



**OLUMSUZ HAVA KOŞULLARI ALTINDA
TRAFİK AKIŞININ ENİYİLENMESİ**

Doktora Tezi

Zekeriya KAPLAN

Eskişehir 2024

**OLUMSUZ HAVA KOŞULLARI ALTINDA TRAFİK AKIŞININ
ENİYİLENMESİ**

Zekeriya KAPLAN

Doktora Tezi

Hava Trafik Kontrolü Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Cem ÇETEK

(İkinci Danışman: Prof. Dr. Tuğba SARAÇ)

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ocak 2024

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Zekeriya KAPLAN'nın OLUMSUZ HAVA KOŞULLARI ALTINDA TRAFİK AKIŞININ ENİYİLENMESİ başlıklı çalışması 19/01/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Hava Trafik Kontrolü Anabilim dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye	: Prof. Dr. Cem ÇETEK
Üye	: Prof. Dr. Onur KAYA
Üye	: Doç. Dr. Ramazan Kürşat ÇEÇEN
Üye	: Prof. Dr. Melih Cemal KUŞHAN
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ERTEM

Prof. Dr. Semra KURAMA

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

19/01/2024

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Doktora ęrencisi Zekeriya KAPLAN, OLUMSUZ HAVA KOşULLARI ALTINDA TRAFİK AKIşININ ENİYİLENMESİ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Daniřmanı

Prof. Dr. Cem ETEK

ÖZET

OLUMSUZ HAVA KOŞULLARI ALTINDA TRAFİK AKIŞININ ENİYİLENMESİ

Zekeriya KAPLAN

Hava Trafik Kontrolü Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ocak 2024

Danışman: Prof. Dr. Cem ÇETEK

(İkinci Danışman: Prof. Dr. Tuğba SARAÇ)

Bu çalışma, hava trafik yönetiminin temel unsurlarından biri olan yörünge optimizasyonunu ele almakta ve özellikle konvektif hava koşulları altında uçuş rotası planlamasının zorluklarına odaklanmaktadır. Yörünge optimizasyonunun genel amacı, hava trafik akışını daha emniyetli ve verimli hale getirerek operasyonel verimliliği artırmaktır. Konvektif hava koşulları, dolu, rüzgâr kırılması, yıldırım ve şiddetli buzlanma gibi unsurları içerir, bu da uçaklar için emniyet riskleri oluşturur. Bu nedenle, pilotların bu bölgelerden kaçınması esastır. Ancak, konvektif hava koşulları nedeniyle uçakların planlanan rotalarından sapmaları, hava trafik akışında bozulmalara ve gecikmelere yol açabilir. Bu çalışmada, konvektif hava koşullarının etkisi altında uçuş rotası optimizasyonunun önemi incelenmiştir. Konvektif alanlardan kaçınma ve potansiyel çakışmaların çözümü, deterministik ve stokastik modellerle ele alınmıştır. Deterministik modelde, konvektif alanların sabit olduğu varsayılmış ve uçakların bu alanlardan çakışmasız bir şekilde kaçınarak optimizasyonu yapılmıştır. Stokastik model ise rüzgâr belirsizlikleri hesaba katılmıştır. Ayrıca, Kayan Ufuk Kontrolü yaklaşımı ile konvektif alan dinamikleri dikkate alınarak problem daha gerçekçi bir şekilde ele alınmıştır. Geliştirilen modellerin amacı, uçakların konvektif alanlardan kaçınarak toplam uçuş süresini minimize etmektir. Çalışma sonucunda stokastik modelin, deterministik modele göre sağladığı avantajlar belirlenmiş ve konvektif hava koşullarının hava trafik yönetimine etkisi değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, hava trafik kontrolörleri ve pilotların daha etkili kararlar alabilmeleri için önemli bir temel oluşturmaktadır. Geliştirilen algoritmalar, karar destek ve/veya otomasyon sistemleri üzerine inşa edilerek, hava sahasındaki uçakların rotalarını daha etkili ve koordineli bir şekilde planlamayı sağlayabilecek potansiyeldedir. Bu yaklaşımın uygulanması, pilotlar ve kontrolörlerin iş yükünü azaltacak, buna bağlı olarak da emniyet, verimlilik ve hava trafik yönetimi kapasitesi açısından olumlu sonuçlar doğuracaktır.

Anahtar Sözcükler: Hava trafik yönetimi, Konvektif hava koşullarından kaçınma, Karma tamsayılı doğrusal programlama, Stokastik programlama, Kayan ufuk kontrolü

ABSTRACT
**OPTIMIZATION OF TRAFFIC FLOW UNDER ADVERSE WEATHER
CONDITIONS**

Zekeriya KAPLAN

Department of Air Traffic Control

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, January 2024

Supervisor: Prof. Dr. Cem ÇETEK

(Co-Supervisor: Prof. Dr. Tuğba SARAÇ)

This study addresses trajectory optimization, a fundamental element of air traffic management, with a specific focus on the challenges of flight route planning under convective weather conditions. The main objective of trajectory optimization is to enhance operational efficiency by making air traffic flow more safety and efficient. Convective weather conditions involve elements such as hail, wind shear, lightning, and severe icing, posing safety risks for aircraft. Hence, it is essential for pilots to avoid these regions. However, deviations from planned routes due to weather conditions lead to disruptions and delays in air traffic flow. Avoidance of convective areas and resolution of conflicts are addressed using deterministic and stochastic models. In the deterministic model, convective areas are assumed to be fixed, and the optimization involves aircraft avoiding these areas without conflicts. The stochastic model incorporates wind uncertainties, and the problem is addressed more realistically by considering the dynamics of convective areas with the Rolling Horizon Control approach. The aim of the models is to minimize total flight time. The study reveals the advantages of the stochastic model over the deterministic model. The obtained results provide an important basis for controllers and pilots to make more effective decisions. The algorithms, built upon decision support and/or automation systems, have the potential to enable more effective and coordinated planning of the routes of aircraft. The implementation of this approach is expected to reduce workload for both pilots and controllers, accordingly, will have positive results in terms of safety, efficiency and air traffic management capacity.

Keywords: Air traffic management, Convective weather avoidance, Mixed-integer linear programming, Stochastic programming, Rolling horizon control.

TEŞEKKÜR

Öncelikli olarak, bu tez çalışması sürecinde beni her adımda cesaretlendiren, yönlendiren ve destek olan değerli danışmanlarım Prof. Dr. Cem Çetek ve Prof. Dr. Tuğba Saraç hocalarıma teşekkür etmek isterim. Beni bu zorlu akademik yolculukta sabırla yönlendirdikleri, bilgi ve deneyimleriyle rehberlik ettikleri için kendilerine minnettarım. Sizlerin öğretileri, vizyonunuz ve motive edici tutumunuz benim için gerçek bir ilham kaynağı oldu.

Ayrıca, bu tez çalışması sürecinde beni destekleyen değerli tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Onur Kaya ve Doç. Dr. Ramazan Kürşat Çeçen'e teşekkür etmek isterim. Değerli görüşleriniz, eleştirileriniz ve paylaştığınız bilgiler sayesinde bu tez çalışmasını daha zengin kıldınız.

Tez savunması sırasındaki yapıcı eleştiri ve katkıları ile tezin bilimsel niteliğini artıran saygıdeğer jüri üyeleri Prof. Dr. Melih Cemal Kuşhan ve Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ertem'e özel teşekkürlerimi sunmak isterim.

Tezimdeki konuyla ilgili fikir alışverişlerinde bulunduğum hocalarım Doç. Dr. Erdem Emin Maraş ve Dr. Öğr. Üyesi Veli Yavuz, Kontrolör Saner Sabahcı, Kaptan Pilot Erkan Öztürk ve Meteoroloji Uzmanı Serkan Kantarcı'ya teşekkür etmek isterim. Sizinle geçirdiğim her an, bilgi birikimime değer kattı.

Hayatım boyunca beni hep destekleyen ve emeklerinin karşılığını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim sevgili babam Ali Kaplan ve sevgili annem Dursun Kaplan'a şükranlarımı sunuyorum. Ayrıca, bu hayattaki zorlukları birlikte aştığımız kardeşim Nurşen Kaplan'a özel bir teşekkür sunmak isterim. Sizlerin sevgisi ve inancı olmadan, bu günlere gelemezdim ve bu çalışma tamamlanamazdı.

Ayrıca, bu zorlu tez sürecimde yanımda olan ve destekleriyle bana güç veren sevgili eşim Hacer Büşra Kaplan'a özel bir teşekkür sunmak isterim. Senin cesaretin, sabrın ve pozitif enerjin, bu yolculuğun her aşamasında beni motive etti. İnanılmaz desteklerin ve samimi ilgin, benim için paha biçilemezdi. Seninle bu süreci paylaşmak, bu tezi tamamlamamda önemli bir faktördü. Minnettarım ve her zaman yanımda olduğun için şanslı hissediyorum. Hayatımı renklendiren sevginle bu yolculuk daha anlamlı hale geldi.

Son olarak, bu tez çalışmasının gerçekleşmesine katkı sağlayan tüm arkadaşlarıma, meslektaşlarıma ve bu süreçte yardımcı olan herkese teşekkür ederim.

Zekeriya KAPLAN

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.

