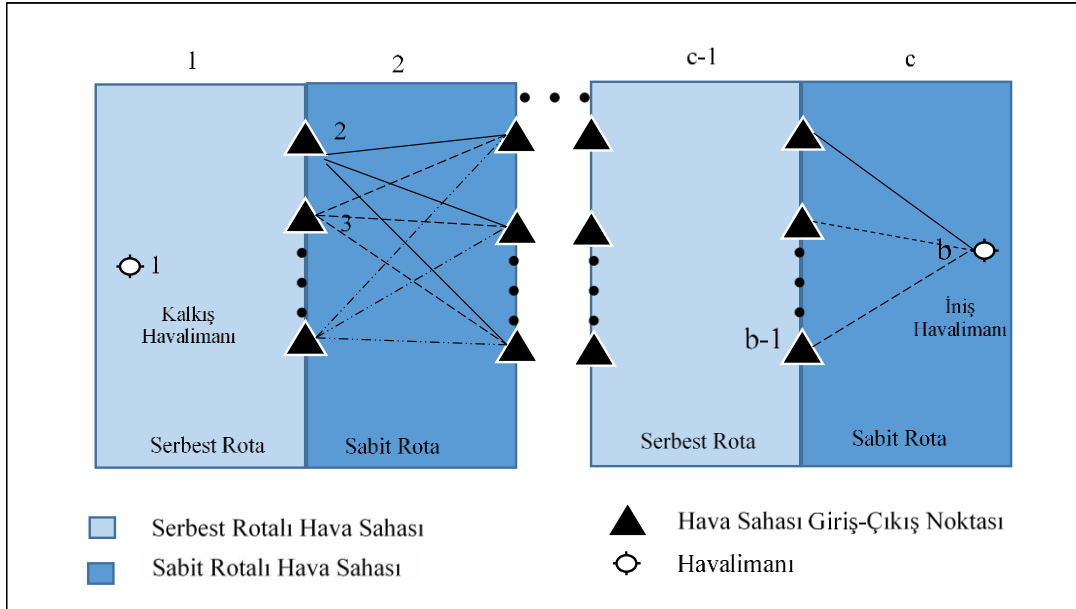
Şekil 3.4. 2020 yıl sonu için EUROCONTROL tarafından planlanan serbest rotalı hava sahaları (EUROCONTROL, 2020)

sahalarının iç içe heterojen bir yapı oluşturduğu durumlarda rota planlaması ve optimum rota arayışları gerekmektedir.

Bu tez çalışmasının temel amacı serbest ve sabit rotalı hava sahalarından oluşan karma yapılı hava sahalarında uçuşlar için maliyeti en küçükleyen optimum rota planlamasının yapılmasıdır. En küçüklenmesi istenilen maliyet içerisinde yakıt maliyeti, yer gecikmesi maliyeti ve hava gecikmesi maliyeti yer almaktadır.

Problem olarak serbest ve sabit rotalı hava sahalarını iç içe barındıran örnek bir hava sahası karmaşı ele alınacaktır. Serbest ve sabit rotalı hava sahalarından oluşan bu örnek hava sahasını kullanacak olan her bir uçak için maliyet fonksiyonu belirlenerek, rota optimizasyonu için bu maliyet fonksiyonunun en küçüklenmesi yoluna gidilecektir.

Serbest ve sabit rotalı hava sahalarının iç içe kullanıldığı karma hava sahalarında hava sahasının bir bütün olarak ele alınması ve buna göre bir rota planlaması ve optimizasyonu gerekmektedir. Bu amaçla farklı rota yapılarına sahip olan hava sahaları üzerinden gerçekleştirilecek uçuşlar için rota planlaması aşamasında en iyi rotanın belirlenmesi amacıyla bir karar destek sisteminin oluşturulması amaçlanmıştır. Şekil 3.5’de problem olarak ele alınan jenerik bir karma hava sahası yapısının şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 3.5. Problem olarak ele alınan serbest ve sabit rotalı hava sahalarından oluşan karma yapı

Verilen jenerik gösterimde serbest ve sabit rotalı hava sahalarından oluşan karma bir yapı yer almaktadır. Serbest rotalı hava sahalarında yapılandırılmış bir rota

bulunmadığı için şekildeki gösterimde serbest rotalı hava sahası için rotalar çizilmemiştir. Şekilde belirtildiği üzere kalkış havalimanından kalkan hava aracı, b adet farklı rota yapısına sahip hava sahasını kat ettikten sonra iniş havalimanına inişini gerçekleştirmektedir. Bu süreç içerisinde her bir hava aracı; tanımlanan hava sahası ve havalimanı kapasitelerini geçmemek koşulu ile kendisine en uygun rotayı planlamak isteyecektir. Her bir hava aracı için en uygun rota; maliyeti en aza indirgeyen rotadır. Maliyet parametreleri arasında yakıt maliyeti, yer gecikmesi maliyeti ve hava gecikmesi maliyeti dikkate alınmıştır. Bu koşullar altında problemin çözümü amacıyla tüm uçuş talepleri için kalkış havalimanından iniş havalimanına kadar yakıt maliyeti, yer gecikmesi maliyeti ve hava gecikmesi maliyetini en aza indiren en iyi rotaların belirlenmesi amaçlanmaktadır.

3.1. Probleme Ait Kabuller

Problem kapsamında incelenen hava sahasında aşağıda listelenen kabuller geçerli olacaktır;

- Tek bir kalkış havalimanı bulunmaktadır.
- Tek bir iniş havalimanı bulunmaktadır.
- Uçuşların tamamı tek bir uçuş seviyesini (FL350) kullanmaktadır.
- Hesaplamalara kalkış fazı dahil edilmemiştir.
- Hesaplamalara tırmanma fazı dahil edilmemiştir.
- Hesaplamalara alçalma fazı dahil edilmemiştir.
- Hesaplamalara iniş fazı dahil edilmemiştir.
- Yapılan tüm hesaplamalar FL350 seviyesinde nominal ağırlık seviyesine göre verilen BADA verilerine göre gerçekleştirilmiştir.
- Çakışma önleme amacıyla uçaklara sadece vektör manevrası verilebilecek olup hız ya da seviye değişimi yapılmayacaktır.
- Hava sahası serbest ve sabit yol yapısına sahip heterojen dağılımlı birden çok FIR dan oluşmaktadır.
- TMA etkileşimleri analize dahil edilmemiştir.
- Dönüş manevralarından kaynaklı yakıt sarfiyatındaki artış hesaplamalara dahil edilmemiştir.
- Uçaklar arası ayırma minimumu zaman esaslı olarak kontrol edilmiştir.

Bütün hesaplamalar ve çözümler bu kabuller doğrultusunda gerçekleştirilecektir.

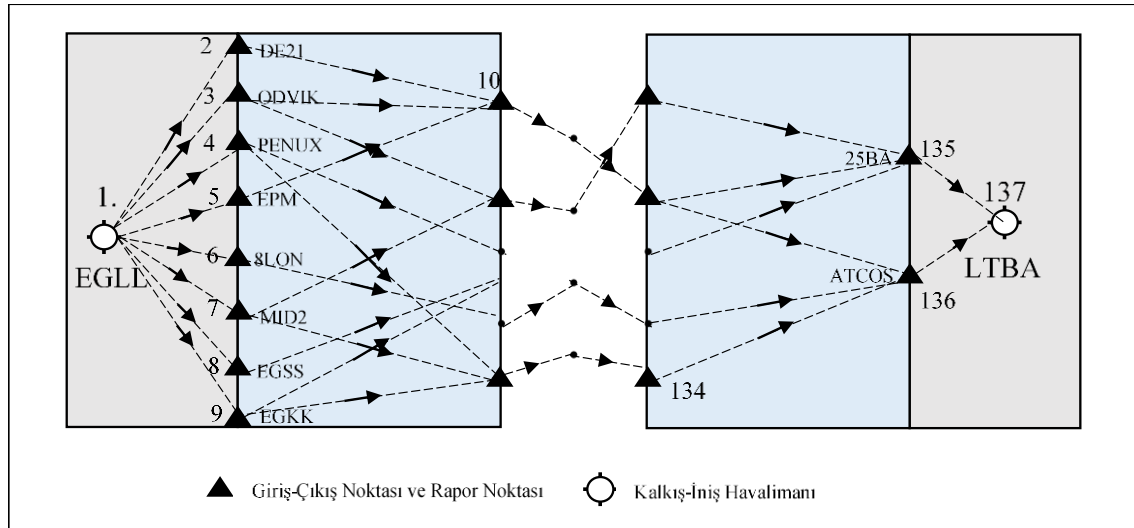
3.2. Probleme Ait Veriler

Ele alınacak problem için gerçek veriler ve gerçek verilerden türetilmiş veriler ile çözümler ve analizler gerçekleştirilmiştir. Problem için temel senaryonun oluşturulması amacı ile gerçek hava trafik verileri analiz edilmiştir. Bu kapsamda 30 Nisan 2018 tarihinde Avrupa hava sahasında gerçekleşen bütün uçuşlar incelenmiştir (EUROCONTROL, Demand Data Repository (DDR), 2018). Bu uçuşlardan İstanbul varış merkezli olan toplam 739 uçuş filtrelenmiştir. 739 uçuşa ait rota bilgileri MATLAB programı yardımı ile analiz edilmiş ve rota ağ yapısı çıkarılmıştır. Çıkarılan ağ yapısında İstanbul varış noktasına uzanan 739 rotada toplam 2321 yol noktası belirlenmiştir. Belirlenen 2321 yol noktasının aralarındaki bağlantılar ve yol yapıları matris olarak elde edilmiştir. Bu uçuşlar arasından hem sabit rotalı hem de serbest rotalı hava sahalarını kat ederek İstanbul'a geliş sağlayan Londra-İstanbul uçuşları seçilmiştir. Bu kapsamda 30 Nisan 2018 tarihinde 13 farklı Londra-İstanbul uçuşu ayrıca incelenmiştir. Bu uçuşlardan 10 tanesi Londra Heathrow Havalimanı, 2 tanesi Londra Gatwick Havalimanı ve 1 tanesi de Londra Stansted Havalimanı kalkışlıdır. Uçuşlara ait uçak tipleri, gerçekleşen kalkış saatleri ve radar verilerine göre tükettikleri yakıt miktarları Tablo 3.1'de yer almaktadır. Problem kabullerinde tek bir kalkış havalimanı ve tek bir iniş havalimanı mevcut olduğu için Londra-İstanbul arasında gerçekleşen uçuşların tamamının tek bir havalimanından Londra Heathrow Havalimanından kalktığı varsayılmıştır. Stansted Havalimanı ve Gatwick Havalimanı Londra Heathrow dan sonra olası yol noktaları olarak tanımlanmıştır. Böylelikle uçuşların Gatwick ve Stansted Havalimanları üzerinden gelmesi de modellenebilmiştir. Gerçekleşen uçuşlar incelendiğinde A320, A321, B738 ve B77W uçaklarının kullanıldığı görülmektedir. Bu nedenle bu uçak tipleri için gerekli parametre değerleri ayrıca incelenmiştir. Gerçekleşen 13 farklı uçuş, sabit ve serbest rotalı hava sahaları üzerinde toplam 137 farklı yol noktasını kullanarak İstanbul'a varmıştır. Kullanılan 137 farklı yol noktasının tamamının birbirleri ile olan bağlantıları analiz edilmiştir. Yapılan analizlerde 137 yol noktasının aralarındaki yol bağlantısını veren hava trafik yol ağı çıkarılmıştır. Çıkarılan yol ağı matematiksel modele girilmeye hazır hale getirilmiştir.

Tablo 3.1. 30 Nisan 2018 tarihli Londra-İstanbul uçuşları

Kalkış Havalimanı	IATA Kodu	Uçak Tipi	Kesin Kalkış Zamanı	Tükettiği Yakıt Miktarı (kg)
Londra Heathrow Havalimanı	LHR	A320	30.04.2018 09:24	8169
		A320	30.04.2018 17:12	7909
		B77W	30.04.2018 16:18	27177
		A321	30.04.2018 05:47	10544
		A321	29.04.2018 21:21	10162
		A321	30.04.2018 21:24	10086
		A321	30.04.2018 13:22	10045
		B77W	30.04.2018 11:23	27001
		B77W	29.04.2018 18:04	25376
		B77W	30.04.2018 17:31	26261
Londra Gatwick Havalimanı	LGW	A321	30.04.2018 09:53	10432
Londra Gatwick Havalimanı	LGW	A321	30.04.2018 16:12	10239
Londra Stansted Havalimanı	STN	B738	30.04.2018 12:41	8187

Şekil 3.6’da matematiksel modele aktarılan hava sahası yapısı verilmiştir. Her bir havalimanı ve yol noktası 1’den 137’ye kadar sıralanmıştır. 1. yol noktası Londra Heathrow Havalimanı iken 137. yol noktası ise İstanbul Atatürk Havalimanı olmuştur. Şekilde de belirtildiği üzere Londra Stansted Havalimanı (EGSS) ile Gatwick Havalimanı (EGKK) Londra Heathrow Havalimanından sonra birer yol noktasıymış gibi tanımlanmıştır.



Şekil 3.6. Londra-İstanbul arası uçuş rotalarının gösterimi

Bu şekilde birden fazla havalimanı tek bir havalimanıymış gibi modele aktarılmıştır. Londra Heathrow Havalimanından Londra Stansted ve Gatwick

Havalimanlarına olan mesafeler 0 olarak alınmıştır. Bu sayede herhangi bir ek yakıt maliyeti ya da uçuş süresi olmaksızın uçuşun sanki direkt Stansted ya da Gatwick Havalimanından kalkışı modellenebilmiştir. Şekil 3.6’da görüleceği üzere hava trafik akışı Londra’dan İstanbul yönünde tek yönlü olarak ele alınmıştır.

Londra İstanbul arasında gerçekleşen örnek uçuşlarda yer alan 13 uçak ile ilgili model için gerekli olan trafik verilerin tamamı aşağıda Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Uçaklara ait veriler

Uçak ID	Uçak Tipi	Hız	Yakıt Tüketim Katsayısı	Yakıt Maliyeti	Yer Gecikmesi Maliyeti	Hava Gecikmesi Maliyeti	Planlanan Kalkış Zamanı	Yer Gecikmesi Limiti
		knot	kg/dk.	Euro/kg	Euro/dk.	Euro/dk.	dk.	dk.
1	A320	450	41,8	0,8	15,00	58,17	5	30
2	A320	450	41,8	0,8	15,00	58,17	10	30
3	B738	450	41,7	0,8	16,83	60,83	15	30
4	A321	450	46,2	0,8	17,50	68,83	20	30
5	A321	450	46,2	0,8	17,50	68,83	25	30
6	A321	450	46,2	0,8	17,50	68,83	30	30
7	A321	450	46,2	0,8	17,50	68,83	35	30
8	A321	450	46,2	0,8	17,50	68,83	40	30
9	A321	450	46,2	0,8	17,50	68,83	45	30
10	B77W yerine A332	473	96,5	0,8	28,67	120,33	50	30
11	B77W yerine A332	473	96,5	0,8	28,67	120,33	55	30
12	B77W yerine A332	473	96,5	0,8	28,67	120,33	60	30
13	B77W yerine A332	473	96,5	0,8	28,67	120,33	65	30

Uçaklarla ilgili parametrelerdeki uçuş hızı ve yakıt tüketim katsayısı BADA verilerinde yer alan FL350 için geçerli olan nominal uçuş hızı ve nominal yakıt tüketim değerleridir. Yer gecikmesi ve hava gecikmesi maliyet değerleri ise Avrupa Havayolları Gecikme Maliyeti referans değerleri (Cook & Tanner, 2015) temel alınarak oluşturulmuştur. Referans alınan bu gecikme maliyeti değerleri; gecikmelerden kaynaklı yakıt, bakım, mürettebat, yer hizmetleri, yolcu konaklama, havalimanı ücretleri gibi pek çok maliyet kalemini barındırmaktadır. İlgili referans değerlerinde B77W uçak tipinin yer almaması nedeni ile bu uçak tipi yerine A332 uçak tipi kullanılmıştır. Bu durum tabloda belirtilmektedir. Parametrelerde yer alan planlanan kalkış zamanı gerçek verilerdeki kalkış saatlerinden farklı olarak belirlenmiştir. Gerçek verilerde yer alan kalkış saatleri 24 saatlik gün içerisinde gerçekleşen 13 farklı tarifeli uçuşa ait olduğu için bu saatler arasında oldukça uzun süreler bulunmaktadır. Özellikle rotalar üzerinde yaşanabilecek çakışmaları analiz edebilmek adına planlanan kalkış zamanlarının birbirlerine yakın

olması amaçlanmıştır. Bu nedenle planlanan kalkış zamanları ise beşer dakika arayla belirlenmiştir.



4. UÇUŞ PLANLAMASI

Havacılık faaliyetlerinin tamamında etkin planlama uçuş emniyeti açısından son derece önemli bir faktördür. Uçuş planlaması da bu faktörlerden birisidir. Gerçekleştirilecek olan bir uçuş için kalkış havalimanından varış havalimanına kadar uçuşun tamamını kapsayan rotanın oluşturulması ve planlanması gerekmektedir. Yapılacak olan bu planlama ile uçağın hangi yol noktalarını kullanacağı ve hangi uçuş seviyesinde uçuşunu gerçekleştireceği netlik kazanmış olacaktır. Hava trafik kontrol hizmeti olarak gerçekleştirilecek olan bütün uçuşlar için uçuş planı doldurması zorunludur (ICAO Annex 2, 2005). Doldurulacak olan uçuş planı; uçak tanıtımı, uçuş tipi (VFR/IFR), uçak kuyruk türbülans kategorisi, uçağa ait ekipmanlar, kalkış havalimanı, tahmini takoz çekme zamanı, uçuş hızı, uçuş seviyesi, uçuş rotası, varış havalimanı, tahmini uçuş süresi, alternatif havalimanı, yakıt miktarı, toplam yolcu ve mürettebat sayısı, acil durum ekipmanları ve diğer gerekli bilgileri içermelidir. Bu bilgiler doğrultusunda oluşturulan uçuş planları hava trafik akış ve kapasite yönetimi kapsamında değerlendirilmek üzere merkezi bir uçuş planı işleme ve dağıtım birimine gönderilmelidir (ICAO Doc 7030, 2008).

Avrupa ülkelerinin içerisinde yer aldığı uçuş planlarından sorumlu birim EUROCONTROL tarafından oluşturulan Network Manager Operations Center'dır (NMOC Ağ Yöneticisi Harekatlar Merkezi). Bu birim gelen tüm uçuş planlarını değerlendirerek; gelen uçuş taleplerinin hava trafik hizmetlerini aksatmadan emniyetli ve düzenli bir şekilde karşılanabilmesi için görev üstlenmektedir. Bu görev kapsamında NMOC mevcut hava sahası yapısı ve kapasitesi doğrultusunda gelen uçuş planlarını kabul edebilir, reddedebilir ya da belirli değişikliklere tabi tutarak yeniden düzenlenmesini talep edebilir. Bu kapsamda o anki uçuş taleplerinin tamamını bilen NMOC bütün uçuşlar için gerekli planlamaların koordinasyonunu sağlamış olur. Bu koordinasyonları sağlarken Air Traffic Flow and Capacity Management (ATFCM Hava Trafik Akış ve Kapasite Yönetimi) ilkeleri çerçevesinde mevcut hava sahası kapasiteleri doğrultusunda uçuş taleplerini karşılamaya çalışır.

NMOC uçuş planları için Integrated Initial Flight Plan Processing System'i (IFPS Uçuş Planı Entegre İşlem Sistemi) kullanmaktadır. Bu kapsamda tüm uçuşlara ait uçuş planları havayolu işleticileri ya da ilgili hava trafik üniteleri tarafından IFPS'ye girilmektedir. Havayolu işleticileri planlanan uçuş bilgilerini tahmini takoz çekme

zamanından en az 3 saat öncesine kadar IFPS'ye girmelidir (EUROCONTROL, IFPS user manual, 2019). Girilen uçuş planlarında en önemli kısım uçuşun gerçekleştirileceği rota bilgisidir. Bu bilgi için kalkış havalimanından varış havalimanına kadar uçağın takip edeceği bütün yol noktalarının planda belirtilmesi gerekmektedir. Bu aşamada hava sahasının sabit rotalı ya da serbest rotalı olması durumuna göre bazı farklılıklar bulunmaktadır.

4.1. Sabit Rotalı Hava Sahalarında Rota Planlaması

Sabit rotalı hava sahaları günümüzde geleneksel olarak kullanılan ve belirlenmiş olan yol noktaları ve bu yol noktaları arasında belirlenen hava yollarından oluşan sabit yapıyı ifade etmektedir. Air Navigation Service Provider (ANSP Hava Seyrüsefer Hizmet Sağlayıcısı) tarafından belirlenen yol noktaları ve havayollarına ait tüm bilgiler Aviation Information Public 'de (AIP Havacılık Bilgi Yayını) yayınlanır. AIP de yer alan bu yol noktaları Central Airspace and Capacity Database 'e de aktarılır (CACD Merkezi Hava Sahası ve Kapasite Veri Bankası). Sabit rotalı hava sahalarını kullanacak olan havayolu işletmecileri uçuş planlaması yaparken sabit rotalı hava sahalarında CACD'de belirtilen yol noktaları ve hava yolları alternatifleri arasından seçim yaparak uçuş planı oluşturabilmektedir. CACD'de yer alan yapı tamamıyla ANSP'ler tarafından oluşturulan yol noktaları ve havayollarının yapısına bağlıdır. Sabit rotalı hava sahası kapsamında ANSP'ler tarafından belirlenmemiş ve AIP de yer almayan herhangi bir koordinat için rota planlaması yapılamamaktadır. NMOC, IFPS üzerinden aktarılan tüm uçuş planlarını kabul etmeden önce çok yönlü kontroller gerçekleştirir. Planın doğru girilip girilmediği, uçuş planında belirtilen yol noktalarının CACD'de yer alıp almadığı, planlanan rotanın kullanıma uygunluğu gibi şekilsel ve mantıksal kontroller sağlanır (EUROCONTROL, NM flight planning requirements guiedlines edition 1.3, 2020). Bu kontrollerin ardından IFPS sistemine girilen tüm uçuşlar için 4 boyutlu yörünge hesaplamaları gerçekleştirilir. Bu yörünge hesaplamaları ile planlanan uçuşların mevcut hava sahası kapasitesi kısıtı altında gerçekleştirilip gerçekleştirilemeyeceği belirlenir. Eğer yapılan hesaplamalarda uçuş taleplerinin mevcut kapasiteler ile karşılanabileceği anlaşılırsa uçuş planları kabul edilir. Ancak yapılan kontroller bu kabul işlemi ile son bulmaz. Son derece dinamik olan havacılık faaliyetlerinde gerçekleşebilecek olan pek çok etken uçuşların planlandığı gibi gerçekleşmemesine neden olabilmektedir. Hava sahalarının ya da havaalanlarının kapasitelerinde meydana gelebilecek değişiklikler, meteorolojik koşullar, havayolu işleticisi kaynaklı yaşanan iptaller ya da gecikmeler bu etkenlerden bazılarıdır. NMOC

bu etkileri göz ardı etmeyerek uçuş planlarını gözden geçirme ve gerektiğinde güncelleme prosedürü belirlemiştir. Bu kapsamda planlanan bir uçuşun tahmini takoz çekme zamanından 12 saat öncesi her yarım saatte bir olmak üzere NMOC uçuş planını tekrar mevcut güncel veriler doğrultusunda kontrol eder, gerekli görürse günceller ve nihayetinde uçuş planını teyit eder. Dolayısıyla uçuş planının sisteme girilmesinden uçuşun gerçekleşme anına kadar uçuş planı en az 25 kez kontrol edilmiş olur. Tüm bu kontrol işlemlerinin ardından tahmini takoz çekme saatinin gelmesi ile planlanan uçuş operasyonel anlamda başlamış olur.

4.2. Serbest Rotalı Hava Sahalarında Rota Planlaması

Serbest rotalı hava sahaları; kullanıcıların tanımlanmış olan giriş ve çıkış noktaları arasında tanımlı olsun ya da olmasın istedikleri yol noktalarını kullanmalarına imkan sunarak mevcut hava trafik kontrol yol ağından bağımsız istediği rotayı oluşturabilmesine olanak tanıyan hava sahalarıdır (EUROCONTROL, European route network improvement plan – part 1, 2019). Bu hava sahalarında gerçekleştirilen uçuşlar tabi ki ilgili hava sahasının hava trafik kontrolünde gerçekleşmektedir. Serbest rotalı hava sahalarında yapılan uçuş planlaması bazı farklılıkları içermektedir. Bu farklılıkları anlayabilmek için serbest rotalı hava sahalarına özgü birtakım tanımlamaların açıklanması gerekmektedir. Bunlardan ilki serbest rotalı hava sahası bölgesidir (FRA area). Serbest rotalı hava sahası bölgesi sınır geçişleri olsun ya da olmasın bir ya da birden çok Hava Trafik Kontrol Ünitesinin sorumluluk alanı ya da serbest rotalı hava sahasının birleşiminden oluşmaktadır (EUROCONTROL, NM flight planning requirements guiedlines edition 1.3, 2020). Bu özelliği ile bakıldığında serbest rotalı hava sahası bölgesi pek çok farklı hava trafik kontrol ünitesinin birleşimi ile oluşturulabilmektedir. Bu da serbest rotalı hava sahası bölgesini FIR sınırlarından bağımsız hale getirmektedir. Farklı ülke FIR'ları bir araya gelerek serbest rotalı hava sahası bölgesini birlikte tanımlayabilmektedir. Tanımlanan bu bölgenin NMOC bilgisinde olabilmesi içinde bu bölgeye ait tanımlamaların CACD' e girilmesi gerekmektedir.

Serbest rotalı hava sahalarını sabit rotalı hava sahalarından ayıran en önemli özellik rota planlamasının mevcut hava trafik kontrol yol ağından bağımsız bir şekilde yapılabilmesine imkan sunmasıdır. Serbest rotalı hava sahaları CACD'ye iki farklı modelde tanımlanabilmektedir. Bunlardan ilki Tamamen FRA (Full FRA) modeli, ikincisi ise Ara Noktalı FRA (FRA–IP FRA With Intermediate Points) modelidir. Hem

Tamamen FRA de hem de Ara Noktalı FRA de yer alan ortak özellikler arasında aşağıdaki maddeler bulunmaktadır (EUROCONTROL, NM flight planning requirements guiedlines edition 1.3, 2020).

- Uçuşların FRA giriş noktasından FRA çıkış noktasına direkt olarak devam etmesine imkan tanır.
- Uçuşların FRA giriş noktası ile FRA çıkış noktası arasındaki ara noktalara uğrayarak gerçekleşmesine imkan tanır.
- FRA ara noktalarının kullanımı isteğe bağlıdır.
- İstenildiğinde FRA ara noktalarının zorunlu olarak kullanımı sağlanabilir.
- Sabit olarak belirlenmiş Hava Trafik Hizmet Yol Ağı var ise uçuşların serbest rotayı ya da sabit rotaları kullanabilmelerine imkan tanır.

Tamamen FRA olarak belirlenmiş bölgelere ait en önemli farklılık ara noktaların seçimi ve giriş çıkış noktaları arasında direkt uçuş imkanında ortaya çıkmaktadır. Tamamen FRA bölgesi olarak belirlenmiş bir alanda kullanıcılar AIP’de belirtilen yayınlanmış olan ara noktaları seçebilecekleri gibi AIP’de olmayan tamamıyla kendilerinin belirledikleri koordinatlarda bulunan bir noktayı da ara nokta olarak belirleyebilmektedir. Bu durum kullanıcılara Tamamen FRA yapısındaki bölgeler için sınırsız sayıda ara nokta belirleme imkanı sunan son derece esnek bir yapı kazandırmaktadır. Tamamen FRA olarak belirlenmiş bölgenin bir diğer avantajı giriş ve çıkış noktaları arasında direkt uçuş imkanının yanında herhangi bir ara nokta üzerinden de direkt uçuşa imkan tanınmasıdır. Tamamen FRA olarak ilan edilmiş bir bölgede kullanıcılar ilan edilen FRA giriş noktaları veya herhangi bir ara noktadan FRA çıkış noktaları arasında direkt uçuş gerçekleştirebilmektedir. Bakıldığında serbest rotalı hava sahalarının bütün avantajlarını Tamamen FRA olarak belirlenmiş ve ilan edilmiş bölgeler sunmaktadır.

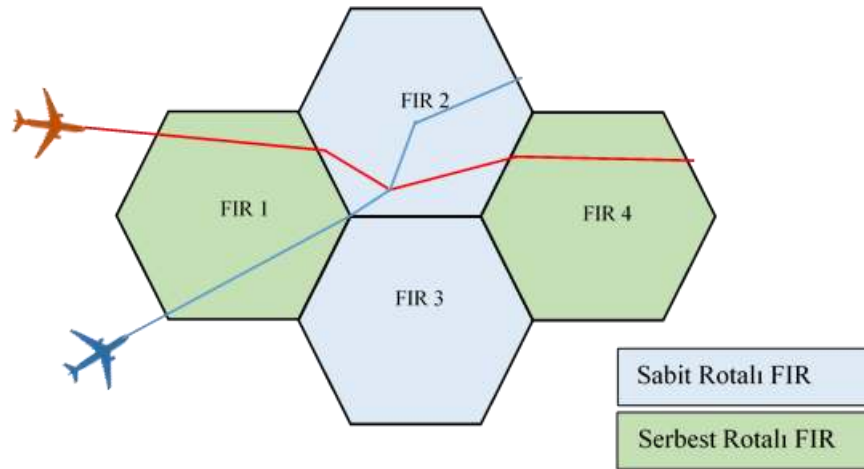
Ara Noktalı FRA bölgesinde ise kullanıcıların sadece AIP de ilan edilen FRA ara noktalarını seçebilmelerine imkan tanınmıştır. Kullanıcılar AIP de belirtilmeyen hiçbir noktayı coğrafi koordinat belirtmek suretiyle ara nokta olarak kullanamamaktadır. Ara noktalı FRA bölgesindeki bir diğer zorunluluk ise direkt rotaların kullanım şeklidir. Ara noktalı FRA bölgelerinde sadece AIP de tanımlanan noktalar arasında direkt uçuş mümkündür. Ara noktalı FRA bölgeleri için direkt uçuşun yapılabileceği FRA giriş

noktaları, FRA çıkış noktaları ve ara noktaların tamamı AIP de açıkça belirtilir. AIP de açıkça belirtilen bu noktalar dışında direkt uçuşa izin verilmez.

Serbest rotalı hava sahalarındaki rota planlamasındaki en büyük avantaj esnek rota kullanımına imkan sunulmuş olmasıdır. Havayolu işleticileri serbest rotalı hava sahalarında giriş ve çıkış noktaları arasında belirtilen kurallar doğrultusunda mevcut hava trafik kontrol yol ağından bağımsız istedikleri rotayı planlayabilmektedirler. Bu da havayolu işleticilerine rota planlamasında büyük esneklik kazandırmaktadır.

4.3. Karma Hava Sahalarında Rota Planlaması

Havacılık faaliyetlerinde standartlaşma ve prosedürel olarak eşgüdüm sağlama her ne kadar son derece önemli ve vazgeçilmez olsa da uçuşların pek çok farklı hava sahası üzerinden gerçekleşmesi pek çok karma yapıyı ve farklı uygulamayı barındırmaktadır. Uluslararası uçuşların tamamı birden çok ülkenin hava sahası üzerinden gerçekleşmektedir. Uçuş süresince kullanılan her bir hava sahası serbest rota yapısına ya da sabit rota yapısına sahip olabilmektedir. Bu durum uçuş planlaması açısından farklılıklar ortaya koymaktadır. Hava sahasının sabit rotalı olduğu bölgelerde uçuş planının mutlak suretle ilgili ANSP tarafından yayınlanan ve AIP’de ilan edilen hava trafik kontrol yol ağına uyması gerekmektedir. Ancak hava sahasının serbest rotalı olduğu bölgelerde ilan edilen giriş ve çıkış noktaları arasındaki rota planlaması tamamen esnek bırakılmıştır. Karma hava sahasına ait bir gösterim Şekil 4.1’de yer almaktadır. Şekilde FIR-1 ve FIR-4 serbest rotalı hava sahalarını gösterirken FIR-2 ve FIR-3 sabit rotalı hava sahalarını göstermektedir.



Şekil 4.1. Serbest ve sabit rotalı hava sahalarından geçen örnek uçaklar

Görüleceği üzere serbest rotalı hava sahalarında istenilen en kısa rota belirlenebilirken sabit rotalı hava sahalarında ise mevcut hava trafik hizmet yol ağına bağlı bir rota yapısı izlenmektedir. Hava sahası yapılarındaki farklılıktan kaynaklı bu durum karma hava sahası oluşturmaktadır. Karma hava sahalarında rota planlamasında hem sabit rotalar hem de serbest rotalar iç içe geçmiş durumda kullanılmaktadır. Her iki hava sahası yapısının bir arada kullanıldığı bu karma yapıda serbest rotanın sağladığı avantajları kullanmak güç hale gelmektedir. Özellikle serbest rotalı hava sahalarının kullanımında NMOC aşağıdaki yardımcı araçların ya da prosedürlerin geliştirilmesine gereksinim duymaktadır (EUROCONTROL, European route network improvement plan – part 1, 2019);

- FRA dışındaki rota yapısını dikkate alan bir yaklaşım
- Değişen rota planlarının güncellenmesi
- FRA ile eşlenik ATFCM planlama aracı
- Yeniden rotalama aracı
- Trafik yoğunluklarını yerel ve merkezi düzeyde hesaplayan yardımcı araçlar

Serbest ve sabit rotalı hava sahalarının birlikte kullanımı sürdürüldüğü müddetçe NMOC'nin yukarıdaki araç ve prosedürlere gereksinimi devam edecektir. Bu kapsamda bu tez çalışmasında serbest ve sabit rotaların bir arada kullanıldığı karma hava sahası için trafik yoğunluğunu ve hava sahası kapasitelerini dikkate alan rota planlamasında yardımcı bir optimizasyon modelinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen model ile Ağ Yöneticisi (Network Manager NM) için mevcut kapasite koşullarında rota optimizasyonu sağlayan bir karar destek mekanizmasının oluşturulması amaçlanmıştır. Bu sayede yukarıda sıralanan NMOC'nin ihtiyaç duyduğunu belirttiği trafik yoğunluklarını dikkate alarak FRA ile eşlenik ATFCM planlama aracına olan gereksinimin karşılanması planlanmıştır.

5. MATEMATİKSEL MODEL

Serbest ve sabit rotalı hava sahalarının yer aldığı karma bir hava sahası üzerinde gerçekleşen uçuşlarda rota planlaması hava sahasının rota yapısına göre değişmektedir. Serbest rotalı hava sahalarında tercih edilen direkt uçuş rotaları ile yakıt maliyetinde azalma sağlanabilmektedir. Ancak serbest rotalı hava sahalarının öncesinde ya da sonrasında yer alan sabit rotalı hava sahalarına geçişlerden ötürü zaman zaman serbest rotalı hava sahası üzerinde en kısa rotanın kullanılması mümkün olamamaktadır. Ayrıca serbest rotalı hava sahasında kullanılan en kısa rota nedeni ile sabit rotalı hava sahasına geçişte yığılmalar ve kapasite problemleri yaşanabilmektedir. Serbest rotalı hava sahasında en kısa rotanın kullanılması bireysel olarak her bir uçuşa yakıt tasarrufu sağlarken sabit rotalı hava sahasında yaşanabilecek kapasite problemleri nedeniyle alınacak gecikme manevraları ek yakıt maliyetleri oluşturabilmektedir. Bu nedenle homojen olmayan karma hava sahalarında en kısa rotayı tercih etmek her zaman avantajlı ve tasarruflu olmayabilir. Serbest rotalı hava sahalarında en kısa rota ile sağlanan yakıt tasarrufu sabit rotaya geçişle birlikte yaşanabilecek gecikmelerden ötürü gerçekleşecek ek yakıt tüketimleri ile sönmülenebilir hatta sabit rotadaki yakıt tüketimi serbest rotada sağlanan yakıt tasarrufunun önüne geçebilir. Bu nedenle karma hava sahalarında rota planlaması aşamasında bütün uçuşlar için bu ikilemi dikkate alan bir rota planlamasının yapılması gerekmektedir. Ayrıca direkt rotalar ile uçuş süresinin giderek azalması havalimanı kapasitelerini giderek zorlayan bir yapıya dönüşebilir. Daha kısa sürede gerçekleşen uçuşlar için planlama sürecinde yeterli havalimanı kapasitesinin kontrol edilmesi ve buna göre bir uçuş planının oluşturulması gerekmektedir.

Serbest rotalı hava sahalarının sabit rotalı hava sahalarıyla iç içe kullanıldığı karma hava sahalarında uçuş planlaması yapılırken etkin bir rota optimizasyonu gerekmektedir. Bu nedenle pek çok kısıtı dikkate alan matematiksel modelin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda hava sahası rota yapısı, yol noktaları kapasitesi, havalimanı kapasitesi, ayırma minimumları ve çakışmasız rota kısıtlarını içeren matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen model ile belirtilen kısıtlar altında karma hava sahalarında yakıt maliyeti, yer gecikmesi maliyeti ve hava gecikmesi maliyetini en küçükmeye çalışan bir optimizasyon yöntemi oluşturulmuştur.

5.1. Matematiksel Modele Ait Notasyonlar

Matematiksel modelde yer alan notasyonlar, parametreler, karar değişkenleri ve hesaplanan değerler bu bölümde belirtilmiştir.