Zekeriya KAPLAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLolar DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XI
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XII
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	6
2.1. Çakışma Çözümleme Çalışmaları	6
2.2. Olumsuz Hava Koşulları Altında Gerçekleşmiş Uçuş Verilerini İnceleyen Çalışmalar	8
2.3. Tek Uçak İçin Konvektif Alanlardan Kaçınma Rotası Belirleyen Çalışmalar	11
2.4. Birden Fazla Uçak İçin Konvektif Alanlardan Kaçınma Rotası Belirleyen Çalışmalar	14
2.5. Birden Fazla Uçak İçin Konvektif Alanlardan Kaçınma Rotası Belirleyen Ve Çakışma Çözümleme Yapan Çalışmalar	15
2.6. TMA İçerisinde Olumsuz Hava Koşulları Altında Yörünge Planlaması Yapan Çalışma	17
2.7. Çalışmanın Özgünlüğü	20
3. METODOLOJİ.....	23

4. MATEMATİKSEL MODELLEME	30
4.1. Deterministik Matematiksel Model.....	30
4.2. Stokastik Matematiksel Model	34
4.2.1. Uçakların yere göre hızlarının hesaplanması	37
4.2.2. Rüzgâr senaryolarının belirlenmesi.....	37
4.3. İki Aşamalı Stokastik Programlama Modeli.....	40
5. KAYAN UFUK KONTROLÜ (RHC) YAKLAŞIMI	45
5.1. RHC Yaklaşımının Uygulanması	46
5.2. Konvektif Alanların Belirlenmesi.....	51
6. SAYISAL SONUÇLAR.....	56
7. TARTIŞMA VE SONUÇ	76
KAYNAKÇA.....	79
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. Konvektif alanlardan kaçınma ilgili literatür özeti	19
Tablo 3.1. Hava radarı yağış şiddeti terminolojisi (Federal Aviation Administration, 2013)	27
Tablo 4.1. Ortak gözlenen rüzgâr yönü ve rüzgâr hızı veri sayıları.....	39
Tablo 4.2. Rüzgâr senaryoları ve olasılıkları	40
Tablo 6.1. CB-1 senaryosundaki test problemlerinin sonuçları	58
Tablo 6.2. CB-2 senaryosundaki test problemlerinin sonuçları	64
Tablo 6.3. CB-3 senaryosundaki test problemlerinin sonuçları	66
Tablo 6.4. CB-4 senaryosundaki test problemlerinin sonuçları	69
Tablo 6.5. CB-5 senaryosundaki test problemlerinin sonuçları	71

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Olumsuz hava koşullarından kaçınma.....	5
Şekil 3.1. Konvektif alanların olduğu genel bir hava sahası	24
Şekil 3.2. Konvektif bulut ile uçak arasında olması gereken mesafe (Airbus, 2016)	25
Şekil 3.3. Hava radarı kokpit ekranı	26
Şekil 3.4. Hava durumu radarı yansıma prensibi (Airbus, 2016; Federal Aviation Administration, 2013)	27
Şekil 3.5. Konvektif alanlardan kaçınma rotaları	28
Şekil 3.6. Çalışmanın genel metodolojisi	29
Şekil 4.1. FL350 için rüzgâr yönü ve frekansı	38
Şekil 4.2. FL350 için rüzgâr hızı ve frekansı	39
Şekil 5.1. Kayan ufuk kontrolü yaklaşımı	46
Şekil 5.2. RHC akış şeması	48
Şekil 5.3. RHC yaklaşımının sözde (pseudo) kodu	50
Şekil 5.4. Meteoroloji radar görüntüsü	52
Şekil 5.5. 29 Eylül 2020 tarihindeki İstanbul radar görüntüleri	54
Şekil 5.6. 29 Eylül 2020 tarihindeki İstanbul radar görüntülerinin hava sahasındaki görünüşleri	55
Şekil 6.1. CB-1 senaryosu hava sahası görünüşleri	57
Şekil 6.2. CB-2 senaryosu hava sahası görünüşleri	62
Şekil 6.3. CB-3 senaryosu hava sahası görünüşleri	65
Şekil 6.4. CB-4 senaryosu hava sahası görünüşleri	68
Şekil 6.5. CB-5 senaryosu hava sahası görünüşleri	70
Şekil 6.6. CB-5 senaryosu uçuş rotaları-1	73
Şekil 6.7. CB-5 senaryosu uçuş rotaları-2	74
Şekil 6.8. CB-5 senaryosu uçuş rotaları-3	74
Şekil 6.9. CB-5 senaryosu uçuş rotaları-4	75

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ATCO	: Air Traffic Controller (Hava Trafik Kontrolörü)
ATFM	: Air Traffic Flow Management (Hava Trafik Akış Yönetimi)
ATM	: Air Traffic Management (Hava Trafik Yönetimi)
BADA	: Base of Aircraft Data (Uçak Veri Tabanı)
CDO	: Continuous Descent Operations (Devamlı Alçalma Operasyonları)
CIT	: Convectively Induced Turbulence (Konvektif Kaynaklı Türbülans)
CIWS	: Corridor Integrated Weather System (Koridor Entegre Hava Durumu Sistemi)
CTR	: Control Zone (Kontrol Bölgesi)
CWAM	: Convective Weather Avoidance Model (Konvektif Hava Koşullarından Kaçınma Modeli)
DCIT	: Diagnostic Convectively Induced Turbulence (Tanısal Konvektif Kaynaklı Türbülans)
DWR	: Dynamic Weather Routes (Dinamik Hava Durumu Rotaları)
ETMS	: Enhanced Traffic Management System (Gelişmiş Trafik Yönetim Sistemi)
FAA	: Federal Aviation Administration (Federal Havacılık İdaresi)
METAR	: Meteorological Terminal Air Report (Meydan Rutin Hava Raporu)
MILP	: Mixed Integer Linear Programming (Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama)
MINLP	: Mixed Integer Non-Linear Programming (Karma Tam Sayılı Doğrusal Olmayan Programlama)
MPC	: Model Predictive Control (Model Öngörülü Kontrol)
NASA	: National Aeronautics and Space Administration (Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi)
NMPC	: Nonlinear Model Predictive Control (Doğrusal Olmayan Model Öngörülü Kontrol)
NWP	: Numerical Weather Prediction (Sayısal Hava Tahmini)
RHC	: Rolling Horizon Control (Kayan Ufuk Kontrolü)
TAF	: Terminal Aerodrome Forecast (Meydan Havalimanı Tahmini)
TMA	: Terminal Maneuvering Area (Terminal Manevra Sahası)
TOMATO	: Toolchain for Multi-criteria Aircraft Trajectory Optimization (Çok Kriterli Uçak Yörünge Optimizasyonu için Araç Zinciri)
WAF	: Weather Avoidance Field (Hava Koşullarından Kaçınma Alanı)

1. GİRİŞ

Yörünge optimizasyonu, Hava Trafik Yönetimi (ATM) sisteminin temel taşlarından birisidir. Genel olarak, yörünge optimizasyonunun amacı, emniyet gereksinimlerini yerine getirerek hava trafik akışını daha verimli hale getirmektir. Bu amaç doğrultusunda yakıt tasarrufu, operasyonel verimlilik, emniyet ve çevresel sürdürülebilirlik gibi alanlarda katkı sağlamaktadır. Ayrıca, daha iyi planlanmış uçuş rotaları sayesinde, hava trafik kontrolörleri (ATCOs) uçakları daha etkili bir şekilde yönlendirebilmekte ve trafiği daha iyi yönetebilmektedirler. Bu da havaalanlarının ve hava sahalarının daha verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır.

Yörünge optimizasyonu, düşük maliyetli uçuşlar elde etmeyi ve genel operasyonel verimliliği artırmayı amaçlamaktadır. Ancak uçak operasyonları üzerinde önemli bir etkiye sahip olan konvektif hava bölgeleri hava trafik yönetim (ATM) sistemi içerisinde uçak yörünge planlamasında zorluklar yaratmaktadır. Bu bölgelerde meydana gelen dolu, rüzgâr kırılması, yıldırım, şiddetli buzlanma ve türbülans gibi hava olayları uçaklar için büyük emniyet riskleri oluşturmaktadır. Bu nedenle, pilotların emniyetli bir şekilde uçuşlarını sürdürmeleri için bu bölgelerden kaçınmaları gerekmektedir. Dolayısıyla uçakların bu olaylardan kaçınmasına yardımcı olan bir uçuş rotası planlama algoritması ATM'de önemli bir rol oynamaktadır.

Konvektif hava koşullarından kaçınmak, planlanan uçuş planlarından sapmalara ve birden fazla uçuşun aynı anda etkilenmesinden dolayı hava trafik akışında bozulmalara yol açar. Bu tür bozulmalar uçuş süresini ve gecikmeyi artırarak hava sahasında tıkanıklığa ve ek yakıt tüketimine neden olur. Konvektif hava koşulları nedeniyle meydana gelen gecikmeler hava trafiğinin tahminini güçleştirerek hava trafik yönetimini karmaşılaştırır. Bunlara ek olarak, karar verme, türbülans, buzlanma yönetimi ve artan iletişim nedeniyle uçak ekibinin iş yükünde önemli ölçüde artış meydana gelir. Benzer şekilde, hava trafik kontrolörlerinin konvektif hava koşullarından dolayı sınırlanan hava sahası ve düzensiz hale gelen hava trafiği nedeniyle iş yüklerinde önemli bir artış yaşanır. Tüm bu faktörler hava sahası kapasitesini düşürür ve uçuş verimliliğini olumsuz etkiler. Ayrıca, konvektif alanların doğasında var olan belirsizlikler gelişmiş emniyet önlemleri ve otomatik yeniden yönlendirme sistemleri gerektirir.