Modelde yer alan indisler ve belirttikleri kümeler;

- $i, i1, i2 \in \{1, 2, \dots, a\}$ uçakları
- $m, n \in \{1, 2, \dots, b\}$ hava alanlarını veya yol noktalarını

Modelde yer alan parametreler;

- $RotaHaritası(m, n) = \begin{cases} 1, & m \text{ ve } n \text{ noktaları arasında yol var ise} \\ 0, & \text{diğer koşullarda} \end{cases}$
- $Mesafe(m, n) = m, n \text{ noktaları arası uçuş mesafesi (NM)}$
- $Kapasite(m, n) = m \text{ noktasından } n \text{ noktasına tanımlı yol kapasitesi}$
- $AyırmaMin(m, n) = m - n \text{ arasında tanımlı ayırma minimumu (dakika)}$
- $YGMaliyeti(i) = i. \text{uçağın yer gecikmesi maliyeti (€/dakika)}$
- $HGMaliyeti(i) = i. \text{uçağın hava gecikmesi maliyeti (€/dakika)}$
- $UHızı(i) = i. \text{uçağın uçuş hızı (knot)}$
- $UKalkış(i) = i. \text{uçağın talep edilen kalkış zamanı (dakika)}$
- $UYT(i) = i. \text{uçağın birim yakıt tüketim katsayısı (kg/dakika)}$
- $YMaliyeti = \text{birim yakıt maliyeti (€/kg)}$
- $YGLimit(i) = i. \text{uçağın maksimum yer gecikmesi limiti (dakika)}$

Modelde yer alan karar değişkenleri;

- $x(i, m, n) = \begin{cases} 1, & i. \text{uçak } m \text{ noktasından } n \text{ noktasına gidecek ise} \\ 0, & \text{diğer koşullarda} \end{cases}$
- $yg(i) = i. \text{uçığa atanacak yer gecikme süresi (dakika)}$
- $hg(i, m, n) = i. \text{uçığa}$
 $m - n \text{ arasında atanacak hava gecikmesi süresi (dakika)}$

Modelde parametrelere ve karar değişkenlerine göre hesaplanan değerler;

- $UPVZamanı(i, m) = i. \text{uçığın}$
 $m \text{ yol noktasına planlanan varış zamanı (dakika)}$
- $USüresi(i, m, n) = i. \text{uçığın } m - n \text{ arası toplam uçuş süresi (dakika)}$

5.2. Matematiksel Model Kısıtları

Rota optimizasyonu kapsamında geliştirilen matematiksel model problemi tam olarak yansıtabilmek adına pek çok kısıttan oluşmaktadır. Bu kısıtlar arasında rota yapısı, havayolu kapasiteleri, havalimanı kapasiteleri, ayırma minimumları ve yer gecikmesi limitleri mevcut hava trafik yol ağını, hava trafik kontrol prosedürlerini ve kapasite değerlerini modele yansıtabilmek amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca uçaklara atanacak rotaların sürekli akışa sahip olmasına yönelik kısıtlarda bulunmaktadır. Matematiksel modelde yer alan kısıtlar bu kapsamda dört gruba ayrılmaktadır.

5.2.1. Rota ve akış kısıtları

Rota ve akış kısıtları her bir uçağın kalkış havalimanından iniş havalimanına kadar izleyeceği rotaları düzgün ve sürekli bir akış dahilinde oluşturabilmek amacıyla modele girilmiştir. Düzgün bir rota yapısının sağlanması amacı ile oluşturulan rota ve akış kısıtları;

$$\sum_{n=1}^b x_{imn} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, a; m = \text{Kalkış Havalimanı} \quad (5.1)$$

$$\sum_{m=1}^b x_{imn} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, a; n = \text{İniş Havalimanı} \quad (5.2)$$

$$x_{imn} \leq \text{RotaHaritası}(m, n) \quad \forall i = 1, \dots, a; m = 1, \dots, b; n = 1, \dots, b; \quad (5.3)$$

$$\sum_{m=1}^b x_{imn} = \sum_{m=1}^b x_{inm} \quad \forall i = 1, \dots, a; n = 1, \dots, b; m \neq n; \\ n \neq \text{İniş Havalimanı}; n \neq \text{Kalkış Havalimanı}; \quad (5.4)$$

Eşitlik (5.1) ile tüm uçakların mutlaka kalkış havalimanından herhangi bir yol noktasına atanması sağlanmaktadır. Benzer şekilde eşitlik (5.2) ile tüm uçakların mutlaka rotalarının iniş havalimanında sonlanması yani inişlerini gerçekleştirmeleri koşulu sağlanmaktadır. Eşitlik (5.3) de ise hava trafik yol ağı kontrolü sağlanmakta ve uçaklar hava trafik kontrol yol ağına bulunan yol noktalarına atanmaktadır. Bu yol noktaları sabit rotalı hava sahalarında tanımlı yol noktaları iken serbest rotalı hava sahalarında ise hava sahasında tanımlanan giriş noktaları ve çıkış noktalarıdır. Son olarak eşitlik (5.4) ile sürekli akış kısıtı oluşturulmuştur. Bu kısıt ile kalkış ve iniş havalimanları dışında herhangi bir yol noktasına atanan uçağın mutlaka o yol noktasını kullanarak bir başka yol

noktasına geçmesi sağlanmıştır. Bu sayede her bir yol noktası için sürekli akış elde edilmiştir.

5.2.2. Kapasite kısıtı

Kapasite kısıtı hava sahası ve havalimanı kapasitesine ait kısıtların modele aktarılmasında rol oynamaktadır. Bu kapsamda modelde yer alan hava sahası ve havalimanı kapasitelerine uygun rota tahsisinin yapılması ve kapasite aşımının önlenmesi sağlanmıştır.

$$\sum_{i=1}^a x_{imn} \leq \text{Kapasite}(m, n) \quad m = 1, \dots, b; n = 1, \dots, b; \quad (5.5)$$

5.2.3. Çakışma önleme kısıtı

Matematiksel modelin optimizasyon sürecinde uçaklar arası çakışmasız rota tahsisini gerçekleştirebilmesi adına tanımlanan kısıttır. Bu kısıt ile tüm uçakların yörüngeleri kontrol edilmekte ve aynı yol noktası üzerinde çakışma yaşayan uçak olup olmadığı kontrol edilmektedir. Aynı yol noktasına atanacak olan uçakların birbirleri arasında en az o yol noktasında uygulanan ayırma minimumu kadar ayırmanın sağlanması garanti altına alınmıştır. Problemden yapılan kabul gereği zaman esasına dayalı ayırma uygulanmıştır. Bu nedenle aynı yol noktasını kullanan uçakların o yol noktasına varış zamanları arasında en az o yol noktasının ayırma minimumu süresi kadar ayırma olması sağlanmaktadır.

$$\begin{aligned} UPVZamanı(i1, m) - UPVZamanı(i2, m) &\geq \text{AyırmaMin}(m) \\ i1 &= 1, \dots, a; i2 = 1, \dots, a; i1 \neq i2; m = 1, \dots, b \end{aligned} \quad (5.6)$$

$$\begin{aligned} &UPVZamanı(i, m) \\ &= \begin{cases} UKalkış(i) + \frac{Mesafe(n, m)}{UHızı(i)} + yg(i) + hg(i, n, m), & n = \text{kalkış havalimanı} \\ UPVZamanı(n) + \frac{Mesafe(n, m)}{UHızı(i)} + hg(i, n, m), & n \neq \text{kalkış havalimanı} \end{cases} \\ &i = 1, \dots, a; m = 1, \dots, b; n = 1, \dots, b; m \neq n \end{aligned} \quad (5.7)$$

Eşitlik (5.6) da çakışma önleme kısıtı verilmiştir. Eşitlik (5.7) de ise çakışma önleme kısıtında yer alan uçak planlanan varış zamanının hesaplanması verilmiştir. Hesaplama göreüleceği üzere uçak planlanan varış zamanı uçak planlanan kalkış saati,

uçuş mesafesi ve uçak hızının bir fonksiyonudur. Herhangi iki uçağın hesaplanan varış zamanlarının farkı belirtilen ayırma minimumunun altında olması çakışma durumunu ifade etmektedir. Herhangi bir çakışma durumunda model yer gecikmesi ya da hava gecikmesi ile çakışma çözümü sunmaktadır. Tabiki çakışma çözümünü sunarken de toplam maliyeti en düşük seviyede tutan çözümü sunmaktadır. Model çakışma durumunda çözüm olarak bir gecikme sunacak ise bu gecikme toplam maliyeti en az etkileyen gecikme olmaktadır. Model ilgili çakışma çözümü için yer gecikmesi maliyeti daha uygunsa yer gecikmesine; hava gecikmesi maliyeti daha uygunsa hava gecikmesine yönelmektedir. Çakışma durumunda hesaplanan yer gecikmesi ve hava gecikmesi süreleri yüksek bir maliyet oluşturur ise model zaten gecikme süresi yerine alternatif rota tahsisine yönelmektedir. Bu sayede çakışmasız ve en uygun maliyetli rotaların saptanması sağlanmıştır.

5.2.4. Yer gecikmesi kısıtı

Her bir uçağa uygulanabilecek maksimum yer gecikmesi süresini tarif eden kısıt eşitlik (5.8) de verilmiştir. Gerek havayolu işleticileri gerekse havalimanı işleticileri tarafından uçakların yerde bekletilmesi istenilmemektedir. Yaşanan yer gecikmelerinin artması havalimanı açısından kapasite problemlerini, slot tahsisi problemlerini getirirken; havayolu işleticisi açısından yolcu memnuniyetsizliği, özellikle tarifeli ve aktarmalı uçuşlarda zincirleme olarak artan gecikme süreleri, aynı uçağın geri dönüş seferinde istenmeyen gecikmeler gibi pek çok problemi getirmektedir. Bu nedenle uçaklara uygulanabilecek olan yer gecikmelerinin belirli limitler dahilinde tutulması istenmiştir. Model her bir uçak için tanımlanan yer gecikmesi limit değerlerini dikkate alarak bu limitlerin aşılmasını önlemektedir.

$$yg(i) \leq YGLimit(i) \quad \forall i = 1, \dots, a \quad (5.8)$$

5.3. Matematiksel Model Parametreleri

Problemde ele alınan hava sahasının ve trafik bilgisinin matematiksel modele aktarılabilmesi için kullanılan parametreler hava sahasına özgü ve hava araçlarına özgü parametreler olmak üzere iki grup altında toplanmıştır. Hava sahasının yapısını belirten ve hava sahasındaki ayırma minimumlarını belirten parametreler hava sahası parametrelerini oluştururken. Hava aracına ait performans verilerini içeren parametreler hava aracı parametrelerini oluşturmaktadır.

5.3.1. Hava araçlarına özgü parametreler

Hava aracına özgü parametreler model için hava aracının performansını, yer gecikme maliyetini, hava gecikme maliyetini ve planlanan kalkış saatini belirten tablolardan oluşmaktadır. Her bir hava aracı için oluşturulan tabloda uçuş hızı, yakıt tüketim katsayısı, yer gecikme maliyeti, hava gecikme maliyeti ve planlanan kalkış saati bilgileri yer almaktadır. Modelde yer alan her bir uçağın uçuş hızı olarak ilgili uçağın BADA verilerinde yer alan FL350 için nominal uçuş hızı gerçek hava hızı (TAS True Air Speed) alınmıştır. Uçaklara ait yakıt tüketim katsayısı olarak yine BADA verilerinde FL350 seviyesindeki nominal yakıt tüketim katsayısı alınmıştır. Yer gecikmesi ve hava gecikmesi maliyet değerleri ise Avrupa Havayolları gecikme maliyeti referans değerlerinden alınmıştır (Cook & Tanner, 2015). Yer ve hava gecikmesi maliyet değerleri ilgili referansın temel senaryo hesaplamalarına göre belirlenerek modele aktarılmıştır. Planlanan kalkış saati de her bir uçak için dakika cinsinden modele girilen parametrelerden bir diğeridir. Hava aracına özgü olarak oluşturulacak olan tablo yapısı Tablo 5.1’de yer almaktadır.

Tablo 5.1. Hava aracına özgü parametreler

Açıklama	Model Kısaltması
Uçuş Hızı	UHızı(i)
Yakıt Tüketim Katsayısı	UYT(i)
Yer Gecikme Maliyeti	YGMaliyeti(i)
Hava Gecikme Maliyeti	HGMaliyeti(i)
Planlanan Kalkış Saati	UKalkış(i)

5.3.2. Hava sahasına özgü parametreler

Hava sahasına özgü parametreler model için hava sahası yapısı hakkında girdi oluşturacak olan parametrelerdir. Bu parametreler toplam yol noktası sayısı, ayırma minimumu, rota yapısı, yol noktaları arasındaki mesafe ve yol noktalarının kapasiteleridir. Modelde yer alan hava sahası için oluşturulacak yapı Tablo 5.2’de yer almaktadır.

Tablo 5.2. Hava sahasına özgü parametreler

Açıklama	Model Kısaltması
Toplam Yol Noktası Sayısı	m, n
Ayırma Minimumu	AyırmaMin (m,n)
Rota Yapısı	RotaHaritası(m,n)
Yol Noktaları Arasındaki Mesafe	Mesafe(m,n)
Yol Noktaları Kapasiteleri	Kapasite(m,n)

Modelde yer alan hava sahası parametrelerinden Rota Haritası, Mesafe, Kapasite ve Ayırma Minimumu değerleri tablolar halinde modele parametre olarak girilmiştir. Her bir parametre tablosu her bir yol noktasının diğer yol noktalarıyla olan ilişkisini aktarmaktadır. Bu nedenle bu parametrelerin tamamı 137x137 boyutlarında matrislerden oluşmaktadır. Kısıtlı sayfa boyutu nedeniyle bu matrislerin tamamına yer verilemeyeceği için sadece matrislerden alınan birer kesit verilebilmiştir. Tablo 5.3'te modele tanımlanan Rota Haritasına ait değerlerin bir kısmı görünmektedir. Bu tabloda tek yönlü olarak aralarında havayolu bulunan yol noktaları 1 değerini alırken, aralarında havayolu bulunmayan ayrık yol noktaları 0 değerini almaktadır. Tabloda her bir satır hava yolunun nereden başladığını her bir sütun ise o yolun gittiği yol noktasını göstermektedir. Örneğin EGLL dan MID2 ve 8LON yol noktalarına doğru havayolu mevcutken EGLL dan EGLL, MID, BOGNA, BABIT, 24BA, ATCOS, 25BA ve LTBA yol noktalarına havayolu mevcut değildir. Bu tabloyla hava sahası; yol noktaları ve yol noktaları arasındaki bağlantılar ile modele tanıtılmaktadır. Benzer şekilde Mesafe, Kapasite ve Ayırma Minimumlarına ait tablolarda da satırlar hava yolunun başladığı yol noktasını her bir sütun ise o yolun gittiği yol noktasını belirtmektedir.

Tablo 5.3. Londra-İstanbul arası rota haritası

			NEREYE										
			1	2	3	4	5		133	134	135	136	137
			EGLL	MID2	MID	BOGNA	8LON		BABIT	24BA	ATCOS	25BA	LTBA
NEREDEN	1	EGLL	0	1	0	0	1	(Gösterilemeyen 127 Sütun)	0	0	0	0	0
	2	MID2	0	0	1	0	0		0	0	0	0	0
	3	MID	0	0	0	1	0		0	0	0	0	0
	4	BOGNA	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
	5	8LON	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
	(Gösterilemeyen 127 Satır)								(Gösterilemeyen 127 Satır)				
	133	BABIT	0	0	0	0	0		0	0	1	0	0
	134	24BA	0	0	0	0	0		0	0	0	1	0
	135	ATCOS	0	0	0	0	0		0	0	0	0	1
	136	25BA	0	0	0	0	0		0	0	0	0	1
	137	LTBA	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0

Yol noktalarının kapasite değerleri her bir yol noktası için 50 uçak olarak alınmıştır. Tabiki ilgili kapasite değerleri meteorolojik olaylar, hava trafik hizmet sağlayıcısının teknik yeterlilikleri, izleme sistemlerinde yaşanabilecek sorunlar, NOTAM'lar gibi pek çok etkenden ötürü değiştirilmek zorunda kalınabilir. Geliştirilen matematiksel model bu değişikliklerin tamamını dikkate alabilen esnek bir yapıdadır. Herhangi bir nedenden

ötürü ANSP herhangi bir yol noktasının kapasitesini değiştirdiğinde Tablo 5.4'te yer alan ilgili yol noktasının kapasitesinin güncellenmesi matematiksel modelin güncel kapasiteler doğrultusunda karar vermesini sağlayacaktır.

Tablo 5.4. Modelde yer alan yol noktalarının kapasiteleri

			NEREYE										
			1	2	3	4	5		133	134	135	136	137
			EGLL	MID2	MID	BOGNA	8LON		BABIT	24BA	ATCOS	25BA	LTBA
NEREDEN	1	EGLL	0	50	0	0	50	(Gösterilemeyen 127 Sütun)	0	0	0	0	0
	2	MID2	0	0	50	0	0		0	0	0	0	0
	3	MID	0	0	0	50	0		0	0	0	0	0
	4	BOGNA	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
	5	8LON	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
	(Gösterilemeyen 127 Satır)								(Gösterilemeyen 127 Satır)				
	133	BABIT	0	0	0	0	0		0	0	50	0	0
	134	24BA	0	0	0	0	0		0	0	0	50	0
	135	ATCOS	0	0	0	0	0		0	0	0	0	50
	136	25BA	0	0	0	0	0		0	0	0	0	50
	137	LTBA	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0

Tablo 5.5'te yol noktaları arasındaki uçuş mesafeleri verilmiştir. Belirtilen uçuş mesafeleri deniz mili (NM Nautical Mile) olarak verilmiştir. Uçuş mesafelerine ait parametreler rota yapısını matematiksel modele tanıtmaktadır. Her bir uçuşun atanacağı rotada yer alan her bir yol noktasına planlanan varış zamanının hesaplanmasında mesafe parametreleri kullanılmaktadır.

Tablo 5.5. Yol noktaları arası uçuş mesafeleri

			NEREYE											
			1	2	3	4	5		133	134	135	136	137	
			EGLL	MID2	MID	BOGNA	8LON		BABIT	24BA	ATCOS	25BA	LTBA	
NEREDEN	1	EGLL	0	13	0	0	5	(Gösterilemeyen 127 Sütun)	0	0	0	0	0	
	2	MID2	0	0	13	0	0		0	0	0	0	0	
	3	MID	0	0	0	25	0		0	0	0	0	0	
	4	BOGNA	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	
	5	8LON	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	
	(Gösterilemeyen 127 Satır)								(Gösterilemeyen 127 Satır)					
	133	BABIT	0	0	0	0	0		0	0	520	0	0	
	134	24BA	0	0	0	0	0		0	0	0	2	0	
	135	ATCOS	0	0	0	0	0		0	0	0	0	9	
	136	25BA	0	0	0	0	0		0	0	0	0	2	
	137	LTBA	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	

Hava sahasında kullanılan ayırma minimumu zaman esasına dayalı olarak her bir yol noktası için iki dakika olarak belirlenmiş ve Tablo 5.6’da verilmiştir. Tabiki uçaklar arasında kullanılan ayırma minimumu farklı ANSP’ler ve farklı FIR’lar için değişebilmektedir. Hatta gün içerisinde meydana gelebilecek meteorolojik şartlardaki değişim aynı FIR içerisinde bazı bölgelerde ayırma minimumunda değişikliklere neden olabilmektedir. Geliştirilen matematiksel model ayırma minimumlarında yaşanabilecek tüm bu değişkenlikleri parametre olarak alabilmekte ve bu sayede güncel ayırma minimumları doğrultusunda bir rota planlaması ve optimizasyonu sunmaktadır.

Tablo 5.6. Her bir yol noktası için ayırma minimumu

			NEREYE											
			1	2	3	4	5		133	134	135	136	137	
			EGLL	MID2	MID	BOGNA	8LON		BABIT	24BA	ATCOS	25BA	LTBA	
NEREDEN	1	EGLL	0	2	0	0	2	(Gösterilemeyen 127 Sütun)	0	0	0	0	0	
	2	MID2	0	0	2	0	0		0	0	0	0	0	
	3	MID	0	0	0	2	0		0	0	0	0	0	
	4	BOGNA	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	
	5	8LON	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	
	(Gösterilemeyen 127 Satır)								(Gösterilemeyen 127 Satır)					
	133	BABIT	0	0	0	0	0		0	0	2	0	0	
	134	24BA	0	0	0	0	0		0	0	0	2	0	
	135	ATCOS	0	0	0	0	0		0	0	0	0	2	
	136	25BA	0	0	0	0	0		0	0	0	0	2	
	137	LTBA	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	

5.4. Matematiksel Model Karar Değişkenleri

Belirtilen kısıtlar altında matematiksel model rota, yer gecikme süresi ve hava gecikme süresi olmak üzere üç farklı karar değişkenine sahiptir. Bu karar değişkenlerinden rota karar değişkeni eşitlik (5,9)’da belirtilmiştir. Rota karar değişkeni 0-1 tamsayı değerleri alabilen ikili (binary) bir değişkendir. Bu değişken ile matematiksel model hangi uçağın hangi rotaları kullanacağına karar vermektedir. Yer gecikmesi karar değişkeni eşitlik (5.10)’da, hava gecikmesi karar değişkeni de eşitlik (5.11)’de verilmiştir. Yer gecikmesi ve hava gecikmesi karar değişkenleri birer pozitif karar değişkenidir. Bu değişkenler ile herhangi bir çakışma durumunda uçaklara atanabilecek olan gecikme sürelerinin dakika olarak model tarafından kararlaştırılması sağlanmıştır.

$$x(i, m, n) = \begin{cases} 1, & i. \text{ uçak } m \text{ noktasından } n \text{ noktasına gidecek ise} \\ 0, & \text{diğer koşullarda} \end{cases} \quad (5.9)$$

$$yg(i) \geq 0 \quad i = 1, \dots, a; \quad (5.10)$$

$$hg(i, m, n) \geq 0 \quad i = 1, \dots, a; \quad m = 1, \dots, b; \quad n = 1, \dots, b \quad (5.11)$$

5.5. Matematiksel Model Amaç Fonksiyonu

Modellenen probleme çözüm olarak serbest ve sabit rotalı hava sahalarından oluşan karma bir hava sahasında uçaklara maliyeti en küçükleyen rota tahsisinin gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Bahsi geçen maliyet ile bireysel her bir uçağın maliyeti değil toplam maliyetin daha bütüncül bir bakış ile en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ele alınan maliyetler; yakıt maliyeti, yer gecikmesi maliyeti ve hava gecikmesi maliyetidir. Modelin amacı tüm uçakların oluşturduğu yakıt maliyeti, yer gecikmesi maliyeti ve hava gecikmesi maliyeti toplamını en küçükleyen rotaların ve gecikme sürelerinin belirlenmesidir. Bu kapsamda amaç fonksiyonu ve amaç fonksiyonunda yer alan her bir ifade aşağıdaki eşitliklerde belirtilmiştir.

$$Enk \ z = \text{Yakıt Maliyeti} + \text{Hava Gecikmesi Maliyeti} + \text{Yer Gecikmesi Maliyeti} \quad (5.12)$$

$$\text{Yakıt Maliyeti} = \sum_{i=1}^a \sum_{m=1}^b \sum_{n=1}^b x(i, m, n) * USüresi(i, m, n) * UYT(i) * YMaliyeti \quad (5.13)$$

$$\text{Hava Gecikmesi Maliyeti} = \sum_{i=1}^a \sum_{m=1}^b \sum_{n=1}^b hg(i, m, n) * HGMaliyeti(i) \quad (5.14)$$

$$\text{Yer Gecikmesi Maliyeti} = \sum_{i=1}^a yg(i) * YGMaliyeti(i) \quad (5.15)$$

Görüleceğı üzere modelde yer alan amaç fonksiyonunu (5.12) en iyiye ulaştırmak için iki karar değışkeninin araştırılması gerekmektedir. Bunlardan biri i. uçağının hangi rotayı kullanılacağı diğeri ise i. uçağa gecikme uygulanıp uygulanmayacağıdır. Gecikme uygulanacak ise ne kadarlık yer gecikmesi ve ne kadarlık hava gecikmesinin uygulanacağıdır. Uçağın kullanacağı rota x_{imn} değışkeni ile tariflenmiştir. Burada x_{imn} daha önceden açıklandığı üzere i. uçağın m noktası ile n noktası arasındaki rotayı kullanıp kullanmadığını gösteren ve sadece 0,1 değışeri alabilen bir karar değışkenidir. Yer gecikme süresini belirten $yg(i)$ ile hava gecikmesi $hg(i, m, n)$ değışleri için belirlenen karar değışkenleri ise pozitif değışerler alan değışkenlerdir. Karar değışkenlerinin yapısı gereğı model karma tam sayılı programlama (Mixed Integer Programming) halini almıştır.

Amaç fonksiyonunda kalkış meydanından iniş meydanına varıncaya kadar tüm uçakların kullandıkları rotalar ve maruz kalacakları gecikme süreleri düşünülerek bir maliyet oluşturulmuş ve bu maliyetin en aza indirgenmesine çalışılmıştır. Amaç fonksiyonunda üç farklı maliyet katsayısı göze çarpmaktadır. Bunlardan ilki rota üzerindeki uçuştan kaynaklı yakıt tüketim maliyetidir. Bu maliyeti etkileyen unsurlar uçak tipi, uçak ağırlığı, uçuş seviyesi, uçuş hızı ve rotanın uzunluğudur. Amaç fonksiyonunda yer alan yer gecikmesi maliyeti ve hava gecikmesi maliyeti de uçakların maruz kalabilecekleri gecikmelerden kaynaklı maliyetleri belirtmektedir. Gecikme maliyet değerleri için daha önceden açıklandığı üzere Avrupa Havayolları Gecikme Maliyeti referans değerleri kullanılmıştır (Cook & Tanner, 2015).



6. TAVLAMA BENZETİMİ İLE ROTA PLANLAMASI VE OPTİMİZASYONU

Optimizasyon problemlerinde zaman zaman analitik yöntemlerle oluşturulan matematiksel modeller yetersiz kalabilmektedir. Özellikle büyük ölçekli karmaşık problemlerde matematiksel modeller ya uzun sürelerde çözüm sağlamaktadır ya da verilen makul sürelerde çözüm sunamamaktadır. Küçük ölçekli problemler için çözüm sağlayan matematiksel modellerin; aynı problemin boyutlarının ve karmaşıklığının artmasıyla çözüm sağlayamaz hale gelmesi alternatif çözüm yöntemi olarak meta sezgisel yöntemleri gerekli kılabilir (Yazdani, Khalili, Babagolzadeh, & Jolai, 2017). Gerçek hayat problemlerinin pek çoğu büyük ölçekli birçok kısıt ve parametrelerden oluşan karmaşık problemlerdir. Bu nedenle genellikle gerçek hayat problemlerinde matematiksel modeller belirlenen makul süreler içerisinde çözüm sunamamaktadırlar. Pek çok gerçek hayat probleminin çözümü amacıyla meta sezgisel yöntemler kullanılmıştır (Cintrano, Chicano, & Alba, 2020) (Song, ve diğerleri, 2020) (Coelho, Peres, Junior, & Dias, 2020) (Smet, 2019).

Meta sezgisel yöntemlerin geliştirilmesi ve kullanımı 1980'lerin ortalarından beri sürdürülmektedir. Meta sezgisel (Metaheuristic) terimi ilk olarak Glover tarafından 1986 yılında Yunanca dan gelen "Heuristic" (heuriskein fiilinden türemiş) ve "Meta" kelimelerinin birleşimi ile oluşturulmuştur (Blum & Roli, 2003). Çözülmesi zor olan tümleşik optimizasyon problemlerine çözüm sunmak amacı ile meta sezgisel yöntemler geliştirilmiştir (Osman, An introduction to metaheuristics, 1995). Geliştirilen meta sezgisel yöntemler analitik yöntemlerle kesin çözüm elde edilemeyen problemler için son derece kullanışlı çözüm metotlarıdır. Meta sezgisel yöntemler çözüm uzayında yer alan uygun çözümler arasında akıllı ardışık yaklaşımlarla en iyi çözümü arayan ve mümkün olduğunca en iyi değere yakın çözüm sunmaya çalışan yöntemlerdir (Osman & Laporte, Metaheuristics: A bibliography, 1996). Meta sezgisel yöntemler kesin en iyi çözümü bulmayı garanti etmeden mevcut çözüm uzayı içerisindeki uygun çözümleri belirli bir algoritma çerçevesinde değerlendirerek bu uygun çözümler arasından diğerlerine göre en iyi çözümü bulmayı amaçlarlar. Kesin çözümü garanti etmemelerine rağmen meta sezgisel yöntemler kabul edilebilir düzeyde çözümlere, çok makul süreler dahilinde ulaşabilmek adına etkin rol oynarlar (Gandomi, Yang, Talatahari, & Alavi, 2013). Bu özellikleri ile analitik yöntemlerle çözümünde uzun işlem süreleri gerektiren problemlerin daha kısa sürede çözümüne imkan tanırırlar.

Meta sezgisel yöntemler sezgisel yöntemlerin daha kapsamlı ve genelleştirilmiş halidir. Sezgisel yöntemler sadece belirli bir probleme özgü olarak geliştirilen çözüm yöntemi olma niteliği taşıırken, meta sezgisel yöntemler pek çok probleme uyarlanabilir yapıdadırlar ve bu özellikleri ile de geniş kullanım alanı bulurlar. Sıklıkla kullanılan meta sezgisel yöntemlerden bazıları genetik algoritmalar, tabu arama, ardışık komşu çözümlü arama, değişken komşu çözümlü arama, karınca kolonisi, arı kolonisi ve tavlama benzetimi olarak belirtilebilir. Bu meta sezgisel yöntemler pek çok kritere göre sınıflandırılabilirler (Beheshti & Shansuddin, 2013). Bu sınıflandırmalardan ilki meta sezgisel yöntemin doğadan esinlenip esinlenmediğidir. Bazı meta sezgisel yöntemler doğadan esinlenerek geliştirilmişlerdir. Karınca kolonisi, arı kolonisi, genetik algoritmalar ve tavlama benzetimi doğadan etkilenerek geliştirilen meta sezgisellere örnek olarak verilebilir. Bir diğer sınıflandırma ise yöntemde kullanılan çözüm sayısına göre meta sezgisel yöntemler topluluk tabanlı (population-based) ve tek çözüme dayalı (single point search) olarak ikiye ayrılmıştır. Bu sınıflandırmada algoritma aynı anda birden fazla çözümün yer aldığı bir çözüm topluluğu üzerinde çalışıyor ise topluluk tabanlı olarak gruplandırılır. Ancak algoritma aynı anda sadece tek bir çözümde yola çıkarak çalışıyor ise tek çözüme dayalı olarak gruplandırılır. Genetik algoritmalar, parçacık sürüşü ve karınca kolonisi topluluk tabanlı meta sezgisellere; tabu arama, tavlama benzetimi, ardışık yerel arama tek çözüme dayalı meta sezgisellere örnek olarak verilebilir. Bir diğer sınıflandırma meta sezgisel yöntemde yer alan amaç fonksiyonuna göre yapılmaktadır. Sabit amaç fonksiyonları için statik meta sezgisel, sürekli değişebilen amaç fonksiyonları için ise dinamik meta sezgisel sınıflandırması yapılmaktadır. Komşu çözüm türetme yöntemine göre de meta sezgisel yöntemler ikiye ayrılır. Bunlardan ilki değişken komşu çözüm türetme stratejisi kullanan meta sezgisellerdir. Bu meta sezgisellerde tek bir komşu çözüm türetme algoritması yerine birden fazla ve değişken şekillerde komşu çözüm türetme algoritmaları kullanılmaktadır. Tek değişken çözüm türetme yönteminin kullanıldığı ikinci grupta meta sezgisellerde ise komşu çözüm türetme stratejisi çözüm sonuna kadar her bir adımda hep aynıdır. Meta sezgisel yöntemlerin son sınıflandırmaları ise hafıza kullanıp kullanmadıklarına göre yapılmaktadır.

Görüleceği üzere analitik yöntemler ile çözülmesi zor olan karmaşık ve büyük ölçekli problemler için pek çok meta sezgisel yöntem geliştirilmiş ve bu yöntemler ile çözülmek istenilen problem için kabul edilebilir bir sürede kabul edilebilir bir çözüm arayışına girilmiştir. Rota planlaması ve optimizasyonu da bu problemlerden birisidir.

Gerçek hayatta önemli bir yer tutan rota planlaması ve optimizasyonu problemleri gerek karmaşıklıkları gerekse büyük ölçekleri nedeni ile genellikle analitik yöntemler neticesinde çözülememektedir. Bu nedenle rotalama problemleri için pek çok meta sezgisel optimizasyon yönteminden faydalanılmıştır. Ho-Huu ve arkadaşları kalkış rotalarının tasarımında ve belirlenmesinde uçak sıralamasını ve ayırma minimumlarını dikkate alan ve uçak gürültüsü ile yakıt tüketimini en aza indirmeye çalışan çok amaçlı optimizasyon süreçlerinde Evrimsel Algoritma, Genetik Algoritma ve Diferansiyel Evrimsel Algoritma meta sezgisel yöntemlerini kullanmışlardır (Ho-Huu, Hartjes, Perez Castan, Visser, & Curran, 2020). Chaimatanan ve arkadaşları 4 boyutlu uçak yörünge planlaması çalışmalarında Tavlama Benzetimi ve Yerel Arama algoritmalarından oluşan karma meta sezgisel yöntemleri kullanmışlardır (Chaimatanan, Delahaye, & Mongean, 2014). Goez ve arkadaşları insansız hava araçları için çevrimiçi rota planlaması amacıyla Parçacık Sürüsü Optimizasyonu meta sezgisel yöntemini kullanmışlardır (Goez, Velasquez, & Botero, 2016). Chevalier ve arkadaşları havalimanı terminal sahasında yer alan geliş ve kalkış rotalarının optimizasyonunda Tavlama Benzetimi meta sezgisel yöntemini kullanmışlardır (Chevalier, Delahaye, Sbihi, & Marechal, 2019). Goel ve arkadaşları dinamik çevresel etkileri dikkate alan insansız hava araçları için yörünge planlaması çalışmalarında bir meta sezgisel yöntem olan Ateşböceği Sürüsü yöntemini kullanmışlardır (Goel, Varshney, Jain, Maheshwari, & Shukla, 2018). Cai-long ve Wen-bo ise çok amaçlı Parçacık Sürüsü Optimizasyonu yöntemi ile hava sahasında yer alan kesişim noktalarının yerlerini uçuş verimliliğini ve hava sahası kapasitesini en iyileyecek şekilde belirlemeye çalışmışlardır (Cai-long & Wen-bo, 2014).

Meta sezgisel yöntemlerden birisi olan Tavlama Benzetimi pek çok optimizasyon probleminde başarılı sonuçlar sağlamıştır. Pant ve Fielding çift motorlu bölgesel uçaklar için en iyi uçak konfigürasyonu ve uçuş profili belirleme çalışmalarında tavlama benzetiminden yararlanmışlardır (Pant & Fielding, 1999). Kastella, uçak rota optimizasyonunda tavlama benzetiminden faydalanmıştır (Kastella, 1991). Zhou ve arkadaşları tavlama benzetimi ile terminal hava sahasında standart aletli kalkış (SID Standard Instrument Departure) ve standart terminal geliş (STAR Standard Terminal Arrival Route) rotalarının tasarımında optimizasyon çalışmaları gerçekleştirmişlerdir (Zhou, Cafieri, Delahaye, & Sbihi, 2016). Courchelle ve arkadaşları tavlama benzetimi yöntemini rüzgar ve sıcaklık belirsizlikleri altında uçaklar arası çakışmaların çözümünde uçakların seyir hızlarının belirlenmesi amacıyla kullanmıştır (Courchelle, Soler, Arribas,

& Delahaye, 2019). Ma ve arkadaşları terminal manevra sahası ve havalimanı optimizasyon süreçlerinde tavlama benzetiminden yararlanmışlardır (Ma, Delahaye, Sbihi, Scala, & Mota, 2019). Diaz ve arkadaşları karma operasyonların gerçekleştirildiği pist için planlanan varış ve kalkış zamanlarındaki sapmayı minimize eden optimizasyon çalışmalarında tavlama benzetimi ile çok kısa sürelerde %95'lik iyileşme sağlamışlardır (Diaz, Diaz, & Torre, 2017). Wang ve Sun uçak filo atama problemleri üzerinde tavlama benzetimi yönteminin uygulamasını gerçekleştirmişlerdir (Wang & Sun, 2010). Camara ve arkadaşları uçak iniş sıralaması optimizasyonunda tavlama benzetimi ve tabu arama yöntemlerini kullanarak iki yöntemi kıyaslamışlardır (Camara, Rubio, Silva, & Oliveira, 2016). Yaptıkları karşılaştırma ile ilgili problem için tavlama benzetimi yönteminin tabu aramaya göre %55 daha iyi sonuç sağladığını ortaya koymuşlardır. Geng ve Hu uçuş çizelgeleme problemi için çok amaçlı optimizasyon yöntemi olarak tavlama benzetimini kullanmışlardır (Geng & Hu, 2020). Hammouri ve arkadaşları çoklu pist konfigürasyonunda uçak iniş sıralaması problemi için tavlama benzetimi ve ardışık yerel arama yöntemlerinden oluşturdukları karma yöntem ile çözüm aramışlardır (Hammouri, Braik, Al-Betar, & Awadallah, 2020). Ma ve arkadaşları geliş trafiklerinin pist kat edişlerini dikkate alacak şekilde kalkış pisti planlaması optimizasyon sürecinde tavlama benzetimini kullanmışlardır (Ma, Sbihi, & Delahaye, Optimization of departure runway scheduling incorporating arrival crossings, 2019). Yaptıkları çalışmada tavlama benzetiminin son derece kısa işlem süresi içerisinde çözüm sağladığını vurgulamışlardır. Kliwer ve Tschöke geliştirdikleri paralel tavlama benzetimi algoritmasını haftalık uçak filo planlaması probleminde optimizasyon amaçlı kullanmışlardır (Kliwer & Tschöke, 2000).