Olumsuz hava koşulları, Avrupa'da Hava Trafik Akış Yönetimi (ATFM) gecikmelerinin ana nedeni olmaya devam etmektedir. Yılda yaklaşık 4 milyon dakikalık gecikme, yol hava sahası (en-route) uçuşları sırasında olumsuz hava koşullarına

atfedilmektedir (SESAR, 2023). Temmuz 2023'te Avrupa'da, fırtınalar dahil olmak üzere birçok konvektif hava koşulu yaşanmıştır. EUROCONTROL, bu ay için hava kaynaklı ATFM gecikmesinin bir önceki yılın iki buçuk katını aştığını bildirmiştir. Hava kaynaklı faktörler hariç tutulduğunda, uçuş başına ATFM gecikmeleri, hava trafiğinde %7 artışa rağmen neredeyse dörtte bir oranında azalmıştır. Bununla birlikte, olumsuz hava koşullarının etkisi dikkate alındığında, gecikmeler uçuş başına 3,9 dakikadan 4,1 dakikaya çıkarak küçük bir artış göstermiştir (EUROCONTROL, 2023a). Bu veriler, konvektif hava koşullarının hava trafik gecikmeleri üzerindeki etkisini önemli ölçüde ortaya koymaktadır. Bu etkiyi en aza indirmek ve uçuş verimliliğini artırmak için geliştirilmiş stratejilere ihtiyaç duyulduğunu vurgulamak gerekir. Bu nedenle, EUROCONTROL, olumsuz hava koşullarının iş birliği içinde yönetilmesini sağlamak amacıyla SMART Weather Task Force programını başlatmıştır (EUROCONTROL, 2023b).

İklim değişikliğinin günümüzün konvektif hava olayları üzerinde de etkisi bulunmaktadır. İklim değişikliği nedeniyle küresel sıcaklıklar yükseldikçe, çeşitli atmosferik koşullar değişmektedir. Atmosferik koşullardaki bu değişimler fırtınalar, hortumlar ve şiddetli yağışlar gibi konvektif hava olaylarının meydana gelmesini etkilemektedir. Ancak, etkilerin bölgesel ve yerel koşullara bağlı olarak değişebileceğini belirtmek önemlidir. Bazı çalışmalarda araştırmacılar, iklim ısınmasının fırtınalar dahil olmak üzere hava olayları üzerindeki etkisini incelemişler ve bazı bölgelerde sık ve şiddetli fırtına olayları yaşanırken, bazılarında farklı iklim değişikliklerinin görüldüğünü belirtmişlerdir (Allen, 2018; Brooks, 2013; Haberlie vd., 2022; Raupach vd., 2021).

Olumsuz hava koşullarından kaçınma zorluğuna ek olarak, uçaklar arasındaki potansiyel çakışmalar da bir başka kritik konu olarak ortaya çıkmaktadır. Pilotlar uçuşları sırasında yerleşik hava durumu radarını kullanarak konvektif hava koşullarını tespit ettikleri zaman uygun kaçınma manevralarını belirlemek için hava trafik kontrolörü ile irtibata geçerler. Aynı hava sahasındaki birden fazla pilot benzer taleplerde bulunabilir. Birden fazla uçağın uçuş rotalarından sapması durumunda yeni çakışmalar ortaya çıkabilir. Hava trafik kontrolörleri, uçaklar arasındaki olası çakışmaları saptamak ve bu çakışmaların emniyetli şekilde çözmekten sorumludurlar. Bununla birlikte, olumsuz hava koşulları nedeniyle hava sahasındaki çakışmaları çözmek için yatay ve düşey düzlemlerdeki kullanılabilir alanlar önemli ölçüde sınırlanabilmektedir. Düzensiz trafik akışı ve hava sahasındaki bu sınırlamalar hava trafiğinin karmaşıklığını ekleyerek hava

sahasında tıkanıklıklara neden olmaktadır. Hava sahasında giderek artan bu tıkanıklıklar hava trafik kontrolörlerinin iş yükünü ciddi derecede artırmaktadır. Bu sorunu çözmek için, konvektif hava koşullarında çakışmasız rotalar öneren algoritmaların geliştirilmesi zorunluluk haline gelmektedir. Bu algoritmalara dayalı karar destek ve/veya otomasyon sistemleri, hava sahasındaki uçakların rotalarını planlamak ve koordine etmek için daha etkili ve verimli araçlar olacaklardır. Sonuç olarak, bu algoritmalar sayesinde pilotların ve kontrolörlerin iş yükünde önemli bir azalma meydana gelecektir. Bu da emniyet, verimlilik ve ATM kapasitesi açısından olumlu sonuçlar doğuracaktır.

Konvektif alanlarla karşılaşılması durumunda pilotların uçuşlarına emniyetli bir şekilde devam edebilmeleri için ne yapmaları gerektiğini açıklayan bazı kaçınma kılavuzları yetkili kuruluşlar tarafından sunulmuştur (Airbus, 2016; Federal Aviation Administration, 2013; ICAO, 2016a; ICAO, 2016b). Ancak, Trier ve Sharman (2009) bu kuralların yetersiz olduğunu ve fırtınaları çevreleyen tehlikeli türbülans koşullarının aşırı derecede basitleştirildiği göstermişlerdir. Çünkü pilotların hava koşullarına ilişkin karar verme süreçleri oldukça karmaşık ve dinamiktir. Pilotlar, uzaktan algılanan verilerden ve gözlemlenen uçuş yörüngelerinden elde edilen bilgilerin yanı sıra kendi deneyimlerine ve gerçek zamanlı hava durumu gözlemlerine dayanarak kararlar verirler (Rubnich ve Delaura, 2010). Üstelik bazı meteorolojik koşullar önceden tahmin edilebilse de konvektif alanların spesifik yerini ve zamanını belirlemek zordur. Bu nedenle, konvektif alanların tahmini ve bu alanlardan kaçınma uçuş sırasında kısa zaman aralıklarında gerçekleşir. Bu çalışmada önerilen yaklaşımın amacı kısa zaman aralıkları için konvektif alanlar tespit edildikten sonra kaçınmaların sağlandığı çakışmasız uçuş rotaları üreterek kontrolörlere ve pilotlara rehberlik sağlamaktır.

Bu çalışmada, belirli bir hava sahasında olumsuz hava koşulları altında gerçekleşen yol safhası uçuşları için emniyetli bir hava trafik akışının sağlanması amaçlanmaktadır. Olumsuz hava koşullarının etkili olduğu konvektif alanların bulunduğu hava sahasında hem uçaklar hem de uçaklar ile konvektif alanlar arasındaki emniyet gereksinimlerini yerine getiren modeller kurularak en iyi uçuş rotalarının belirlenmesi hedeflenmektedir. Böylece geliştirilen modeller ile elde edilen uçuş rotaları hava trafik kontrolörleri ve pilotlara rehberlik sağlayacak kabiliyette olacaktır.

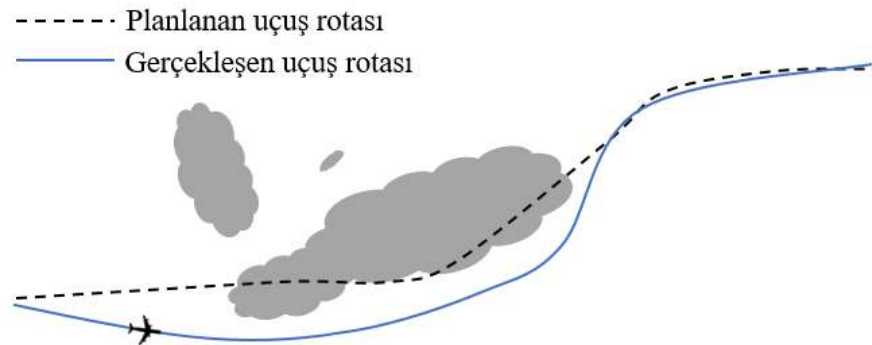
Problemin Tanımı

Türbülans, aşağı-yukarı yönlü rüzgarlar, sağanak yağış ve dolu gibi olumsuz hava koşullarının yoğun bir şekilde yaşandığı konvektif alanlar hava trafik emniyetini, yönetim performansını ve verimliliğini önemli ölçüde etkileyen olgulardır. Bu alanlardaki doğal belirsizlik emniyet açısından uçaklar için risk oluşturmaktadır. Bu nedenle, pilotların konvektif alanlardan kaçınması ve gerekli emniyet mesafesini koruması gerekmektedir. Konvektif alanlarla karşılaşılan bir hava sahasında uçuş operasyonlarını emniyetli bir şekilde sürdürmek için pilotların bu alanlardaki bulutların oluşumu, gelişimi ve özellikleri hakkında iyi bir meteorolojik bilgiye sahip olması gerekir. Bu bilgi genellikle pilot lisanslama ve operasyonel eğitim süreçlerinde sağlanmaktadır.