Tavlama benzetiminin kullanıldığı optimizasyon çalışmalarında hem çözüm süresi hem de en iyi çözüme yakınsama açısından oldukça iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Özellikle gerçek hayat problemlerinin artan karmaşık yapısına rağmen kısa çözüm sürelerinde sonuç verebildiği görülmektedir. Bu nedenle ele aldığımız serbest ve sabit rotalı hava sahasındaki rota planlaması ve optimizasyonu probleminin çözümünde tavlama benzetimi yönteminin kullanılması kararlaştırılmıştır. Matematiksel modeli oluşturulan aynı problem için tavlama benzetimi yöntemi ile çözüm sağlanması amaçlanmıştır.

6.1. Tavlama Benzetimi

Tavlama benzetimi adından da anlaşılacağı üzere metallerin ısı ile şekillendirmesi sürecinde önemli bir aşama olan tavlama sürecinden esinlenilerek oluşturulan bir algoritmadır. Bu özelliği ile tavlama benzetimi algoritması doğadan esinlenen meta sezgisel yöntemlerden bir tanesidir. Tavlama sürecinde metaller ısı ile şekillendirilirlerken yüksek sıcaklıklarda daha esnek ve şekillendirilmeye müsait yapıdayken sıcaklık değeri düştükçe kristalleşip katılaşarak artık sabit bir yapıya geçmekte, esnek yapılarını ve şekillendirilebilirliklerini kaybetmektedir. Tavlama benzetimi yöntemi de tam da bu noktadan esinlenmektedir. Tavlama benzetimi algoritmasında belirli bir sıcaklık değerinde problem için farklı çözümler içerisinde hep en iyisi aranmaktadır. Bulunan en iyi çözüm yeni bir en iyi çözüme yerini bırakır ve bu şekilde amaç fonksiyonunu eniyileyen değer bulunmaya çalışılır. Ancak yerel minimum ya da maksimumlara takılmamak adına algoritma kendi içerisinde belirli olasılık dahilinde bazen amaç fonksiyona daha kötü değerler aldırarak kötü komşu çözümleri de kabul eder. İşte burada tıpkı metallerin yüksek sıcaklıkta daha esnek olması gibi tavlama benzetiminde de yüksek sıcaklıklarda algoritmanın kötü komşu çözümleri kabul etme olasılığı yani esnekliği yüksektir. Ancak sıcaklık değeri düşürüldükçe kötü çözümlerin kabul edilebilme olasılığı düşmekte yani model daha sabit bir yapıda en iyilere odaklanmaktadır. Tavlama benzetimi yüksek sıcaklıklarda daha esnek yapısı ile daha çok keşifte bulunurken, daha düşük sıcaklıklarda ise en iyi çözüme odaklanmaktadır. Tavlama benzetimi algoritmasına ait her bir adım ve açıklamaları (Sarıçiçek & Çelik, 2011);

Adım 1: Başlangıç değerlerinin belirlenmesi ve atanması

- $T1$ =Başlangıç sıcaklığı
- $TLim=5$, Lim =İterasyon Limiti, α =soğuma katsayısı, $k = 1$, $c = 1$
- Başlangıç çözümünün ($\mathcal{C}_b$) rassal olarak atanan rotalar ile oluşturulması.
- $\mathcal{C}_0 = \mathcal{C}_b$, $\mathcal{C}_1 = \mathcal{C}_b$

Adım 2: Komşu çözüm türetilmesi ve çözümlerin güncellenmesi

- $\mathcal{C}_k$ çözümünden $\mathcal{C}_n$ komşu çözümü oluşturulur.
- Eğer $A(\mathcal{C}_0) < A(\mathcal{C}_n) < A(\mathcal{C}_k)$ ise $\mathcal{C}_{k+1} = \mathcal{C}_n$ üçüncü adıma geçilir.
- Eğer $A(\mathcal{C}_n) < A(\mathcal{C}_0) < A(\mathcal{C}_k)$ ise $\mathcal{C}_0 = \mathcal{C}_{k+1} = \mathcal{C}_n$ üçüncü adıma geçilir.

- Eğer $A(\check{C}k) < A(\check{C}n)$ ise $K(\check{C}n, \check{C}k, T)$ kabul etme olasılığı ve 0-1 aralığında rassal R_k olasılığı belirlenir.
- Eğer $K(\check{C}n, \check{C}k, T_c) > R_k$ ise $\check{C}k+1 = \check{C}n$ değilse $\check{C}k+1 = \check{C}k$ üçüncü adıma geçilir.

Adım 3: Sıcaklığın azaltılması ve algoritmanın sonlandırılması

- Eğer $k < \text{Lim}$ ise $k=k+1$ ikinci adıma dönülür.
- Eğer $k = \text{Lim}$ ise;
 - Eğer $T_c < T_{\text{Lim}}$ program sonlandırılır. Değil ise
 - $T_{c+1} = T_c \alpha^c$, $k = 1$ ve $c = c+1$ ikinci adıma dönülür.

Birinci adımda görüleceği üzere algoritmanın başında Tavlama Benzetimine özgü bazı başlangıç parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunlar sıcaklık (T_c), son sıcaklık değeri (T_{Lim}), her bir sıcaklıkta gerçekleştirilecek olan iterasyon sayısı (Lim) ve soğuma katsayısıdır (α). Bu adımda ayrıca iterasyon sayacı olan k ve soğutma sayacı olan c değerleri 1'den başlatılır. Bu adımda belirlenen parametrelerin her birinin tavlama benzetiminin çalışmasında ve optimizasyon sürecinde farklı etkileri bulunmaktadır. Yüksek sıcaklık başlangıç değeri hem toplam iterasyon sayısını artırır hem de kabul etme olasılığını artırır. Yüksek sıcaklıklarda algoritmanın kötü çözümleri kabul etme olasılığı daha yüksektir. Bu da yüksek sıcaklık değerlerinde algoritmanın daha kolay sıçrama yapmasına ve geniş bir keşif süreci ile kötü çözümleri kabul etmesine olanak tanır. Bu sayede algoritmanın çözüm sürecinde yerel minimumlara takılmasının önüne geçilmiş olur. Algoritmanın çalışmasını etkileyen bir diğer faktör de iterasyon sayısıdır. Yüksek iterasyon sayısı algoritmanın daha fazla çözümü incelemesine olanak tanır. Ancak iterasyon sayısının yüksekliği daha çok işlem gerektireceği için işlem süresini dolayısıyla algoritmanın çözüm süresini arttırmaktadır. Soğuma katsayısı algoritmanın çalışmasını etkileyen başlangıç parametrelerinden bir diğeridir. Soğuma katsayısının düşük olması algoritmadaki sıcaklık değerinin daha çabuk düşmesine yani daha hızlı soğumasına neden olur. Bu nedenle daha düşük soğuma katsayısı daha hızlı soğuma sağlayacağı için toplam iterasyon sayısını azaltır. Ayrıca düşük soğuma katsayılarında sıcaklığın azalması daha hızlı gerçekleşeceğinden kötü çözümleri kabul etme olasılığını da daha hızlı azaltır. Algoritma daha hızlı bir şekilde iyi çözümlere odaklanmaya başlar. Başlangıç parametrelerinin belirlenmesinden sonra algoritmanın birinci adımı ilk sıcaklık değeri

için bir başlangıç çözümünün (ζ_b) bulunmasıyla devam eder. Bulunan bu çözüm bilinen en iyi çözüm ($\zeta_o = \zeta_b$) ve iterasyon çözümü ($\zeta_k = \zeta_b$) olarak atanır.

Algoritmanın ikinci adımında iterasyon için yeni bir komşu çözüm bulunur (ζ_n) ve bulunan bu çözüm iterasyon çözümü (ζ_k) ve bilinen en iyi çözüm (ζ_o) ile kıyaslanır. Eğer yeni bulunan komşu çözüm şu ana kadarki bilinen en iyi çözüm ise ($A(\zeta_n) < A(\zeta_o) < A(\zeta_k)$) hem bilinen en iyi çözüm ($\zeta_o = \zeta_n$) hem de bir sonraki iterasyonda komşu çözümün türetileceği çözüm ($\zeta_{k+1} = \zeta_n$) olarak güncellenir ve üçüncü adıma geçilir. Eğer bulunan komşu çözüm bilinen en iyi çözümden daha kötü ancak iterasyondaki çözümden daha iyi ise ($A(\zeta_o) < A(\zeta_n) < A(\zeta_k)$) sadece bir sonraki iterasyon çözümü ($\zeta_{k+1} = \zeta_n$) olarak güncellenir ve üçüncü adıma geçilir. Son olarak eğer bulunan yeni komşu çözüm hem bilinen en iyi çözümden hem de iterasyon çözümünden daha kötü ise, ($A(\zeta_o) < A(\zeta_k) < A(\zeta_n)$) kabul etme olasılığı olan $K(\zeta_n, \zeta_k, T_c)$ hesaplanır. Bu hesaplamanın ardından 0-1 aralığında rassal bir değer (R_k) belirlenir. Eğer $K(\zeta_n, \zeta_k, T_c) > R_k$ ise yeni komşu çözüm kötü olmasına rağmen kabul edilir ve bir sonraki iterasyonda kullanılmak üzere ($\zeta_{k+1} = \zeta_n$) atanır ve üçüncü adıma geçilir. Eğer $K(\zeta_n, \zeta_k, T) < R_k$ ise komşu çözüm kabul edilmez ve bir sonraki iterasyonda mevcut iterasyon çözümü ile devam edilir ve üçüncü adıma geçilir.

Üçüncü adımda programı sonlandırma kriterleri kontrol edilir. Öncelikle her bir sıcaklık değeri için gerekli olan iterasyon sayısı kontrol edilir. Yeterli iterasyon sağlanıncaya kadar ikinci adım tekrar edilir. Yeterli iterasyona ulaşıldığında ($k = \text{Lim}$) sıcaklık değeri kontrolüne geçilir. Eğer sıcaklık değeri son sıcaklık değerinin üzerinde ise ($T > T_{\text{Lim}}$) soğutma işlemi $T_{c+1} = T_c \alpha^c$ yapılır ve ikinci adıma dönülür. Bu şekilde iterasyonlar tamamlandıkça sıcaklık giderek azaltılır. Algoritma sonlandırma koşulu olan; sıcaklık değerinin son sıcaklık değerinin altına düşmesiyle ($T \leq T_{\text{Lim}}$) program sonlandırılır. Tavlama benzetiminin genel işleyişi bu şekildedir.

6.2. Tavlama Benzetimi Yönteminin Rota Planlaması ve Optimizasyonuna Uyarlanması

Matematiksel modelin geliştirilmesi ve örnek hava sahası problemlerinde sınanması sonucunda karmaşık ve büyük ölçekli problemlerin çözümü için meta sezgisel algoritmalara ihtiyaç duyulduğu anlaşılmıştır. Bu nedenle serbest ve sabit rotalı hava sahalarında rota optimizasyonu amaçlayan tavlama benzetimi algoritmasının kullanılmasının ilgili probleme uyarlanması sağlanmıştır. Tavlama benzetimi

algoritmasının iki önemli aşaması bulunmaktadır. Bunlar başlangıç çözümünün oluşturulması ve komşu çözümün türetilmesi aşamalarıdır.

6.2.1. Başlangıç çözümünün oluşturulması

Başlangıç çözümünün oluşturulması aşamasında problemin kısıtlarını sağlayan uygun çözümler arasından bir tanesi başlangıç çözümü olarak alınmalıdır. Problem olarak ele alınan serbest ve sabit rotalı hava sahalarından oluşan karma hava sahasında başlangıç çözümü için uçakların tamamına mevcut rota yapısı ve hava sahası kapasitesi kısıtlarına uygun şekilde başlangıç rotası tahsis edilmektedir. Başlangıç çözümünün oluşturulması aşamasının sade ve anlaşılır bir şekilde açıklanabilmesi için örnek bir hava sahası oluşturulmuştur. Örnek hava sahasına ait rota yapısı Tablo 6.1’de gösterilmiştir. Gösterilen rota yapısında aralarında havayolu bulunan yol noktaları 1 ile, aralarında herhangi bir havayolu bulunmayan yol noktaları ise 0 ile gösterilmiştir. Örneğin EGLL’den A, B, C yol noktalarına giden hava yolları mevcutken D, E, F, G, H, ve LTBA noktalarına giden yollar bulunmamaktadır.

Tablo 6.1. Örnek hava sahası rota yapısı

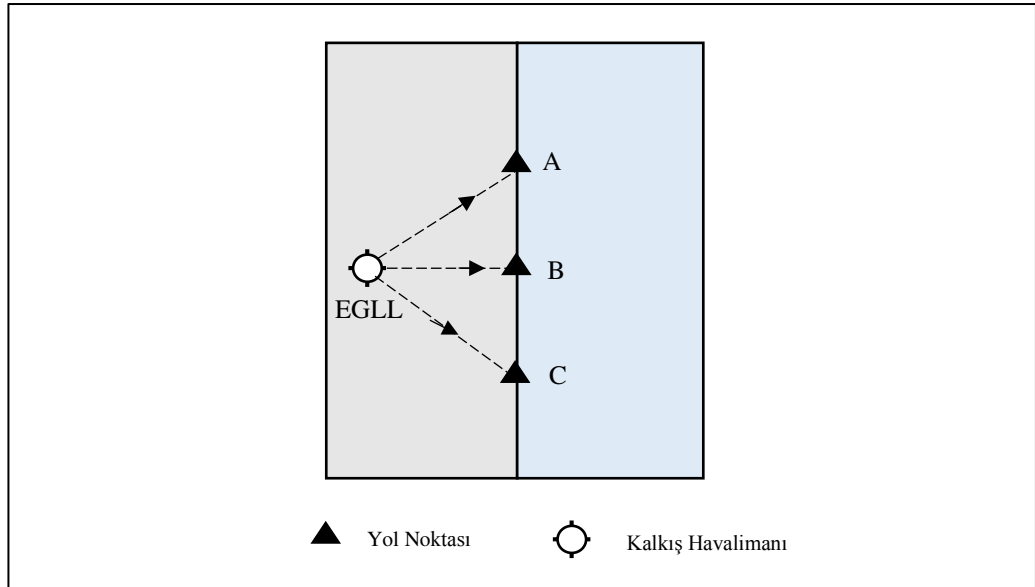
		NEREYE									
		EGLL	A	B	C	D	E	F	G	H	LTBA
NEREDEN	EGLL	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	A	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
	B	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
	C	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
	D	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0
	E	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
	F	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	G	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	LTBA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Örnek hava sahasına ait yol noktalarının kapasite değerleri Tablo 6.2’de gösterilmiştir. Verilen kapasite değerleri o yol noktasını kullanabilecek olan maksimum uçak sayısını ifade etmektedir.

Tablo 6.2. Örnek hava sahasına ait yol noktalarının kapasiteleri

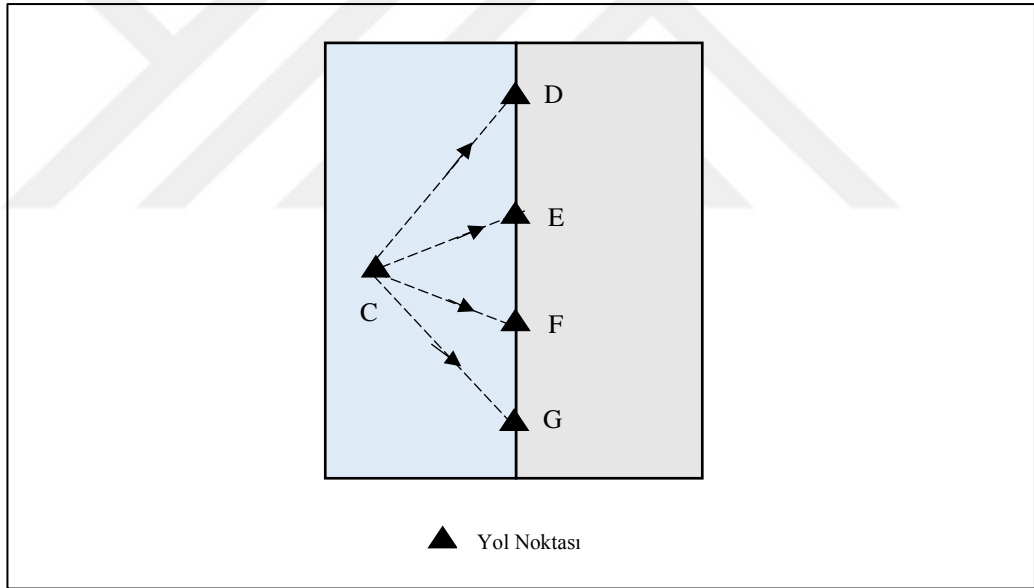
		NEREYE									
		EGLL	A	B	C	D	E	F	G	H	LTBA
NEREDEN	EGLL	0	30	30	30	0	0	0	0	0	0
	A	0	0	30	0	30	30	0	0	0	0
	B	0	0	0	30	30	30	0	0	0	0
	C	0	0	0	0	30	30	30	30	0	0
	D	0	0	0	0	0	30	0	30	30	0
	E	0	0	0	0	0	0	30	30	0	0
	F	0	0	0	0	0	0	0	0	30	30
	G	0	0	0	0	0	0	0	0	30	30
	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30
	LTBA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Başlangıç çözümü için oluşturulan rota planlamasında uçakların mevcut rota yapısındaki yolları mevcut kapasiteleri aşmayacak şekilde kullanmaları gerekmektedir. Herhangi bir uçak için başlangıç rotasının oluşturulması kalkış havalimanı olan EGLL ile başlamaktadır. Öncelikle algoritma EGLL'den olası yol noktalarına olan rota alternatiflerini çıkarmaktadır. Bunun için rota haritasından faydalanmaktadır. Örnek hava sahasının rota yapısına göre EGLL'den başlayan olası rotalar Şekil 6.1'de verilmiştir.



Şekil 6.1. Kalkış havalimanından olası rota alternatifleri

Daha sonra olası rotalardan (EGLL-A, EGLL-B, EGLL-C) herhangi biri rassal olarak seçilmektedir. Bu rassal seçim işleminden hemen sonra hava sahası kapasitesi kontrol edilmektedir. Eğer seçilen rotada yer alan yol noktası için yeterli kapasite yok ise diğer rota alternatifleri içinden bir başka rotanın rassal olarak seçilmesi gerçekleştirilir. Bu süreç yeterli kapasitedeki rota seçilinceye kadar devam eder. Böylelikle kapasite koşullarını dikkate alan bir rota tahsisi bu aşamada sağlanmaktadır. Bu rassal seçimde örneğin EGLL-C rotası seçilmiş olsun. Bu seçim işleminden sonra C yol noktasının mevcut kapasitesi 1 azaltılır ve C noktasından sonraki rota alternatiflerinin belirlenmesine geçilir. Örnek hava sahasında yer alan rota yapısına göre C yol noktasından diğer yol noktalarına olan rota alternatifleri Şekil 6.2’de gösterilmiştir. Rassal seçim süreci, kapasite kontrolü ve seçim sonrası kullanılan kapasitenin mevcut kapasiteden düşülmesi işlemi C noktasından sonraki rota adımı içinde gerçekleştirilir. Bu süreç varış havalimanı olan LTBA yol noktasına ulaşıncaya kadar devam ettirilir.