Olumsuz hava koşullarını belirleme ve bu koşullardan kaçınma, uçuşa başlamadan önce briefing odasında yapılan değerlendirmeler ile başlar. Uçuş ekibi bu aşamada hem hava durumu briefingi hem de yerel iklim bilgilerine dayalı olarak aktif hava koşullarından kaçınılan bir uçuş rotası planlama fırsatına sahiptir. Ayrıca uçuş rotasında yapılan değişiklik durumunda farklı uçuş seviyeleri ve daha uzun yolları kullanmaktan dolayı ortaya çıkan ek yakıt ihtiyacı gibi diğer önemli durumlara da karar verirler. Her ne kadar konvektif alanların oluşumu için gerekli olan bazı meteorolojik koşullar önceden tahmin edilebilse de spesifik olarak yeri ve zamanlamasını belirlemek zordur. Bu sebeple, konvektif alanların doğal belirsizliği ve dinamikliği sonucu gelecekteki olası gelişimler nedeniyle uçuş ekibi tarafından seçilen rota yeterince emniyetli olmayacak ve yeniden rota belirlemeyi gerektirecektir. Sonuç olarak hem konvektif alan tahmini hem de bu alanlardan kaçınma, kısa zaman aralıklarında, esas olarak uçuş sırasında gerçekleşmektedir (Seenivasan, Olivares ve Staffetti, 2020). Uçuş sırasında karşılaşılan konvektif alanlar gibi olumsuz hava koşulları ve bunlarla ilgili diğer belirsizliklerle (rüzgâr vb.) başa çıkmak ATM için çok önemlidir. Olumsuz hava olayının karşılaşıldığı hava sahasında bulunan uçaklar için emniyetli bir hava trafik akışı sağlamanın yanında gecikme ve yakıt tüketimindeki artış ile hava sahası kapasitesindeki düşüş sınırlandırılmalıdır. Bu nedenle, olumsuz hava koşulları altında daha verimli ve emniyetli bir trafik akışı sağlamak için gerekli görevi otomatik olarak yerine getiren ve çözümler üreten algoritmalar geliştirme ihtiyacı doğmaktadır.

Uçuş boyunca pilotlar atmosferik koşullara ilişkin görsel izlenimlerin yanında uçuş öncesinde elde ettikleri hava durumu bilgisi, pilotun hava sahası hakkında bilgi ve deneyimi, rapor edilen türbülans ve güncel hava durumu raporları olmak üzere mevcut

tüm bilgilerle birlikte kokpitte yer alan hava radarını aktif olarak kullanırlar. Şekil 1.1’de verildiği gibi planlanan uçuş yörüngesinin geçtiği hava sahasında olumsuz hava ile karşılaşan pilot, olumsuz hava koşullarının hava radarını aktif bir şekilde kullanarak kaçınma yörüngesinin nasıl olacağına karar verir. Uçuş rotasında yapılacak manevralar için pilot, sorumlu hava trafik kontrolöründen izin almalıdır. Pilot tarafından talep edilen değişiklik kontrolör tarafından onaylanabilir veya reddedilebilir. Ancak olumsuz hava koşullarının meydana geldiği hava sahasından sorumlu olan kontrolör emniyetli trafik akışını sürdürerek pilotun verdiği bilgiler doğrultusunda talebini onaylayabilir veya uygun yeni bir kaçış rotası belirleyebilir. Dünya çapındaki birçok kontrol merkezinde, kontrolörlerin hava durumu bilgilerine erişimi sınırlıdır ya da mevcut hava durumu bilgilerine ulaşımı yoktur. Bu nedenle, pilotlar tarafından hangi hava koşulları için kaçınma rotalarının istenebileceğini önceden bilemezler ve kaçınma manevraları öneremezler. Ayrıca, aynı hava sahasındaki diğer pilotlardan da benzer kaçınma talepleri gelecek ve uçaklar belirli bir bölgede toplanmaya başlayacaklardır. Bu sebeple kontrolör uçaklar arasındaki olası çakışmaları saptamak ve bu çakışmaları emniyetli şekilde çözmek için gerekli kararları alacaktır. Ancak, kullanılabilir hava sahası alanının azalması beraberinde zorlukları ve olumsuz etkileri de getirecektir. Bunun sonucunda gecikmelerde ve yakıt tüketiminde meydana gelen artışlar hava sahası verimliliğini düşüreceklerdir. Ayrıca kontrolör iş yükünde de önemli ölçüde artış meydana gelecektir. Sonuç olarak, olumsuz hava koşulları altında hava sahasındaki belirsizlikleri hesaba katan ve hava sahası kapasitesini verimli şekilde kullanarak emniyetli bir trafik akışı sağlayan algoritmalar geliştirmeye ihtiyaç vardır.



Şekil 1.1. Olumsuz hava koşullarından kaçınma

2. LİTERATÜR TARAMASI

Olumsuz hava koşulları üzerine yapılan çalışmalarda bir ya da birden fazla uçağın konvektif alanlardan kaçınması problemi ele alınmıştır. Bu çalışmada hem konvektif alanlardan kaçınma hem de uçaklar arasındaki çakışmaları çözümüleme problemi incelenmiştir. Literatürdeki çakışma çözümüleme çalışmaları, olumsuz hava koşulları altında gerçekleşmiş uçuş verilerini inceleyen çalışmalar, tek uçak için konvektif alanlardan kaçınma rotası belirleyen çalışmalar, birden fazla uçak için konvektif alanlardan kaçınma rotası belirleyen çalışmalar, birden fazla uçak için konvektif alanlardan kaçınma rotası belirleyen ve çakışma çözümüleme yapan çalışmalar ve terminal manevra sahası (TMA) içerisinde konvektif hava koşulları altında yörünge planlaması yapan bir çalışma hakkında bilgi verilmiştir.

2.1. Çakışma Çözümüleme Çalışmaları

Uçaklar arasındaki çakışmaları çözümüleme, hava trafik operasyonlarının önemli bir parçasıdır. Literatürde, yol safhası operasyonlarında uçak çakışmalarını çözümülemeye yönelik çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar, hava sahasının emniyetli ve verimli yönetimini sağlamak için etkin çakışma çözümüleme tekniklerini, manevra stratejilerini ve çözüm yaklaşımlarını araştırmışlardır. Araştırmacılar, karma tamsayılı doğrusal programlama (MILP) ve karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama (MINLP) dahil olmak üzere çeşitli matematiksel modellerin yanı sıra sezgisel ve metasezgisel algoritmalar sunmuşlardır. Bu modellerde ve algoritmalarda, hava sahası içerisinde baş açısı, hız ve irtifa değişikliği manevraları ile çakışmaları çözmek için hava sahası kesikleştirme ve geometrik yapıya dayalı kesikleştirme teknikleri kullanılmaktadır.

Çeçen ve Çetek (2020) giriş noktası atama ve hız değişikliği manevralarını kullanarak uçaklar arasındaki potansiyel çakışmaları çözmüşlerdir. Başka bir çalışmada, Çeçen ve Çetek (2019) çakışma çözümü için giriş noktası atama ve baş açısı değiştirme manevralarını kullanmıştır. Ayrıca, Çeçen, Saraç ve Çetek (2021) baş açısı ve irtifa değişikliği manevraları içeren çakışma çözümüleme modeli geliştirmişlerdir. Üç çalışmada da yazarlar hava sahası kesikleştirme tekniğini kullanmış ve hava sahasının sınırları içinde kalan tanımlanmış bir tampon bölgede çakışma çözümü manevralarını gerçekleştirmişlerdir. Çözüm yöntemi olarak matematiksel modellemenin yanında Tavlama Benzetimi, Tabu Arama gibi metasezgisel algoritmaları önermişlerdir. Diğer

araştırmacılar (Cafieri ve Durand, 2014; Cafieri ve Rey, 2017; Omer, 2015; Vela vd., 2009) ise hava sahası sınırları içinde herhangi bir tampon bölge tanımlamadan çakışmaları çözümlmek için hava sahası kesikleştirme tekniğini kullanmışlardır. Bu çalışmalarda çözüm yöntemi olarak matematiksel modeller sunulmuş olup, Cafieri ve Durand (2014) ek olarak sezgisel bir algoritmanın kullanımını önermiştir.

Yukarıdaki çalışmaların yanında, geometrik yapı yaklaşımına dayalı olarak geliştirilen matematiksel modellerin sunulduğu çalışmalar yapılmıştır. Alonso-Ayuso, Escudero ve Martín-Campo (2012) çalışmasında uçaklar arasındaki çakışmaları çözümlmek için sadece hız değişikliği manevrasını kullanılırken, Alonso-Ayuso, Escudero ve Martín-Campo (2014) çalışmasında sadece baş açısı değişikliği manevrasını kullanmıştır. Ancak bazı çalışmalarda (Cafieri ve Omheni, 2017; Christodoulou ve Costoulakis, 2004; Pallottino, Feron ve Bicchi, 2002; Vela vd., 2010) hem baş açısı hem de hız değişikliği manevraları kullanılmıştır. Ayrıca, (Alonso-Ayuso, Escudero ve Martín-Campo, 2011; Alonso-Ayuso vd., 2011) çalışmaları hem irtifa hem de hız değişikliği manevraları kullanılarak yürütülmüştür. (Alonso-Ayuso, Escudero ve Martín-Campo, 2016) çalışmasında her üç manevrayı da kullanmıştır. Öte yandan, sezgisel algoritma (Erzberger ve Heere, 2010) ve Parçacık Sürüsü Optimizasyonu metasezgisel algoritması (Hong vd., 2017) kullanılarak çözümler üretilmiştir. İlk çalışmada sadece baş açısı değişikliği kullanılırken, ikinci çalışmada hem baş açısı hem de hız değişikliği manevraları kullanılmıştır.

Hava sahası kesikleştirme yaklaşımında kullanılan düğüm sayısı, modelin çözüm süresini ve kalitesini etkilemektedir. Daha fazla sayıda düğüm daha iyi çözümlere yol açmaktadır. Ancak hem hava sahası kesikleştirme hem de geometrik yapıya dayalı kesikleştirme tekniklerinde çözüm süresini de düğüm sayısına bağlı olarak artmaktadır. Kaplan, Çetek ve Saraç (2023) uçaklar arasındaki çakışmaları çözümlmek için matematiksel bir model sunmuştur. Çalışmalarında, kesikleştirme oranının çözüm süresi ve çözüm kalitesi üzerindeki etkisini incelemek için hava sahasını kesikleştirme tekniğinde düşük, orta ve yüksek oranlı olarak tanımladıkları belirli düğüm sayılarını kullanmışlardır. Böylece, hava sahası kesikleştirme oranının artırılması durumunda elde edilen çözüm kalitesi ile çözüm süresi arasındaki ödünleşmeyi irdelemişlerdir. Ayrıca, problemin karmaşıklığı arttıkça en iyi çözümlere kabul edilebilir sürelerde ulaşabilmek için bir çözüm yaklaşımı da önermişlerdir.

2.2. Olumsuz Hava Koşulları Altında Gerçekleşmiş Uçuş Verilerini İnceleyen Çalışmalar

Bu bölümde verilen çalışmalarda, gerçekleşmiş olan konvektif alanların gerçek verilerini ve bu alanların gerçekleştiği hava sahasındaki gerçek uçuş verilerini inceleyerek pilotların kaçınmak için nasıl bir rotayı izledikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca eldeki verilere dayalı olarak konvektif alanları ve bu alanların yapısını tanımlamaya çalışan bir algoritma geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu algoritma ile pilotların izledikleri kaçınma rotaları için belirli sınıflandırmalar yapılmıştır.

DeLaura ve Evans (2006) çalışmalarında yol safhası uçuşlarında pilotların konvektif hava koşullarından kaçınmalarını tahmin eden Konvektif Hava Koşullarından Kaçınma Modeli (CWAM) sonuçlarını sunmuşlardır. Geliştirilmekte olan bu modelde kullanılan verileri, 2003 yazında iki farklı sektörde önemli konvektif hava koşulları gerçekleşen beş farklı gün için almışlardır. Çalışma kapsamında Gelişmiş Trafik Yönetim Sistemi'nden (ETMS) yol safhası uçuş rotaları otomatik bir şekilde çıkarılmıştır. Ayrıca, gerçekleşen uçuş rotalarına karşılık gelen planlanan rotalar hesaplanmıştır. Sonrasında ikinci otomatik analiz algoritması olan sapma algılama algoritması ile konvektif hava koşullarına maruz kalan uçakların planlanan rotaları tanımlanmış ve planlanan rotalardan önemli ölçüde sapıp sapsadıkları belirlenmiştir. Algoritma sonuçları, bir analist tarafından gözden geçirilip düzenlenmiştir. Sapma tahmin modelinin girdilerini düzenlenmiş sapma algılama sonuçları ve planlanan rotalar boyunca karşılaşılan hava koşullarının istatistiksel ölçümleri oluşturmaktadır. Hava koşulları, planlanan ve gerçekleşen uçuş rotaları gibi çeşitli verileri kullanarak çalışan bu model ile pilotların sapma olasılığı ve sapma miktarı tahmin edilebilmektedir.

DeLaura vd. (2008) bir önceki çalışmaya göre daha büyük bir veri seti ve daha fazla sapma öncüsü kullanarak CWAM modelinin daha doğru bir sapma tahmini üretmesine olanak tanımışlardır. Konvektif alanlardan kaçınma modelinin genişletildiği bu çalışmada üç hava trafik kontrol merkezi için 2006 yılında altı farklı günde meydana gelmiş olan yaklaşık 2000 hava durumu analiz edilmiştir.

Matthews ve DeLaura (2010) yol uçuşları için CWAM modelinin performansını ve kullanılabilirliğini artırmak için iki çalışma alanı sunmuşlardır. İlk olarak, önemli ölçüde azaltılmış sahte sapma algılama yüzdesine sahip, otomatik olarak hava ile ilgili sapmaları algılayan gelişmiş bir algoritma sunmuşlardır. Yeni sapma algılama algoritması, sapma algılamalarını yalnızca uçağın planlanan uçuş yolundan sapmasından 15 dakika önce

meydana gelen hava karşılaşmalarını içerecek şekilde sınırlamışlardır. Böylece sonuçların bir analist tarafından düzenleme ihtiyacını azaltmışlardır. Bu makalenin ikinci odak noktası, CWAM değerlendirilmesidir. 2006'dan itibaren mevcut veri setine 2007 ve 2008 yıllarından altı günü ekleyerek CWAM modelinin doğrulanmasında kullanılan uçuş rotalarının sayısını üçe katlamışlardır.

Sheth vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada olasılıksal konvektif hava durumu tahmin verilerinin eşik değerini belirlemek için bir yöntem sunulmaktadır. Uçuş verileri ve deneysel olasılıksal konvektif hava durumu verileri senkronize edilerek incelendiğinde uçakların belirli olasılık alanlarından kaçındıkları gözlemlenmiştir. Tahmin edilen konvektif alanın hem yoğunluğu hem de yankı tepe noktası, hava trafiği verileri ile senkronize edilerek olasılık eşiği parametresi türetilmiştir. Çalışmada elde edilen bu değer, uçuş harekât uzmanları tarafından uçuş planlamasında ve hava trafik kontrolörleri tarafından konvektif alanların olduğu hava sahasında hava trafik yönetiminde kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Matthews ve DeLaura (2010) CWAM modelinin performansını değerlendirmek ve iyileştirmek için üç alternatif filtre sunmuştur. Çalışmada, pilotların hava durumu nedeniyle sapma olasılığını tahmin etmede CWAM modeli ve Hava Durumu Kaçınma Alanlarının (WAF) performansı ölçülmektedir. Araştırmacılar yanlış veya atlanan sapma tahminleri üzerinde bir sapma tahmini hata analizi yapmışlar ve CWAM modeli için birkaç potansiyel iyileştirme önermişlerdir. Bu öneriler arasında orijinal modelin metodolojisini iyileştirmek, modele farklı hava olaylarını tanımlamak ve kontrolörler ile pilotlar arasındaki etkileşime ilişkin ek bilgiyi dahil etmek yer almaktadır. Ayrıca pilotun tercih ettiği yörünge ile potansiyel sapma yörüngelerinin maliyeti arasında ilişki değerlendirmesi yapılması ve bu değerlendirmenin optimum rota planlaması için WAF alanlarının oluşturulması sürecine dahil edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Pilotların hava durumu nedeniyle karar verme süreçleri çok karmaşık ve dinamiktir. Pilotlar, uzaktan algılanan veriler ve gözlemlenen uçuş yörüngelerinden elde edilen bilgilerle birlikte, kendi deneyimlerine ve hava durumu bilgilerine dayanarak karar verirler. Pilotların niyetlerini, bu kadar karmaşık bir ortamda doğru bir şekilde tahmin etmek zordur. Bu sebeple Rubnich ve DeLaura (2010) yaptıkları çalışmada CWAM modelinden gelen hava durumu kaçınma alanlarını rüzgâr verileriyle birleştirerek kaçınma poligonları oluşturmuşlardır. Geliştirdikleri algoritmayı iki örnek gün için test etmişlerdir.

Pilotlar konvektif alanlardan kaçınmanın yanında uçuşlarını emniyetli bir şekilde sürdürmek amacıyla türbülanslı hava koşullarından da uzaklaşmaktadırlar. Sharman ve Williams (2009) türbülans nedeniyle fırtınadan kaçınmanın karmaşıklığı ve hava trafik akış yönetimine olan etkilerini incelemek üzere yaptıkları çalışmada, türbülans seviyelerinin radarla elde edilen bulut sınırlarıyla olan ilişkisinin istatistiksel analizlerini değerlendirmişlerdir. Konvektif kaynaklı türbülans (CIT) oluşum sürecinin karmaşık olduğunu ve genellikle fırtınanın çevresini önemli ölçüde değiştirdiğini göstermişlerdir. Ayrıca inceledikleri çalışmalara göre, yapay zekâ tekniklerini kullanarak mevcut çevresel bilgileri ve bir sayısal hava tahmini (NWP) modeli analizinden türetilen türbülans teşhislerini, radar tabanlı fırtına verilerini ve uydu radyasyon verilerini birleştirerek CIT'in olası gelişme yerini tahmin etmeye yönelik prototip bir CIT teşhisi (DCIT) algoritmasının geliştirilmekte ve test edilmekte olduğunu belirtmişlerdir. ATM bağlamında bu tahmin algoritmaları hem bulut içinde hem de bulut dışında türbülans bölgeleriyle karşılaşma olasılığının en az olduğu güzergahları belirlemek için kullanılabilirler.