Şekil 6.2. C yol noktasından olası rota alternatifleri

Başlangıç çözümünün oluşturulması aşamasında her bir uçak için yukarıda anlatılan seçim süreci gerçekleştirilir. Bu sayede her bir uçak için başlangıç rotası oluşturulmuş olur. Tablo 6.3’te beş uçaklık örnek bir problem için oluşturulan başlangıç çözümü ve bu çözümde her bir uçak için atanan rota yapısı gösterilmiştir. Başlangıç çözümü oluşturulurken kullanılan yol noktalarının kapasitelerinin bu yol noktalarını kullanan uçak sayısı kadar azaltıldığı daha önce belirtilmişti. Her bir yol noktasının başlangıç

çözümüne ait rota atama işleminden sonra yol noktalarının kalan kullanılabilir kapasite değerleri Tablo 6.4’te gösterilmiştir.

Tablo 6.3. Beş uçaklık bir başlangıç çözümü örneği

Uçak No	Rota								
1	EGLL	A	D	G	H	LTBA			
2	EGLL	C	E	F	LTBA				
3	EGLL	C	G	H	LTBA				
4	EGLL	B	C	D	E	F	H	LTBA	
5	EGLL	A	B	C	D	E	F	H	LTBA

Tablo 6.4. Başlangıç çözümü rota atamasından sonra kullanılabilir kapasiteler

		NEREYE									
		EGLL	A	B	C	D	E	F	G	H	LTBA
NEREDEN	EGLL	0	28	29	28	0	0	0	0	0	0
	A	0	0	29	0	29	30	0	0	0	0
	B	0	0	0	28	30	30	0	0	0	0
	C	0	0	0	0	28	29	30	29	0	0
	D	0	0	0	0	0	28	0	29	30	0
	E	0	0	0	0	0	0	27	30	0	0
	F	0	0	0	0	0	0	0	0	28	29
	G	0	0	0	0	0	0	0	0	28	30
	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26
	LTBA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Bütün uçaklar için mevcut rota ve kapasite koşulları altında başlangıç rotaları oluşturulduktan sonra başlangıç çözümü çakışma kontrolü ve çözümü işlemine tabi tutulur. Bu aşamada her bir uçağın kendisine atanan rota boyunca uçuş yörüngesi çıkartılır ve her uçağın rotasında yer alan yol noktasına varış zamanı hesaplanır. Hesaplanan bu varış zamanları yardımı ile uçaklar arasında herhangi bir yol noktasında çakışma olup olmadığı kontrol edilir. Herhangi iki uçağın herhangi bir yol noktasına varış zamanları arasındaki zaman farkının bu yol noktası için modelde tanımlanan ayırma minimumunun altında olması durumu çakışma olarak nitelendirilir. Herhangi iki uçak arasında çakışma oluşması durumunda model çakışma çözüm sürecine başlar. Bu süreçte çakışma yaşayan uçaklardan birisine yer gecikmesi ya da hava gecikmesi uygulanarak

çakışma için çözüm oluşturulur. Uygulanacak gecikmenin türü (yer gecikmesi mi hava gecikmesi mi), hangi uçağa uygulanacağı, eğer gecikme hava gecikmesi ise gecikmenin hava sahasının neresinde uygulanacağı algoritma tarafından tamamen gecikme maliyetleri doğrultusunda belirlenir. Maliyeti en az olan gecikme türü, maliyeti en az olacak olan uçak tipine uygulanır. Bu sayede algoritma çakışmasız rotaların oluşturulabilmesi için gerekli olan gecikme sürelerini optimum şekilde belirleyebilmektedir.

Her bir uçak için rota atanması işlemi mevcut rota yapısı ve kapasite değerlerine göre rassal olarak gerçekleştirildikten sonra çakışma kontrolü ve çakışma önleme işlemlerinin ardından başlangıç çözümü elde edilmektedir. Başlangıç çözümünün elde edilmesinin ardından artık algoritma her bir iterasyonda komşu çözüm türetme yöntemine göre yeni uygun çözümler arasında gezinebilecektir.

6.2.2. Komşu çözümün türetilmesi

Tavlama benzetimi tek çözüme dayalı (single point search) bir meta sezgisel yöntemdir. Bu nedenle algoritma bir çözümden komşu çözüm türeterek optimizasyon sürecinde ilerlemektedir. Komşu çözüm türetme işlemi mevcut bir çözümden belirli bir algoritma doğrultusunda yeni uygun çözüm elde etme olarak tanımlanabilir. Komşu çözüm türetme algoritması tavlama benzetiminin çözüm süresini ve en iyi çözüme yakınsama derecesini etkileyen faktörlerden bir tanesidir. Problemimize uyarlanan tavlama benzetimindeki komşu çözüm türetme algoritmasının açıklanmasında yine beş uçaklık örnek problem için oluşturulan başlangıç çözümünden yola çıkılacaktır. Tablo 6.5'te mevcut başlangıç çözümü ve bu çözümden türetilen komşu çözüm yer almaktadır.

Tablo 6.5. Mevcut çözümden komşu çözüm türetme

	Uçak No	Rota								
Mevcut Çözüm	1	EGLL	A	D	G	H	LTBA			
	2	EGLL	C	E	F	LTBA				
	3	EGLL	C	G	H	LTBA				
	4	EGLL	B	C	D	E	F	H	LTBA	
	5	EGLL	A	B	C	D	E	F	H	LTBA
Komşu Çözüm	1	EGLL	A	D	G	H	LTBA			
	2	EGLL	C	E	F	LTBA				
	3	EGLL	C	G	H	LTBA				
	4	EGLL	A	D	H	LTBA				
	5	EGLL	A	B	C	D	E	F	H	LTBA

Komşu çözüm türetme işlemine mevcut çözümde yer alan uçaklar arasından rasgele bir uçak seçimi ile başlanmaktadır. Örnek durumda rasgele seçilen uçak dört numaralı uçaktır. Seçilen bu uçak için artık yeni bir rota yapısının oluşturulmasına geçilir. Bunun için öncelikle bu uçağın mevcut çözümündeki rota planlamasında yer alan tüm yol noktalarının kullanım kapasiteleri artık bu uçak tarafından kullanılmayacağı için iade edilir. Daha sonra diğer uçakların rotaları tamamıyla aynı kalmak koşuluyla dördüncü uçak için sanki başlangıç çözümü üretiliyormuş gibi yeniden rota tahsisi işlemi gerçekleştirilir. Dördüncü uçak için önce EGLL'den herhangi bir yol noktasına yine rassal atama gerçekleştirilir. Bu atamada yine mevcut rota yapısına ve yol noktası kapasitesi kısıtlarına dikkat edilir. Tablo 6.5'te yer alan mevcut çözümde dördüncü uçak EGLL'den B noktasına gitmekteyken, komşu çözümde EGLL'den A noktasına atanmıştır. A noktasından bir sonraki noktaya, o noktadan bir diğerine, ta ki LTBA iniş havalimanı yok noktası ataması yapılana kadar süreç devam eder. Bu şekilde gerçekleştirilen komşu çözüm türetme işleminde dördüncü uçağın rotası mevcut çözümde EGLL-B-C-D-E-F-H-LTBA iken komşu çözümde EGLL-A-D-H-LTBA olarak değiştirilmiş olur. Daha sonra yeni oluşturulan komşu çözüm için çakışma kontrolü ve çözümü işlemleri tekrar edilir. Bu işlemlerin ardından komşu çözüm türetme adımı tamamlanmış olur. Her bir komşu çözümde sadece bir uçağın rotası rassal olarak değiştirilmektedir.

6.3. Tavlama Benzetimine Ait Parametrelerin Belirlenmesi

Tavlama benzetimi algoritmasının başlangıç parametreleri algoritmanın çalışmasını ve çözüm süresini etkileyen önemli faktörlerdendir. Tavlama benzetimi algoritmasının çalışmasını etkileyen bu parametreler; başlangıç sıcaklığı (T), soğuma katsayısı (α) ve her bir iterasyonda türetilen komşu çözüm sayısıdır. Tavlama benzetimindeki bu parametrelerin alacağı başlangıç değerlerinin belirlenmesi amacıyla deney tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda başlangıç sıcaklık değerleri 500° , 750° ve 1000° olarak; soğuma katsayıları 0,80 0,90 ve 0,99 olarak; bir iterasyonda türetilen komşu çözüm sayıları ise 10, 20 ve 30 olarak alınmış ve 27 farklı deney gurubu oluşturulmuştur. Bu deney gurupları hem 13 uçaklık küçük problemde hem de 60 uçaklık büyük problemde başlangıç değerlerinin bulunması amacıyla kullanılmıştır.

Senaryo 1'de yer alan 13 uçaklık problem için gerçekleştirilen deneylerde başlangıç çözümünün deney üzerindeki etkisini yok etmek amacıyla her deney gurubu aynı

başlangıç çözümü ile başlatılmıştır. Yapılan deneylere ait sonuçlar Tablo 6.6'da yer almaktadır.

Sonuçlarda görüleceği üzere amaç fonksiyonunu en küçükmeye yönelik problemde 9. deney grubunda yer alan tavlama benzetimi başlangıç değerleri $T=500^\circ$, $\alpha=0,99$ ve her bir iterasyonda türetilcek komşu çözüm sayısı =30, diğer deney gruplarına göre daha iyi çözüm sağlamıştır. Bu nedenle 13 uçaklık problemler olan Senaryo 1 ve Senaryo 2'de tavlama benzetiminde başlangıç değerleri olarak bu değerlerin kullanılması kararlaştırılmıştır.

Senaryo 3 ve Senaryo 4'te 60 uçaktan oluşan rotalama problemi bulunmaktadır. Problem boyutu olarak Senaryo 1 ve Senaryo 2'ye göre daha çok uçak sayısına sahip olan Senaryo 3 ve Senaryo 4 için tavlama benzetimi parametre değerlerinin belirlenmesi ayrı bir deney tasarımı gereklidir. Bu nedenle Senaryo 3 ve Senaryo 4'te kullanılacak parametreler için ayrı bir deney tasarımı gerçekleştirilmiştir. Senaryo 3 ve Senaryo 4 problem boyutu olarak benzer yapıda olduğu için sadece birisine göre deney tasarımının yapılması yeterli görülmüştür. Bu nedenle sadece Senaryo-3 üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir.

Tablo 6.6. *Senaryo-1 tavlama benzetimi parametrelerinin belirlenmesi deney sonuçları*

Deney No	T	α	Bir İterasyonda Bakılan Komşu Çözüm Sayısı	Bakılan Toplam Çözüm Sayısı	Çözüm Süresi (saniye)	Sonuç
1	500	0,80	10	60	109	111695
2	500	0,80	20	120	160	111425
3	500	0,80	30	180	216	110774
4	500	0,90	10	90	134	111318
5	500	0,90	20	180	198	111204
6	500	0,90	30	270	259	111244
7	500	0,99	10	300	313	110470
8	500	0,99	20	600	515	110722
9	500	0,99	30	900	703	109758
10	750	0,80	10	70	105	112098
11	750	0,80	20	140	151	111667
12	750	0,80	30	210	225	110512
13	750	0,90	10	100	155	111755
14	750	0,90	20	200	234	111564
15	750	0,90	30	300	316	111482
16	750	0,99	10	320	307	110744
17	750	0,99	20	640	552	110601
18	750	0,99	30	960	740	110840
19	1000	0,80	10	70	121	111549
20	1000	0,80	20	140	168	111333
21	1000	0,80	30	210	243	111080
22	1000	0,90	10	100	176	111278
23	1000	0,90	20	200	216	111057
24	1000	0,90	30	300	285	111043
25	1000	0,99	10	320	356	111724
26	1000	0,99	20	640	517	110681
27	1000	0,99	30	960	731	110198

Senaryo 3'te yer alan 60 uçaklık problem için gerçekleştirilen deneylerde de başlangıç çözümünün sonuçlar üzerindeki etkisini önlemek amacı ile başlangıç çözümü her bir deney grubunda aynı tutulmuştur. Gerçekleştirilen deneylere ait sonuçlar Tablo 6.7'de verilmiştir. Görüleceği üzere 60 uçaklık büyük problemde 18. deney grubunda yer alan $T=750^\circ$, $\alpha=0,99$ ve İterasyon limiti=30 değerleri diğer deney gruplarına göre daha iyi çözüm sağlamıştır. Senaryo 1 için belirlenen başlangıç parametrelerindeki sıcaklık değeri $T=500^\circ$ iken, Senaryo 3'te sıcaklık değeri $T=750^\circ$ iken daha iyi çözüm sağlamaktadır. Bu da uçak sayısının artması ile artan problem boyutunun tavlama benzetiminde kullanılacak olan sıcaklık, soğuma katsayısı ve iterasyon limiti değerlerinde değişikliklere neden olabileceğinin göstergesidir. Bu nedenle Senaryo 3 ve Senaryo 4'ün tavlama benzetimi ile çözümünde $T=750^\circ$, $\alpha=0,99$ ve her bir iterasyonda türetilcek komşu çözüm sayısı =30 olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu parametreler ile tavlama benzetimi algoritmasının ilgili problemleri daha etkin çözmesi amaçlanmıştır.

Yapılan deneyler neticesinde Senaryo 1 ve Senaryo 2'nin tavlama benzetimi ile çözümünde başlangıç değerleri olarak $T=500^\circ$, $\alpha=0,99$ ve her bir iterasyonda türetilcek komşu çözüm sayısı =30, Senaryo 2 ve Senaryo 3'ün çözümünde ise başlangıç değerleri olarak $T=750^\circ$, $\alpha=0,99$ ve her bir iterasyonda türetilcek komşu çözüm sayısı =30 olarak kullanılması kararlaştırılmıştır.

Tablo 6.7. *Senaryo-3 tavlama benzetimi parametrelerinin belirlenmesi deney sonuçları*

Deney No	T	α	Bir İterasyonda Bakılan Komşu Çözüm Sayısı	Bakılan Toplam Çözüm Sayısı	Çözüm Süresi (saniye)	Sonuç
1	500	0,80	10	60	723	504392
2	500	0,80	20	120	862	504732
3	500	0,80	30	180	924	502269
4	500	0,90	10	90	620	501043
5	500	0,90	20	180	831	500158
6	500	0,90	30	270	1271	501463
7	500	0,99	10	300	1491	501700
8	500	0,99	20	600	1954	496139
9	500	0,99	30	900	2516	496483
10	750	0,80	10	70	544	503470
11	750	0,80	20	140	715	501307
12	750	0,80	30	210	1019	500938
13	750	0,90	10	100	707	503371
14	750	0,90	20	200	955	501981
15	750	0,90	30	300	1140	499102
16	750	0,99	10	320	1201	498803
17	750	0,99	20	640	2125	497609
18	750	0,99	30	960	2704	494664
19	1000	0,80	10	70	978	504560
20	1000	0,80	20	140	726	504238
21	1000	0,80	30	210	899	503071
22	1000	0,90	10	100	703	503454
23	1000	0,90	20	200	1089	503706
24	1000	0,90	30	300	1145	499021
25	1000	0,99	10	320	1159	499685
26	1000	0,99	20	640	2000	496784
27	1000	0,99	30	960	3470	496618

7. ANALİZLER

Serbest ve sabit rotalı hava sahalarından oluşan karma hava sahası üzerinde yapılacak olan uçuşlar için yakıt maliyeti, yer gecikmesi maliyeti ve hava gecikmesi maliyetini dikkate alan rota optimizasyonu çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda optimizasyon probleminin çözümü için kullanılan analitik yöntem ve meta sezgisel yönetime ait sonuçlar detaylıca analiz edilmiştir. Çözüm analizlerine ek olarak optimizasyon süreci öncesinde ve sonrasında uçakların yakıt tüketimleri ve uçuş mesafeleri kıyaslanmıştır. Yapılan tüm analizlere ait sonuçlar ilgili alt bölümlerde verilmiştir.

7.1. Matematiksel Model Çözüm Analizleri

Rota planlaması ve optimizasyonu için oluşturulan matematiksel model çeşitli ölçekte ve karmaşıklıkta problemler ile sınanmıştır. Bu sayede, oluşturulan matematiksel modelin farklı düzeydeki problemlere çözüm sağlayıp sağlayamadığı test edilmiştir. Toplam dört farklı senaryo için matematiksel modelin çözümlemesi analiz edilmiştir. Her bir senaryo için matematiksel modelin çözüm süresi üç saat ile sınırlandırılmıştır. Verilen üç saatlik makul süre içerisinde matematiksel modelin çözüm sağlayıp sağlayamadığı sınanmıştır. Bu senaryoların tamamında hava sahasına özgü parametreler aynı tutulmuş sadece uçak sayısı, uçak karması ve uçakların planlanan kalkış saatlerinde değişiklikler yapılmıştır. Bu senaryolardan ilki 30 Nisan 2018 tarihinde gerçekleştirilen Londra-İstanbul uçuş verileriyle aynı uçak sayısına ve uçak karmasına sahip on üç uçaktan oluşan ve uçakların planlanan kalkış saatleri arasında yeterli ayırma bulunan durumdur. Bu duruma ait uçak karması ve uçakların planlanan kalkış zamanları Tablo 7.1'de yer almaktadır. Tablo 7.1'de görüleceği üzere Senaryo 1'de gerçek verilerle aynı uçak karması kullanılmış olup sadece uçakların planlanan kalkış zamanları beşer dakika ayırma ile oluşturulmuştur. Hava sahası parametrelerinde yer alan ayırma minimumu iki dakika olduğu için bu senaryoda uçaklar yeterli ayırma ile planlama yapmış durumdadır. Bu nedenle kalkış anında uçakların mevcut ayırmaları yeterlidir ve uçaklar arası çakışma oluşmamaktadır. Senaryo 1 ile on üç farklı çakışmasız uçuştan oluşan bir rota planlaması ve optimizasyonu problemi ele alınmıştır. Hem uçak sayısının az olması hem de uçakların planlanan kalkış zamanları arasında çakışma bulunmaması nedeni ile Senaryo-1 diğer senaryolara görece en temel düzeyde rotalama problemidir. Senaryo 1 ile matematiksel modelin temel düzeydeki bu probleme çözümü sınanmıştır.

Tablo 7.1. *Senaryo-1 için uçak karması ve planlanan kalkış saatleri*

Uçak ID	Uçak Tipi	Planlanan Kalkış Zamanı	Yer Gecikmesi Limiti
		dk.	dk.
1	A320	5	30
2	A320	10	30
3	B738	15	30
4	A321	20	30
5	A321	25	30
6	A321	30	30
7	A321	35	30
8	A321	40	30
9	A321	45	30
10	B77W yerine A332	50	30
11	B77W yerine A332	55	30
12	B77W yerine A332	60	30
13	B77W yerine A332	65	30

Senaryo 2’de gerçek verilerle aynı uçak karması kullanılmış olup sadece planlanan kalkış zamanları her uçak için 2. dakika olarak belirlenmiştir. Senaryo 2 için uçak karması ve planlanan kalkış zamanları Tablo 7.2’de yer almaktadır. Bütün uçaklar aynı anda kalkış talep ettikleri için tüm uçaklar arasında daha planlama aşamasında çakışma bulunmaktadır. Modelin çakışma durumunda sağlayacağı çözümün analizi için bu senaryo oluşturulmuştur.