Yol hava sahasındaki aktif uçuşları sürekli ve otomatik olarak analiz eden ve konvektif alan etrafında zaman ve yakıt tasarrufu sağlayan rotalar elde etmek için geliştirilmiş bir Dinamik Hava Durumu Rotaları (DWR) aracı bulunmaktadır. Bu araç, uçak hava durumundan kaçınırken trafiği, hava sahası tıkanıklığını, özel kullanım hava sahasını ve Federal Havacılık İdaresi (FAA) uçuş kısıtlamalarını göz önünde bulunduran yer tabanlı bir yörünge otomasyon sistemidir. DWR sisteminde ana girdiler yol safhası merkez radar izleme verileri, uçuş planı verileri, rüzgâr, sıcaklık, basınç verileri, Koridor Entegre Hava Durumu Sistemi (CIWS), CWAM ve ulusal trafik verisidir. Merkez radar izleme ve uçuş planı verileri alındıkça DWR tavsiyeleri her 12 saniyede bir güncellenmektedir. Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA), Amerikan Havayolları ve FAA arasındaki güçlü bir ortaklık, DWR sisteminin gerçek dünyadaki hava trafiği operasyonlarında test edilmesini sağlamıştır. NASA ve Amerikan Havayolları, Temmuz 2012'den itibaren Texas'taki Entegre Operasyon Kontrol Merkezi'nde DWR sisteminin bir denemesini yürütmektedir. McNally vd. (2015) Amerikan Havayollarının Fort Worth hava sahası (ZFW) ve çevresindeki uçuşlar için DWR kullanımına dayalı test sonuçlarını değerlendirmişlerdir. Sonuçlara göre Ocak 2013'ten Aralık 2014'e kadar 624 Amerikan Havayolları tarifeli uçuşu için 3949 dakika uçuş süresinde tasarruf sağlanmıştır. Uçuşlardan 101 tanesinde en az 15 dakika tasarruf sağlandığını belirtilmiştir. ZFW hava

sahasındaki tüm uçuşlar için potansiyel tasarruf, DWR olmadan normal pilot talepleri ve kontrolör izinleri aracılığıyla bugün elde edilen tasarruflar için düzeltildiğinde, 2013 yılında 15.000 uçuş için yaklaşık 100.000 uçuş dakikasındır. Sonuçlar, Amerikan Havayollarının uçuşlarında diğer havayolu şirketlerinin uçuşlarına göre DWR sisteminin kullanımıyla yaklaşık %15 daha fazla tasarruf sağladığını göstermiştir. Test sonuçları DWR sisteminin uçuşlarda önemli ölçüde tasarruf sağlamanın yanında sektör tıkanıklığını da azaltabilecek potansiyele sahip olduğunu göstermiştir. Sektör tıkanıklığı analiz sonuçları tüm uçuşların nominal hava durumu önleme rotaları yerine DWR rotaları ile uçuşması durumunda tıkanıklığın yaklaşık %20 oranında azalacağı yönündedir.

2.3. Tek Uçak İçin Konvektif Alanlardan Kaçınma Rotası Belirleyen Çalışmalar

Hauf, Sakiew ve Sauer (2013) uçakların fırtına bulutlarından kaçınması için geliştirilmiş olan DIVMET modeli üzerine bir çalışma yapmışlardır. DIVMET modeli, A'dan B'ye giden güzergâh boyunca verilen bir fırtına bulutu alanı etrafından uçağın dolaşım süreci benzetimini yapan bir araçtır. Uçağın mevcut güzergahı ile hava durumu koşulları arasında bir denge kurarak uçağı emniyetli bir şekilde hedefine ulaştırmayı amaçlamaktadır. Model bulutları iki boyutlu olarak tanımakta ve düz uçuşlar için güzergâh planlaması yapmaktadır. DIVMET bağımsız modda veya bağımlı modda çalıştırılabilmektedir. Bağımsız modda, uçak DIVMET tarafından kinematik bir şekilde adım adım hareket ettirilir. Bağımlı modda ise NAVSIM gibi harici bir model kullanılarak uçak performans verilerinin olduğu dinamik bir model ile hareket ettirilir. Çalışmada DIVMET bağımsız modda çalıştırılmıştır. Fırtına bulutlarından kaçınma prosedürü 3 saniyelik zaman adımlarında gerçekleşmektedir. Her adımdan sonra yönlendirme güzergahı planlanan güzergâh haline gelmektedir. Uçak bu güzergâh boyunca hareket etmekte ve o zamanki hava durumuna göre yeni bir yönlendirme güzergahı hesaplanmaktadır. Modellenmiş uçak nihayet varış (B) noktasına ulaştığında DIVMET, sonradan güzergâh analizini (fazladan zaman, mesafe, yakıt vb.) gerçekleştirmekte ve onu başlangıçta planlanan yörünge ile karşılaştırmaktadır. Araştırmacıların belirttiği üzere DIVMET yalnızca görüş alanı içindeki hava durumu nesnelere tepki vermektedir ve uçak yalnızca görüş alanı içindeki fırtına bulutlarından kaçındırılmaktadır.

Hupe, Hauf ve Rokitansky (2014) DIVMET'in bağımlı modda kullanılarak NAVSIM hava trafik modeli ile birlikte kullanılmasının bir uygulamasını yapmışlardır.

NAVSIM benzetimdeki tüm uçaklar için seyrüsefer verilerini ve uçuş planı verilerini başlangıçta içermektedir. Ayrıca, Meydan Rutin Hava Raporları (METAR) ve Meydan Havalimanı Tahminleri (TAF) gibi havalimanları için yayınlanan meteorolojik verileri kullanmaktadır. Herhangi bir uçak tipinin gerçekçi bir şekilde benzetimini yapmak için Uçuş Veri Tabanı (BADA) uçak performans modelinden yararlanmaktadır. NAVSIM iki uçak arasındaki potansiyel çakışmaları da tespit edebilmektedir. Ancak, çakışma çözümleme henüz uygulanmamıştır. Literatürde DIVMET modelinin TMA operasyonları için kullanıldığı çalışmalar da bulunmaktadır (Sauer vd., 2013; Sauer vd., 2016). Bu çalışmalarda Hong Kong Uluslararası Havalimanı için uygulamalar yapılmıştır. Ayrıca, Sauer vd. (2013) DIVMET modeli ile yapmış oldukları uygulamaları bir arada verdikleri bir çalışma sunmuşlardır.

Planlanan uçuş rotası ve çevresi için hava durumu tahminleri uçuş ekibine uçuş öncesinde sunulmaktadır. Yakın gelecekte düzenli olarak hava durumu güncellemelerin uçağa veri bağlantısı yoluyla iletileceğini belirten Schilke ve Hecker (2014), konvektif hava koşullarında sapmaların azaltılması olasılığını göstermek amacıyla bir rota optimizasyon uygulaması geliştirmişlerdir. Bu uygulama, uçuş ekibinin uçuş sırasında veri bağlantısı yoluyla yerdeki radar istasyonlarından düzenli olarak güncel radar verilerini (genel olarak tamamı 5-15 dakika) almasını ve bu verilerin konvektif alanlar hakkında ayrıntılı meteorolojik bilgi sağlamasını öngörmektedir. Çalışmada yalnızca radar verileri analiz edilmiş ve veri tabanında saklanmıştır. Ancak rota optimizasyonu için yüksek konvektif aktiviteye sahip alanlar dikkate alınmıştır.

Xie ve Zhong (2016) düşük maliyetli uçuş için grafiksel olarak oluşturulan rotaları matematiksel teoriye aktarabilen A* arama algoritmasını temel alarak, olumsuz hava ve hava sahası koşullarından kaçınmaları sağlayan bir rota planlama algoritması geliştirmişlerdir. Algoritma, bir uçağın yasak alanlardan, olumsuz hava koşullarından ve çevredeki diğer uçaklardan kaçınarak en düşük uçuş mesafesini ve maliyetini veren rotayı izlemesini sağlamaktadır. Olumsuz hava koşullarını geçilemez engeller olarak kabul etmişlerdir. Bu engelleri rastgele dağıtarak olabildiğince çok senaryo ile algoritmanın verimliliğinin test edilebileceğini belirtmişlerdir.

Gonzalez-Arribas vd. (2017) yapmış oldukları çalışmada, uçuş yörünge planlamasında stokastik fırtınaları dikkate alan iki yöntemin karşılaştırmalı analiz sonuçlarını sunmaktadırlar. Birincisinde, fırtınadan kaçınma stokastik bir ulaşma-kaçınma problemi (reach-avoid problem) olarak modellenmiştir. Bu yöntemde uçağın

hareketi ayırık zamanlı bir stokastik süreç olarak ve olumsuz hava koşulları rastgele engeller olarak değerlendirilmektedir. Hem hedefe ulaşılabilirliği hem de emniyeti en üst düzeye çıkarmak için önerilen ilk yaklaşımda, stokastik bir ulaşma-kaçınma problemi çözülmektedir. Amaç, başlangıç koşulu ve sabit bir zaman ufku verildiğinde, konvektif hava hücrelerini temsil eden stokastik engeller kümesinden kaçınarak hedefe ulaşma olasılığını en üst düzeye çıkarmaktır. İkinci yöntemde, fırtınaların stokastik dinamikleri sürekli zaman içinde modellenmektedir. Stokastik sürecin olası gerçekleştirmelerinin dikkate alınmasını sağlayan bir optimal kontrol formülasyonu uygulanmıştır. Daha sonra ortaya çıkan problem, doğrudan sayısal yöntemlerin kullanımıyla doğrusal olmayan programlama (NLP) problemine dönüştürülmüştür. Araştırmacılar, literatüre ana katkılarının, fırtınaların evriminde belirsizliğin dikkate alınması ve yörüngeye dayalı operasyonlar modeline uygun olarak dört boyutlu (4D) yörünge yeteneklerinin kullanılması olduğunu belirtmişlerdir.

Hentzen vd. (2018) hava tahmin verisinin istatistiksel analizini kullanarak konvektif alan tahminlerindeki belirsizliği modellemek için bir yaklaşım önermişlerdir. Çalışmada geliştirilen stokastik fırtına modeli, tehlikeli fırtına bölgelerinden kaçınırken bir yol noktasına ulaşma olasılığını en üst düzeye çıkaran optimal kontrol algoritmasında kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Hem uçak hem de fırtınalar stokastik olarak modellenmiştir. Önerilen yaklaşımın performansı son tahmin verileri ve fırtına gözlemlerine dayalı olarak üretilen testler aracılığıyla gösterilmiş ve doğrulanmıştır.

Franco, Rivas ve Valenzuela (2018) çalışmalarında, rüzgâr ve sıcaklık belirsizliklerini hesaba katarak uçuş rotası optimizasyonu problemini ele almışlardır. Olumsuz hava olaylarının olduğu konvektif alanlar dikkate alınmamıştır. Rüzgâr ve sıcaklık belirsizliklerini toplu hava tahminlerinden elde etmişlerdir. Yapılandırılmış bir hava sahasındaki düz uçuşlar için analizler yapılmıştır. En uygun uçuş rotası bir MILP algoritma kullanılarak elde edilmiştir. Minimum ortalama uçuş süresi ve minimum uçuş süresi dağılımı amaçları arasındaki ödünleşme irdelenmiştir. Önerilen algoritma MATLAB ara yüzünde GUROBI-MILP çözücüsü kullanılarak test edilmiştir. Okyanus ötesi bir rota için gerçek hava tahminleri dikkate alınarak sonuçlar paylaşılmıştır.

Franco vd. (2020) yol safhasında tek bir seviyedeki uçuşlarda karşılaşılabilecek konvektif alanlar için risk seviyeleri tanımlamışlardır. Konvektif alanlardan hangilerinin tehlike oluşturduğu kullanıcı tarafından belirlenen risk seviyesine göre değişkenlik göstermekte olup uçuş rotaları buna göre belirlenmektedir. Olasılığa dayalı bu fırtınadan

kaçınma rotaları oluşturma metodolojisi, deterministik bir fırtınadan kaçınma aracının kullanımına dayanmaktadır. Risk alanının belirlenen risk seviyesinden yüksek veya eşit olduğu alanlar uçuşa yasaklı bölgeler olarak belirlendikten sonra deterministik kaçınma aracı DIVMET uygulanmaktadır. Araştırmacılar, yeterince küçük bir risk seviyesi seçmenin kaçınma yörüngesinin tehlikeli bölgelerin etrafında zikzaklar çizmesine ve bu bölge çiftleri arasındaki dar koridorlara girmesine izin vereceğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, küçük bir risk seviyesi hava sahası geçirgenliğini azaltarak referans yörüngeden sapmayı artıracaktır. Bu durum uçağın yörüngesinin hava sahasındaki diğer uçakların yörüngeleriyle etkileşimini artıracaktır. Bu nedenle, risk seviyesinin uygun şekilde seçilmesine dikkat ederek konvektif alanlara yetersiz tepki verme ve aşırı tepki verme arasında daha emniyetli ve verimli ara çözümler elde edilmesi sağlanmalıdır.

Lindner vd. (2020) TOMATO yörünge optimizasyon modelini kullanarak hava parametrelerinde meydana gelen değişikliklere göre üretilen tüm yörüngeleri kuşatan bir üç boyutlu (3D) koridor üretmektedirler. TOMATO, sağlanan giriş verilerine dayanarak ortaya çıkan optimize edilmiş yörüngelerin tamamını içeren 3D bir koridor oluşturmaktadır. Başlangıç uçuş planına ek olarak kaydedilen bu koridor sayesinde güncel hava tahminlerine göre optimum uçuş yörüngesi güncellenebilmektedir. Ancak, bunun karşılığında, ATM açısından planlama istikrarı sağlamak için uçağın uçuş boyunca bu koridor içinde kalması gerekecektir. Çalışmada trafiği izlemek ve çakışmaları önlemek için gerekli operasyonel iş yükünün kontrolör üzerindeki etkisinin benzer uçuş rotaları ve saatleri nedeniyle düşük olacağını varsaymışlardır. Aynı durumun bu iş yüküne bağlı olarak sektör kapasitesinin değişmesi için de geçerli olduğunu belirterek çakışma çözümleme yapmamışlardır. Önerilen yöntemle elde edilen uçuş koridoru yeniden optimize edilmiş yörüngeyi kısıtlamasına rağmen, başlangıçta planlanan uçuşa kıyasla %1,1'e kadar yakıt tasarrufu göstermiştir.

2.4. Birden Fazla Uçak İçin Konvektif Alanlardan Kaçınma Rotası Belirleyen Çalışmalar

Taylor vd. (2018) taktiksel ATFM uygulamalarında konvektif alanlardan kaçınarak yeni rotalar kümesi oluşturmak için bir yaklaşım önermişlerdir. Bu yaklaşım, birden fazla uçuşu koordineli bir şekilde değerlendirerek tavsiye niteliğinde birden fazla uygulanabilir yeniden rotalar kümesi üretmektedir. Çalışmada birden fazla seçenek sunularak operasyonel olarak kabul edilebilir bir çözümün hızlı bir şekilde seçilmesi olasılığının

artırılması hedeflenmiştir. Operasyonel kabul edilebilirlik için birden fazla kriter arasındaki dengelemeleri sağlayan çok amaçlı bir genetik algoritma kullanılmıştır. Dijkstra'nın en kısa yol algoritmasının bir varyasyonunun kullanıldığı çalışmada yeniden rotalar bir veya daha fazla uçuş için tasarlanmıştır. Önerilen yaklaşım konvektif hava olayları etrafında yeniden rota planlaması gerektiren dokuz uçuş için test edilmiştir.

Pang vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada, hava koşullarını göz önünde bulundurarak uçak yörünge tahmini için gelişmiş bir Bayes derin öğrenme yöntemi önerilmektedir. Çalışmada, öğrenme tabanlı yöntemlere özel bir vurgu yapılarak hem deterministik hem de olasılıksal yörünge tahmin yöntemlerinin kısa bir incelemesi verilmektedir. Ayrıca, iç içe geçmiş evrimsel sinir ağı, tekrarlayan sinir ağı ve tam bağlantılı sinir ağı kullanılarak hem mekânsal hem de zamansal bilgilerin işlenmesi için klasik derin öğrenme yöntemlerine sahip deterministik bir yörünge tahmin modeli önerilmektedir. Ortalama tahmin ve güven aralıkları, bölgedeki son dosyalanmış uçuş planları ve hava verileri verilerek elde edilmektedir. Büyük veri analitiği için veri ön işleme prosedürleri ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Gösteri ve ölçümlere dayalı doğrulama ile birkaç hava trafik kontrol merkezi için şiddetli konvektif hava koşulları altında ölçümlere dayalı doğrulama gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, tahmin değişkesinde önemli bir azalma olduğunu göstermiştir. Özetle bu çalışmada, hava koşullarını hesaba katan yeni bir uçak yörünge tahmini yöntemi önerilmektedir. Önerilen yöntem, derin öğrenme ve Bayes istatistiklerine dayanmaktadır. Yöntemin doğruluğu, gerçek hava trafiği ve hava durumu verileri kullanılarak test edilmiştir.