Tablo 7.2. *Senaryo-2 için uçak karması ve planlanan kalkış saatleri*

Uçak ID	Uçak Tipi	Planlanan Kalkış Zamanı	Yer Gecikmesi Limiti
		dk.	dk.
1	A320	2	30
2	A320	2	30
3	B738	2	30
4	A321	2	30
5	A321	2	30
6	A321	2	30
7	A321	2	30
8	A321	2	30
9	A321	2	30
10	B77W yerine A332	2	30
11	B77W yerine A332	2	30
12	B77W yerine A332	2	30
13	B77W yerine A332	2	30

Senaryo 3'te uçak sayısı altmışa çıkarılmış ve uçakların planlanan kalkış zamanları yine beşer dakika arayla belirlenmiştir. Senaryo 3'de kullanılan uçak karması Senaryo 1'de yer alan uçak karmasının ardışık olarak klonlanması ile elde edilmiştir. Bu senaryonun amacı matematiksel modelin çok sayıda uçak için çözüm sağlayıp sağlayamayacağını analizidir. Senaryo 3'e ait uçak karması ve planlanan kalkış zamanı Tablo 7.3'te yer almaktadır.

Tablo 7.3. Senaryo-3 için uçak karması ve planlanan kalkış saatleri

Uçak ID	Uçak Tipi	Planlanan Kalkış Zamanı	Yer Gecikmesi Limiti	Uçak ID	Uçak Tipi	Planlanan Kalkış Zamanı	Yer Gecikmesi Limiti
		dk.	dk.			dk.	dk.
1	A320	5	30	31	A321	155	30
2	A320	10	30	32	A321	160	30
3	B738	15	30	32	A321	165	30
4	A321	20	30	34	A321	170	30
5	A321	25	30	35	A321	175	30
6	A321	30	30	36	B77W yerine A332	180	30
7	A321	35	30	37	B77W yerine A332	185	30
8	A321	40	30	38	B77W yerine A332	190	30
9	A321	45	30	39	B77W yerine A332	195	30
10	B77W yerine A332	50	30	40	A320	200	30
11	B77W yerine A332	55	30	41	A320	205	30
12	B77W yerine A332	60	30	42	B738	210	30
13	B77W yerine A332	65	30	43	A321	215	30
14	A320	70	30	44	A321	220	30
15	A320	75	30	45	A321	225	30
16	B738	80	30	46	A321	230	30
17	A321	85	30	47	A321	235	30
18	A321	90	30	48	A321	240	30
19	A321	95	30	49	B77W yerine A332	245	30
20	A321	100	30	50	B77W yerine A332	250	30
21	A321	105	30	51	B77W yerine A332	255	30
22	A321	110	30	52	B77W yerine A332	260	30
23	B77W yerine A332	115	30	53	A320	265	30
24	B77W yerine A332	120	30	54	A320	270	30
25	B77W yerine A332	125	30	55	B738	275	30
26	B77W yerine A332	130	30	56	A321	280	30
27	A320	135	30	57	A321	285	30
28	A320	140	30	58	A321	290	30
29	B738	145	30	59	A321	295	30
30	A321	150	30	60	A321	300	30

Senaryo 4'te yer alan uçak karması tamamıyla Senaryo 3 ile aynıdır. Ancak Senaryo 4'te yer alan altmış uçağın her biri için planlanan kalkış saati 2. dakika olarak alınmıştır. Senaryo 4'te yer alan uçak karması Tablo 7.4'te verilmiştir. Bu senaryoda altmış uçağın tamamının planlanan kalkış saatleri arasında çakışma durumu mevcuttur. Bu senaryo ile matematiksel modelin çok sayıda uçak ve çok sayıda çakışmadan oluşan büyük ölçekli ve karışık bir probleme çözüm sağlayıp sağlayamadığı analiz edilmiştir.

Tablo 7.4. *Senaryo-4 için uçak karması ve planlanan kalkış saatleri*

Uçak ID	Uçak Tipi	Planlanan Kalkış Zamanı	Yer Gecikmesi Limiti	Uçak ID	Uçak Tipi	Planlanan Kalkış Zamanı	Yer Gecikmesi Limiti
		dk.	dk.			dk.	dk.
1	A320	2	30	31	A321	2	30
2	A320	2	30	32	A321	2	30
3	B738	2	30	32	A321	2	30
4	A321	2	30	34	A321	2	30
5	A321	2	30	35	A321	2	30
6	A321	2	30	36	B77W yerine A332	2	30
7	A321	2	30	37	B77W yerine A332	2	30
8	A321	2	30	38	B77W yerine A332	2	30
9	A321	2	30	39	B77W yerine A332	2	30
10	B77W yerine A332	2	30	40	A320	2	30
11	B77W yerine A332	2	30	41	A320	2	30
12	B77W yerine A332	2	30	42	B738	2	30
13	B77W yerine A332	2	30	43	A321	2	30
14	A320	2	30	44	A321	2	30
15	A320	2	30	45	A321	2	30
16	B738	2	30	46	A321	2	30
17	A321	2	30	47	A321	2	30
18	A321	2	30	48	A321	2	30
19	A321	2	30	49	B77W yerine A332	2	30
20	A321	2	30	50	B77W yerine A332	2	30
21	A321	2	30	51	B77W yerine A332	2	30
22	A321	2	30	52	B77W yerine A332	2	30
23	B77W yerine A332	2	30	53	A320	2	30
24	B77W yerine A332	2	30	54	A320	2	30
25	B77W yerine A332	2	30	55	B738	2	30
26	B77W yerine A332	2	30	56	A321	2	30
27	A320	2	30	57	A321	2	30
28	A320	2	30	58	A321	2	30
29	B738	2	30	59	A321	2	30
30	A321	2	30	60	A321	2	30

Oluşturulan matematiksel model her dört senaryo için GAMS yazılımında çalıştırılmış, rota planlaması ve optimizasyonu gerektiren bu problemler için yakıt, yer gecikmesi ve hava gecikmesi maliyetlerinden oluşan toplam maliyeti en küçükleyen bir optimizasyon süreci sağlanmıştır. Matematiksel modelin çözümlerine ait sonuçlar Tablo 7.5'te verilmiştir.

Tablo 7.5. Matematiksel modelin çözüm sonuçları

Senaryo No	Uçak Sayısı	Modele Girilen Çakışma Sayısı	Modelin Çözüm Süresi (sn.)	Bulunan Maliyet Değeri (avro)	Çözüm
Senaryo 1	13	0	1477	108774	Kanıtlanan optimal çözüm
Senaryo 2	13	13	10800	110443	Verilen sürede bulunan başlangıç çözümü
Senaryo 3	60	0	10800	Çözüm Yok	Makul süre dahilinde çözüm mevcut değil.
Senaryo 4	60	60	10800	Çözüm Yok	Makul süre dahilinde çözüm mevcut değil.

Matematiksel modelin çözümlerine bakıldığında sadece Senaryo 1 için kesin optimum sonuç sağladığı görülmektedir. Artan çakışma sayısı nedeni ile on üç uçak olmasına rağmen Senaryo 2 için verilen üç saatlik süre içinde kesin optimum sonuç elde edilememiş sadece başlangıç çözümü elde edilebilmiştir. Çakışma olmamasına rağmen Senaryo 3'te matematiksel model makul süre dahilinde çözüm üretememiştir. Artan uçak sayısı ile birlikte artan çakışma sayısında da Senaryo 4 için matematiksel model makul süre dahilinde çözüm bulamamıştır. Geline nokta da matematiksel modelin çözüm ürettiği ancak problem ölçekleri arttığı anda çözüm üretemediği görülmüştür. Bu nedenle büyük ölçekli problemler için meta sezgisel optimizasyon algoritmasının gerekliliği ortaya çıkmıştır.

7.2. Tavlama Benzetimi Çözüm Analizleri

Matematiksel modelin büyük ölçekli ve karmaşık problemlerde makul süreler dahilinde çözüm sunamaması nedeni ile bir meta sezgisel yöntem olan tavlama benzetimi ile çözüm aranmıştır. Bu kapsamda Londra-İstanbul uçuşları için oluşturulan dört farklı senaryo tavlama benzetimi yöntemiyle çözülmüştür. Her bir senaryoya ait tavlama benzetimi çözümleri Tablo 7.6'da yer almaktadır.

Tablo 7.6. *Tavlama benzetimi çözüm analizleri*

Problem	Uçak Sayısı	Modele Girilen Çakışma Sayısı	Çözüm Süresi	Amaç Fonksiyonunun Değeri
			(sn.)	(avro)
Senaryo 1	13	0	660	109582
Senaryo 2	13	13	825	116444
Senaryo 3	60	0	2716	494494
Senaryo 4	60	60	3263	716973

Tavlama benzetiminin çözümlerine bakıldığında her dört senaryo için çözüm sağladığı görülmektedir. Matematiksel modelin çözüm sunamadığı koşullar için de tavlama benzetiminin çözüm sağladığı görülmektedir.

7.3. Yakıt Tüketimi ve Mesafe Analizleri

Serbest ve sabit rotadan oluşan karma bir hava sahası olarak örnek alınıp incelenen Londra-İstanbul uçuşlarının geçtiği hava sahası üzerinde; gerçek uçuş verilerine dayalı türetilen dört farklı senaryo için hem matematiksel optimizasyon modeli hem de tavlama benzetiminden uyarlanan meta sezgisel optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Farklı boyutlarda ve karmaşıklıkta dört farklı senaryo ile matematiksel model ve tavlama benzetiminin farklı düzeylerdeki problemlere sağladıkları çözümler incelenmiştir. Matematiksel model ve tavlama benzetimi uçakların yakıt maliyeti, yer gecikmesi maliyeti ve hava gecikmesi maliyeti değerlerinden oluşan toplam uçuş maliyetini en aza indirgeyen rota tahsisi, yer gecikmesi tahsisi ve hava gecikmesi tahsisi sağlamıştır. Matematiksel modelin ve tavlama benzetiminin gerçek verilere göre sağlamış oldukları iyileştirme miktarlarının analizi için her bir uçağın uçuğu rota uzunluğu ve bu rota için tükettiği yakıt miktarları incelenmiştir. Gerçek uçuş verilerindeki rota bilgileri ile optimizasyon süreci sonrası matematiksel modelin ve tavlama benzetiminin belirledikleri rotalara ait yakıt tüketim değerleri ve uçuş mesafeleri Tablo 7.7’de verilmiştir. Tablo 7.7’de yer alan toplam uçuş mesafeleri uçakların kullandıkları yol noktalarının aralarındaki kuş uçuşu mesafelerin toplanması ile elde edilmiştir. Gerçek uçuş verilerindeki rotalar, matematiksel modelin belirlemiş olduğu rotalar ve tavlama benzetimi ile belirlenen rotalar için yakıt tüketimi hesaplaması; ilgili uçak tiplerinin uçuş hızları ve yakıt tüketim katsayıları olarak BADA verilerinde yer alan FL350 seviyesindeki nominal uçuş hızları ve nominal yakıt tüketim katsayıları dikkate alınarak

hesaplanmıştır. İncelemede kullanılan gerçek verilerde uçaklar arası herhangi bir çakışma bulunmadığından karşılaştırmada sadece on üç uçak arasında çakışma bulundurmeyen Senaryo-1 dikkate alınmıştır.

Tablo 7.7. Optimizasyon öncesi ve sonrasında yakıt tüketimi ve uçuş mesafesi değerleri

Gerçek Uçuş Verilerindeki Rota				Matematiksel Modelin Belirlediği Rota				Tavlama Benzetiminin Belirlediği Rota			
Uçak No	Uçak Tipi	Toplam Uçuş Mesafesi	Yakıt Tüketimi	Toplam Uçuş Mesafesi	Yakıt Tüketimi	Yer Gecikmesi Süresi	Hava Gecikmesi Süresi	Toplam Uçuş Mesafesi	Yakıt Tüketimi	Yer Gecikmesi Süresi	Hava Gecikmesi Süresi
		(NM)	(kg)	(NM)	(kg)	(dk.)	(dk.)	(NM)	(kg)	(dk.)	(dk.)
1	A320	1420	7914	1322	7368	0	0	1346	7502	0	0
2	A320	1369	7630	1322	7368	0	0	1346	7502	0	0
3	B738	1373	7634	1322	7350	0	0	1322	7350	0,2	0
4	A321	1374	8464	1322	8144	0	0	1324	8156	0	0
5	A321	1424	8772	1322	8144	0	0	1330	8193	0	0
6	A321	1379	8495	1322	8144	0	0	1335	8224	0	0
7	A321	1379	8495	1322	8144	0	0	1346	8292	0	0
8	A321	1359	8371	1322	8144	0	0	1350	8316	0	0
9	A321	1377	8482	1322	8144	0	0	1352	8328	0	0
10	A332	1365	16709	1322	16183	5,55	0	1323	16195	0	0
11	A332	1362	16672	1322	16183	2,55	0	1324	16207	0	0
12	A332	1376	16844	1322	16183	0	0	1348	16501	0	0
13	A332	1370	16770	1322	16183	0	0	1324	16207	0,05	0
TOPLAM:		17927	141252	17186	135678	8,10	0	17370	136971	0,25	0

Yapılan analizler ile gerçek uçuş verilerindeki rota yapısı ile matematiksel model ve tavlama benzetiminin sunduğu rota yapıları kıyaslanmıştır. Hem matematiksel modelin hem de tavlama benzetiminin uçuş mesafesi ve yakıt tüketiminde azalmalar sağlayarak uçuş maliyetini iyileştirdiği görülmektedir.

7.4. Matematiksel Model ile Tavlama Benzetimi Çözümlerinin Karşılaştırılması

Matematiksel model ve tavlama benzetiminin farklı problem boyutlarında sağladıkları çözümlerin analizi için dört farklı boyut ve karmaşıklıkta senaryo oluşturulmuştur. Her bir farklı senaryo için hem matematiksel model ile hem de tavlama benzetimi ile çözümler gerçekleştirilmiştir. Matematiksel model ve tavlama benzetiminin

sağlamış olduğu çözümler birbirleri ile kıyaslanmıştır. Her iki yöntemle gerçekleştirilen çözümlere ait sonuçlar Tablo 7.8’de yer almaktadır.

Tablo 7.8. Matematiksel model-tavlama benzetimi çözüm analizleri

Problem			Matematiksel Model		Tavlama Benzetimi	
Senaryo No	Uçak Sayısı	Modele Girilen Çakışma Sayısı	Çözüm Süresi	Amaç Fonksiyonunun Değeri	Çözüm Süresi	Amaç Fonksiyonunun Değeri
			(saniye)	(avro)	(saniye)	(avro)
Senaryo 1	13	0	1477	108774	660	109582
Senaryo 2	13	13	10800	110443	825	116444
Senaryo 3	60	0	10800	Çözüm Yok	2716	494494
Senaryo 4	60	60	10800	Çözüm Yok	3263	716973

Senaryo 1’de aralarında çakışma bulunmayan toplam on üç uçak için tavlama benzetimi yöntemi ile amaç fonksiyonunu en aza indiren çözüm aranmıştır. Aynı senaryo için matematiksel modelin kesin olarak bulduğu optimum değer 108.774 avrodur. Tavlama benzetimi ile yapılan çözümde ise elde edilen sonuç 109.582 avrodur. Bulunan bu sonuç 808 avroluk bir farkla optimum değere göre sadece %0,74 daha yüksektir. Tavlama benzetimi ile bulunan çözüm toplamda 900 iterasyon sonucunda 660 saniyede elde edilmiştir. Çözüm süresi açısından kıyasladığımızda matematiksel modelin çözüm süresinin yarısından daha kısa bir sürede çözüm sağlamıştır. Bu açıdan tavlama benzetimi çözüm süresi ile matematiksel modelin önüne geçmektedir.

Senaryo 2’de on üç uçak için toplam on üç çakışma durumu modele girilmiştir. Belirtilen on üç uçak için matematiksel model üç saat gibi makul bir sürede kesin optimum çözüm sağlayamamış ve başlangıç çözümü olarak 110.443 avroluk bir çözüm sunabilmiştir. Tavlama benzetimi ile yapılan çözümde ise 116.444 avro bulunmuştur. Bulunan bu değer matematiksel modelin sunduğu başlangıç çözümüne göre %5,43 daha yüksektir. Çözüm süresi olarak bakıldığında matematiksel model tanımlanan üç saatlik sürede kesin çözüme ulaşmadan sadece bir başlangıç çözümü verebilmiştir. Ancak tavlama benzetimi 825 saniye gibi kısa bir süre içerisinde çözüm sağlamıştır. Bu da yaklaşık olarak 13,75 dakikaya denk gelmektedir.

Senaryo 3’te aralarında çakışma bulunmayan toplam altmış uçak için hem matematiksel model hem de tavlama benzetimi yöntemi ile amaç fonksiyonunu en aza

indiren çözüm aranmıştır. Aynı senaryo için matematiksel model tanımlanan üç saatlik makul sürede herhangi bir çözüm sunamamıştır. Tavlama benzetimi ile yapılan çözümde ise 494.494 avroluk maliyet ile rota tahsisi elde edilmiştir. Matematiksel modelin 3 saatlik sürede başlangıç çözüm dahi sunamadığı bu probleme tavlama benzetimi 2716 saniye içerisinde çözüm sunabilmiştir. Çözüm süresi olarak 13 uçaklık küçük ölçekli problemin çözüm süresine göre daha uzun bir sürede de olsa tavlama benzetimi yöntemi altmış uçaklık problem için de çözüm sunabilmiştir. Matematiksel modelin yetersiz kaldığı ve çözüm üretmediği problem koşullarında tavlama benzetimi ile çözüm sağlanabilmiştir.

Senaryo 4'te yer alan problemde altmış uçak modele girilen altmış çakışma ile ele alınmıştır. Tavlama benzetimi ile elde edilen sonuçlarda 716.973 avro maliyet değeri ile rota tahsisi sağlanmıştır. Tavlama benzetimi 60 uçak için çakışmasız rota tahsisini gerçekleştirmiş ve 3263 saniyede çözüm sunabilmiştir. Aynı senaryo için matematiksel model üç saatlik makul süre içerisinde başlangıç çözümü dahi verememiştir.

Matematiksel model %4,13 lük bir mesafe iyileştirmesi sağlarken, yakıt sarfiyatında %3,95 değerinde bir iyileştirme sağlamaktadır. Tavlama benzetimi için bu iyileştirme değerleri mesafe için %3,11 yakıt sarfiyatı için ise %3,13'tür. Hem matematiksel modelin hem de tavlama benzetiminin belirledikleri yeni rota tahsisi, yer gecikmesi süreleri ve hava gecikmesi süreleri ile mevcut duruma kıyasla iyileştirme sağladıkları gözlemlenmiştir. Az sayıda uçak için matematiksel model çözümü ile iyileştirme sağlanabilirken çok sayıda uçak ve uçak çakışması için büyük ölçekli problemlerde matematiksel model makul süre içerisinde çözüm verememektedir. Matematiksel modelin çözüm sunamadığı durumlarda tavlama benzetimi algoritması ile problem üzerinde iyileştirmeler sağlanabilmiştir.

Hem matematiksel model hem de tavlama benzetimi yöntemi ile gerçekleştirilen optimizasyon süreci neticesinde elde edilen bu iyileştirmeler özellikle yoğun trafik koşullarında son derece önemli tasarruflar sağlanabileceğinin göstergesidir. Tavlama benzetimi ile 1000 uçaklık bir optimizasyon sürecinde aynı iyileştirme yüzdelerinin sağlanacağı düşünülürse 1000 uçaklık bir trafik karmasında elde edilecek olan toplam mesafe iyileştirmesi yaklaşık 42850 NM iken yakıt sarfiyatında elde edilecek iyileştirme 329277 kg'dır. Yakıt sarfiyatındaki bu azalma aynı zamanda egzoz emisyonlarında da kendini göstereceği için çevresel anlamda da çok önemli bir kazanım sağlanmış olacaktır.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Gerçekleştirilen tez çalışması kapsamında serbest ve sabit rotalı hava sahalarından oluşan jenerik bir hava sahasında uçuşlar için maliyeti en küçükleyen optimum rota planlaması amacıyla matematiksel model ve tavlama benzetiminin kullanıldığı meta sezgisel model geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel model ve tavlama benzetimi, uçaklar arası çakışmasız rotaların tahsisinde; uçak performansı, hava sahası kapasitesi ve ayırma minimumlarının oluşturduğu kısıtları dikkate alan tek amaçlı ancak çok boyutlu bir optimizasyon sağlamaktadır. Optimizasyon sürecinde gerçekleştirilen rota planlaması ile her iki modelde de hava sahası kapasiteleri, ayırma minimumları ve rota yapısı kısıtları altında bir rota tahsisi gerçekleştirilmektedir. Bu sayede gerçekleştirilecek olan optimizasyon çalışmalarında gerçek hayat koşullarının bir parçası olan rota yapılarındaki değişikliklerin, hava sahası kapasitesindeki değişimlerin ve ayırma minimumlarındaki değişikliklerin dahil edilebilmesi sağlanmıştır. Belirtilen bu kısıtların herhangi birindeki değişiklik dinamik olarak modele yansıtılabilmektedir. Geliştirilen modeller bu özellikleri ile gerçek hayat şartlarındaki değişikliklere kolaylıkla adaptasyon sağlayabilmektedir. En aza indirgenmeye çalışılan amaç fonksiyonunda yakıt maliyetleriyle birlikte yer gecikmesi maliyetleri ve hava gecikmesi maliyetlerinin de dikkate alınması; toplam maliyet içerisinde gecikmelerden kaynaklı pek çok dolaylı maliyetin de dikkate alınmasını sağlamıştır. Bu sayede sadece yakıt sarfiyatını en aza indirmek yerine yakıt sarfiyatı, yer gecikme süresi ve hava gecikme süresinin tümleşik şekilde ele alınıp iyileştirilmesi sağlanmıştır.

Geliştirilen her iki model ile en küçüklenmesi istenilen maliyet değerlerinde iyileştirmeler sağlandığı gözlemlenmiştir. Serbest ve sabit rotalı hava sahalarından oluşan karma hava sahası üzerinde matematiksel model ile %4,13 rota uzunluklarında kısalma, %3,95 yakıt sarfiyatında azalma sağlanmıştır. Yine aynı hava sahası için tavlama benzetimi algoritması ile rota uzunluklarında %3,11 kısalma, yakıt sarfiyatında ise %3,03 azalma elde edilmiştir. Yakıt sarfiyatlarında sağlanan iyileşme miktarı aynı zamanda uçuşlardan kaynaklı egzoz emisyon değerlerinde de azalma sağlamaktadır. Bu nedenle geliştirilen optimizasyon yöntemleri ile hem maddi kazanç hem de çevresel kazanç elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar serbest ve sabit rotalı hava sahalarının iç içe yer aldığı karma hava sahalarında rota planlaması aşamasında bütüncül bir yaklaşımla rota

optimizasyonunun gerekliliğini ve önemi göstermektedir. Ülkeler arası homojen olmayan farklı hava sahası yapıları sürdüğü müddetçe bu farklılıkları dikkate alan optimizasyon çalışmaları gerekecektir. Uçuşların planlanmasında farklı ülkelerin hava sahalarındaki pek çok farklı uygulamanın ve pek çok farklı kaynağın en verimli şekilde kullanılması ancak bütüncül bir yaklaşımla tüm kısıtlayıcıların dahil edildiği optimizasyon çalışmaları ile sağlanabilir. Bu nedenle karma hava sahalarındaki rota planlamasında da hava sahası kapasitelerini, ayırma minimumlarını, gecikme süreleri, yakıt maliyetlerini, yer gecikmesi maliyetlerini ve hava gecikmesi maliyetlerini dikkate alarak bütüncül bir yaklaşım içerisinde optimizasyon çalışmalarının yürütülmesinin gerekliliği anlaşılmıştır.

Geliştirilen rota planlaması ve optimizasyon yöntemi ile serbest rotalı hava sahalarında rota planlaması yapılırken bütüncül olarak sabit rotalı hava sahalarını da dikkate alan bir rota planlama ve optimizasyonu sağlanmaktadır. Bu sayede NMOC'nin de ihtiyaç duyduğu serbest rotalı hava sahalarının dışındaki rota yapısını dikkate alan ve değişen rota planlarına göre yeniden rotalamaya imkan sağlayan bir karar destek sistemi elde edilebilecektir. Bu karar destek sistemi ile serbest ve sabit rotalı hava sahalarından oluşan karma hava sahaları için rota planlaması ve optimizasyonu gerçekleştirilebilecektir. Gerçekleştirilen optimizasyon neticesinde önerilen rotalar hava trafik akış ve kapasite yönetiminde yer alan stratejik ve taktik öncesi planlama aşamalarında NMOC'ye rehberlik edebilecektir.

KAYNAKÇA

- Azadeh, S. S., Bierlaire, M., & Maknoon, M. Y. (2019). A two-stage route optimization algorithm for light aircraft transport systems. *Transportation Research Part C*, 100, 259-273.
- Barea, A., Celis, R. d., & Cadasro, L. (2019). Integration of airport terminal arrival route selection, runway assignment and aircraft trajectory optimisation. *22nd EURO Working Group on Transportation Meeting*, (s. 299-306). Barcelona, Spain.
- Beheshti, Z., & Shansuddin, S. H. (2013). A review of population-based Meta-Heuristic algorithm. *International Journal of Advances in Soft Computing and its Applications*, 5(1), 1-35.
- Blum, C., & Roli, A. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization: overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys*, 35(3), 268-308.
- Cai-long, C., & Wen-bo, D. (2014). A Multi-Objective crossing waypoints location optimization in Air Route Network. *3rd International Workshop on Intelligent Systems and Applications*, (s. 1-4). Wuhan.
- Camara, A., Rubio, T. R., Silva, D. C., & Oliveira, E. (2016). A comparative study of meta-heuristics for the aircraft landing scheduling problem. *11th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, (s. 1-4). Las Palmas.
- Chaimatanan, S., Delahaye, D., & Mongean, M. (2014). A hybrid metaheuristic optimization algorithm for strategic planning of 4D aircraft trajectories at the continental scale. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 9(4), 46-61.
- Chevalier, J., Delahaye, D., Sbihi, M., & Marechal, P. (2019). Departure and arrival routes optimization near large airports. *Aerospace*, 6(7).
- Cintrano, C., Chicano, F., & Alba, E. (2020). Using metaheuristics for the location of bicycle stations. *Expert Systems with Applications*, 161.
- Coelho, F. C., Peres, W., Junior, I. C., & Dias, B. H. (2020). Empirical continuous metaheuristic for multiple distributed generation scheduling considering energy

- loss minimisation, voltage and unbalance regulatory limits. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 14(16), 3301-3309.
- Cook, A., & Tanner, G. (2015). *European airline delay cost reference values*. Londra: University of Westminster.
- Courchelle, V., Soler, M., Arribas, D. G., & Delahaye, D. (2019). A simulated annealing approach to 3D strategic aircraft deconfliction based on en-route speed changes under wind and temperature uncertainties. *Transportation Research Part C*, 103, 194-210.
- DHMI. (2019, May). AIP ATS/RNAV Route Chart. Ankara, Turkey.
- Diaz, A. R., Diaz, B. A., & Torre, P. G. (2017). Minimizing deviation from scheduled times in a single mixed-operation runway. *Computers & Operations Research*, 78, 193-202.
- EUROCONTROL. (2018, Nisan 30). Demand Data Repository (DDR). Brussels, Belgium.
- EUROCONTROL. (2019). EUROCONTROL seven-year forecast autumn. Brussels, Belgium: EUROCONTROL Statistics and Forecast Service.
- EUROCONTROL. (2019, Kasım 19). European route network improvement plan – part 1. Brussels, Belgium.
- EUROCONTROL. (2019, Mayıs 7). IFPS user manual. Brussels, Belgium.
- EUROCONTROL. (2020, Ağustos 12). www.eurocontrol.int: <https://www.eurocontrol.int/concept/free-route-airspace> adresinden alındı
- EUROCONTROL. (2020, Temmuz 1). NM flight planning requirements guidelines edition 1.3. Brussels, Belgium.
- Gandomi, A. H., Yang, X.-S., Talatahari, S., & Alavi, A. H. (2013). *Metaheuristic applications in structures and infrastructures*. Elsevier.
- Gao, Y., & Zheng, T. (2010). Chaos genetic algorithm for aircraft route planning problem. *Second WRI Global Congress on Intelligent Systems*, (s. 280-284). Wuhan.

- Geng, X., & Hu, M. (2020). Simulated annealing method-based flight schedule optimization in multiairport systems. *Mathematical Problems in Engineering*, 1-8.
- Goel, U., Varshney, S., Jain, A., Maheshwari, S., & Shukla, A. (2018). Three dimensional path planning for UAVs in dynamic environment using Glow-worm Swarm optimization. *Procedia Computer Science*, 133, 230-239.
- Goez, G. D., Velasquez, R. A., & Botero, J. S. (2016, Nisan 4). On-Line route planning of UAV using particle swarm optimization on microcontrollers. *IEEE Latin America Transaction*, 14(4), 1705-1710.
- Hammouri, A. I., Braik, M. S., Al-Betar, A. M., & Awadallah, M. A. (2020). ISA: a hybridization between iterated local search and simulated annealing for multiple-runway aircraft landing problem. *Neural Computing and Applications*, 32(15), 11745-11765.
- Ho-Huu, V., Hartjes, S., Geijselaers, H. H., Visser, H. G., & Curran, R. (2017). Optimization of noise abatement aircraft terminal routes using a multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition. *6th CEAS Air & Space Conference Aerospace Europe*, (s. 157-168). Bucharest, Romania.
- Ho-Huu, V., Hartjes, S., Perez Castan, J. A., Visser, G. H., & Curran, R. (2020). A multilevel optimization approach to route design and flight allocation taking aircraft sequence and separation constraints into account. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 117.
- Ho-Huu, V., Hartjes, S., Visser, H. G., & Curran, R. (2019). An optimization framework for route design and allocation of aircraft to multiple departure routes. *Transportation Research Part D*, 76, 273-288.
- Hui, Y., Xin, Y., & Min, S. (2010). Particle swarm optimization route planner algorithm for air vehicle. *International Conference on Computer and Information Application ICCIA*, (s. 319-322). China.
- ICAO Annex 2. (2005, Temmuz). Rules of The Air.
- ICAO Doc 7030. (2008). Regional supplementary procedures.

- Jevtic, A., Andina, D., Jaimes, A., Gomez, J., & Jamshidi, M. (2010). Unmanned aerial vehicle route optimization using ant system algorithm. *5th International Conference on System of Systems Engineering*. United Kingdom.
- Kastella, K. (1991). Aircraft Route Optimization Using Adaptive Simulated Annealing. *National Aerospace and Electronics Conference NAECON* (s. 1123-1129). Dayton OH USA: IEEE.
- Keliewer, G., & Tschöke, S. (2000). A general parallel simulated annealing library and its application in airline industry. *Proceedings 14th International Parallel and Distributed Processing Symposium. IPDPS*, (s. 55-61). Cancun Mexico.
- Liu, J., Tang, S.-y., Li, Q., & Wang, W.-p. (2009). An ontology for aircraft route planning. *First International Conference on Advances in System Simulation*, (s. 68-72).
- Liu, J., Wang, Y., Hong, L., & Hong, X. (2020). Route planning of intelligent aircraft under multiple constraints. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 790, s. 1-1. IOP.
- Lu, W. C., Lee, M. T., & Wang, M. W. (2013). Route planning for light-sport aircraft in constrained airspace. *7th Asian-Pacific Conference on Aerospace Technology and Science APCATS*, 67, s. 140-146.
- Ma, J., Delahaye, D., Sbihi, M., Scala, P., & Mota, M. A. (2019). Integrated optimization of terminal maneuvering area and airport at the macroscopic level. *Transportation Research Part C*, 98, 338-357.
- Ma, J., Sbihi, M., & Delahaye, D. (2019). Optimization of departure runway scheduling incorporating arrival crossings. *International Transactions in Operational Research*, 1-23.
- Marzuoli, A., Gariel, M., Vela, A., & Feron, E. (2014). Data-Based modeling and optimization of en route traffic. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 37(6), 1930-1945.
- Mendoza, A. M., Botez, R. M., & Bunel, A. (2018). Four-dimensional aircraft en route optimization algorithm using the artificial bee colony. *Journal of Aerospace Information Systems*, 15(6), 307-334.

- Mendoza, A. M., Ternisien, L., Beuze, B., & Botez, R. M. (2018). Aircraft vertical route optimization by beam search and initial search space reduction. *Journal of Aerospace Information Systems*, 15(3), 157-171.
- Motta, A., Vieira, R., & Soletti, J. (2011). Optimal routing offshore helicopter using genetic algorithm. *6th IEEE Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC)*. China: IEEE.
- Osman, İ. H. (1995). An introduction to metaheuristics. M. Lawrence, & C. Wilsdon içinde, *An introduction to metaheuristics*. Hoskyns.
- Osman, İ. H., & Laporte, G. (1996). Metaheuristics: A bibliography. *Annals of Operational Research*, 63(5), 511-623.
- Pant, R., & Fielding, P. J. (1999). Aircraft configuration and flight profile optimization using simulated annealing. *Aircraft Design*, 2(4), 239-255.
- Ruther, S., Bolan, N., Engineer, F. G., & Evans, I. (2017, Şubat). Integrated aircraft routing, crew pairing, and tail assignment: Branch-and-Price with many pricing problems. *Transportation Science*, 51(1), 177-195.
- Sarıççek, İ., & Çelik, C. (2011). Two meta-heuristics for parallel machine scheduling with job splitting to minimize total tardiness. *Applied Mathematical Modelling*, 35(8), 4117-4126.
- Seenivasan, D. B., Olivares, A., & Staffetti, E. (2020). Multi-aircraft optimal 4D online trajectory planning in the presence of a multi-cell storm in development. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 110, 123-142.
- Shudao, Z., Jun, W., & Yongqi, J. (2012). Route planning for unmanned aircraft based on ant colony optimization and voronoi diagram. *International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application Intelligent System Design and Engineering Application*, (s. 732-735). Hainan, China.
- Smet, P. (2019). Ride sharing with flexible participants: a metaheuristic approach for large-scale problems. *InternationalL Transactions in Operational Research*, 28(1), 91-118.

- Song, M.-x., Li, J.-q., Han, Y.-q., Han, Y.-y., Liu, L.-l., & Sun, Q. (2020). Metaheuristics for solving the vehicle routing problem with the time windows and energy consumption in cold chain logistics. *Applied Soft Computing Journal*, 95.
- Sun, Y., Zhang, J., Wang, S., & Jiao, W. (2011). Research on real-time route planning for unmanned aircraft in geomagnetic matching guidance. *2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation Mechatronics and Automation (ICMA)* (s. 1741-1745). Beijing, China: IEEE.
- Tian, Y., Ye, B., Estupina, M. S., & Wan, L. (2018). Stochastic simulation optimization for route selection strategy based on flight delay cost. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 35(6).
- Tobaruela, G., Majumdar, A., & Ochieng, W. Y. (2012). Identifying airspace capacity factors in the air traffic management system. *ATACCS'2012 | DOCTORAL CONSORTIUM* (s. 219-224). London: ATACCS.
- Wang, Y., & Sun, H. (2010). Application of simulated annealing algorithm in airline fleet assignment problem. *International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application*, (s. 364-367). Changsha.
- Xu, J., Ning, A., Bower, G., & Kroo, I. (2014). Aircraft route optimization for formation flight. *Journal of Aircraft*, 51(2), 490-501.
- Yang, Y., Nan, Y., & Tong, M. (2018). Cooperative route planning for multiple aircraft in a semifree ATC system. *Mathematical Problems in Engineering*, 1-12.
- Yazdani, M., Khalili, S. M., Babagolzadeh, M., & Jolai, F. (2017). A single-machine scheduling problem with multiple unavailability constraints: A mathematical model and an enhanced variable neighborhood search approach. *Journal of Computational Design and Engineering*, 4(1), 46-59.
- Zhou, J., Cafieri, S., Delahaye, D., & Sbihi, M. (2016). Optimal design of SIDs/STARs in TMA using simulated annealing. *35th Digital Avionics Systems Conference (DASC)* (s. 1-8). Sacramento, CA,: IEEE/AIAA.

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0000-0002-4209-7395

Emre AYDOĞAN 1988 Ankara doğumludur. İlk ve orta öğretimini Ankara’da tamamlayan Emre AYDOĞAN lisans eğitimini Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu Havacılık Elektrik Elektronik bölümünde 2012 yılında tamamlamıştır. Lisans eğitimi ile birlikte Anadolu Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği (İngilizce) bölümünde de çift anadal eğitimini sürdürmüştür. 2012 yılında Elektrik ve Elektronik Mühendisliği bölümünden başarıyla mezun olmuştur. Lisans eğitiminin ardından Anadolu Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi Hava Trafik Kontrol bölümünde araştırma görevlisi olarak akademik hayatına başlamıştır. 2015 yılında Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Hava Trafik Kontrol Anabilim dalında tezli yüksek lisans eğitimini tamamlamıştır. Yüksek lisans eğitiminin ardından 2020 yılında Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsünde Hava Trafik Kontrol Anabilim dalında doktorasını tamamlamıştır. Hava trafik alanında çalışmalar yürüten Emre AYDOĞAN pek çok projede araştırmacı olarak görev almıştır. Hızlı zamanlı simülasyon, gerçek zamanlı simülasyon, rota planlaması, rota optimizasyonu çalışma konuları arasında yer almaktadır. Halen Eskişehir Teknik Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi Hava Trafik Kontrol Bölümünde Akademisyen olarak görev yapmaktadır.