2.5. Birden Fazla Uçak İçin Konvektif Alanlardan Kaçınma Rotası Belirleyen Ve Çakışma Çözümleme Yapan Çalışmalar

Pannequin vd. (2007) yol safhası uçuşlarında birden fazla uçağın konvektif hava koşullarından kaçınması için doğrusal olmayan bir algoritma önermişlerdir. Model öngörülü kontrol (MPC) tabanlı bu algoritma ile uçaklar arasındaki potansiyel çakışmalar da çözümlenmektedir. Önceden verilen statik konvektif hava koşulları için giriş ve çıkış noktaları arasındaki uçuş mesafesinin enküçüklenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında iki amaç fonksiyonu hesaplama yaklaşımı araştırılmış ve karşılaştırılmıştır. İlkinde ikinci dereceden bir amaç fonksiyonu kullanılırken, ikincisinde amaç fonksiyonu doğrusal olmayan bir kısmi diferansiyel denklemin çözümü olan Hamilton-Jacobi denklemi çözümünden türetilmiştir. Her iki durumda da operasyonel kısıtlar dikkate

alınarak sabit bir kontrol zamanı için çözümler elde edilmiştir. MPC kapsamında bu kontrol zamanı 32 saniye olarak belirlenmiştir. Bu sayede kısa sürelerde çözümler elde edilebilmiştir. Ancak, bazı senaryolarda çözüm süresi bu değeri aştığı için elde edilen çözümün uygulanabilir olmadığını ve daha iyi fiziksel özelliklere sahip bir bilgisayar ile modelin çalıştırılması gerektiğini belirtmişlerdir. 400x400 km² ve 800x800 km² büyüklüğündeki hava sahalarında uçakların sabit hızla uçtukları kabul etmişlerdir. Konvektif hava koşulları olmadan 1, 6, 12 ve 16 uçak için geliştirilen algoritmayı test etmişlerdir. Konvektif hava koşulları olması durumunda ise 6, 12, 16 ve 20 uçak için test senaryoları oluşturmuşlardır.

Clarke vd. (2009) yapmış oldukları çalışmada, hava trafik akış yönetimindeki önemli eksiklikleri gidermek amacıyla, hava durumu koşullarındaki belirsizliği ve hava sahası kapasitesine etkisini hesaba katan bir dinamik optimizasyon prosedürü geliştirmişlerdir. Bu çalışmanın merkezinde yer alan adımlardan biri, mevcut hava durumu tahmin bilgilerini kullanarak stokastik hava sahası kapasitesini hesaplamaktır. Bu amacı gerçekleştirmek için algoritmalar geliştirilmiş ve olasılığa dayalı verilere göre hava sahası kapasitesi tahmin edilmiştir. Hava sahası kapasitesinin hesaplanmasının ardından, hesaplanan kapasiteye dayalı olarak uçakların yönlendirilmesi için stokastik bir programlama modeli geliştirilmiştir. Model, uçuşlar için kalkış zamanını, uçuş hızını ve yerde bekleme sürelerini belirlemektedir. Ayrıca, her hava durumu senaryosu için çakışmaların olmadığı bir trafik akışının sağlanabilmesi için bir çakışma çözümleme algoritması geliştirilmiştir.

Kamgarpour, Dadok ve Tomlin (2010) tahmini hava verilerini kullanarak yol safhası uçuşlarında yörünge planlaması yapmışlardır. Çalışmada yörüngeleri güncellemek ve optimize etmek için düzenli aralıklarla güncellenen hava tahminlerini kullanmışlardır. Hava tahmininin dinamik doğasına bağlı olarak da Kayan Ufuk Kontrolü (RHC) yaklaşımını kullanmışlardır. Hava durumu tahmin verilerine ve gerçek hava durumu haritalarına dayalı benzetimler gerçekleştirmişlerdir. Çalışma kapsamında yörünge planlamasında dinamik ve statik tahminlerin sistematik bir şekilde dikkate alınmasının avantajını ortaya koymuşlardır.

Erzberger, Lauderdale ve Chu (2012) yol safhası uçuşlarında meydana gelen çakışmaları çözümleme, uçakları sıralama ve konvektif alanlardan kaçınma problemlerini ele almışlardır. Çalışmada, her bir problemi çözmek için ayrı ayrı algoritmalar geliştirilmiştir. Çakışma çözümleme problemi için geliştirilen algoritma, her çakışma için

birden fazla çözüm üretmekte ve en az gecikmeyi veren çözümü seçmektedir. Sıralama problemi için geliştirilen algoritma, varış trafiğini en verimli şekilde sıraya koymak için kullanılmaktadır. Konvektif alanlardan kaçınma problemi için geliştirilen algoritma, hava sahasındaki hava hücrelerinden kaçınmak için uçuş planlarını optimize etmektedir. Çalışmada ele alınan problemler tek başlarına meydana gelebileceği gibi birlikte de meydana gelebilirler. Bu sebeple geliştirilen üç algoritmanın herhangi bir kombinasyonunu çözmek için hangi sırayla kullanılması ve nasıl bir yol izlenmesi gerektiği gösterilmiştir.

Liu ve Hwang (2014) çakışma çözümleme problemini, uçak-hava ve uçak-uçak çakışmaları olmak üzere ele almışlardır. Çakışma çözümleme problemini çözmek için stokastik optimal kontrol yaklaşımı uygulanmıştır. Bu yaklaşım rüzgâr değişimleri, seyrüsefer belirsizlikleri ve pilotların niyetleri dahil olmak üzere çeşitli belirsizlikleri kontrol stratejisine dahil etme yeteneğine sahiptir. Belirsizlikler arasından özellikle rüzgârın uçağın hareketini önemli ölçüde etkileyebileceğini ve gerçek uygulamalarda göz ardı edilemeyeceğini vurgulamışlardır. Optimal kontrol problemi, Jacobi yinelemesine dayalı bir stokastik yaklaşım algoritması kullanılarak sayısal olarak çözülmüştür. Uçak-uçak çakışma çözümü için, Jacobi yinelemesinin yüksek boyutluluk nedeniyle oluşan hesaplama karmaşıklığını azaltmak için ayrıştırılmaya dayalı bir algoritma önerilmiştir. Bu ayrıştırma tekniği her bir uçak çifti için çakışmaları ayrı ayrı incelemektedir. Önerilen sayısal algoritma, sürekli zamanlı uçak ve rüzgâr dinamikleri için bir Markov zinciri kullanmaktadır. Özet olarak çalışmada, uçakların konvektif alanlarla çakışmalarını çözümleyen bir algoritma önerilmiştir. Önerilen yaklaşım uçak çiftleri arasındaki potansiyel çakışmaları da çözümlemek için kullanılmaktadır. Konvektif alanlardan kaçınması için oluşturulan senaryoda üç tane alan bulunmaktadır. Bu alanların sürekli zamanda hareketleri dikkate alınarak uçağın hedefe ulaşması sağlanmaktadır. Uçak çiftleri arasındaki potansiyel çakışmaların çözümlendiği üç farklı senaryo oluşturulmuştur ve yaklaşım test edilmiştir. Bunun haricinde dört uçaktan oluşan senaryoda uçaklar arasındaki çakışmalar çözümlenmiştir.

2.6. TMA İçerisinde Olumsuz Hava Koşulları Altında Yörünge Planlaması Yapan Çalışma

Seenivasan, Olivares ve Staffetti (2020) gelişmekte olan fırtınaların olması durumunda, birleşen geliş rotaları boyunca uçan birden fazla uçak için çevrimiçi yörünge

planlama problemi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu problemi çözmek için mantıksal kısıtlamaları olan hibrid optimal kontrol tabanlı bir Doğrusal Olmayan Model Öngörülü Kontrol (NMPC) şeması kullanılmıştır. Tüm uçakların en uygun yörüngeleri ve birleşme noktalarında en uygun sıralamaları belirlenmiştir. Çalışmada fırtına hücreleri hareketli ve büyüyen elipsoitler olarak tanımlanmışlardır.

Çalışmada ele aldıkları problem TMA içerisindeki Sürekli Alçalma Operasyonları (CDO) kapsamaktadır. CDO sırasında uçaklar, seyir irtifasından son yaklaşma noktasına doğru rölanti itki ile düz uçuşlar olmadan iniş yaparlar. CDO, uçakların yakıt tüketimini ve emisyonlarını azaltmanın yanı sıra gürültü kirliliğini de azaltmanın etkili bir yoludur. Ayrıca, uçak trafiğini kontrolörler için daha yönetilebilir hale getirerek hava trafik verimliliğini artırmaya yardımcı olmaktadır.

Çalışma kapsamında önerilen yöntemin etkinliğini test etmek için üç uçak ve gelişmekte olan üç hücreli bir fırtına içeren sayısal testler yapılmıştır. İki farklı TMA yapısı için testler oluşturulmuştur. Testlerden bir tanesi birleşen rotalar boyunca uçan üç uçak için minimum süreli CDO operasyonlarını içermektedir. Diğer testde ise birleşen rotalar boyunca uçan üç uçak için minimum süreli STAR tabanlı iniş operasyonları bulunmaktadır. Testlerde gelişmekte olan çok hücreli bir fırtına ile birlikte sabit bir yan rüzgâr dikkate alınmıştır. 30 m/s batı yönlü sabit bir yan rüzgâr ve rüzgarla aynı yönde ancak 18,5 m/s'lik farklı bir hızla hareket eden fırtına hücreleri düşünülmüştür. Fırtına hücrelerinin büyüklüğü 7.000 metreden 10.000 metreye kadar artmaktadır. Sonuç olarak önerilen yaklaşım ile olumsuz hava koşulları altında birden fazla uçak CDO sırasında birleşen rotalar boyunca en uygun şekilde yönlendirilebilmektedir.

Yukarıda bahsedilen çalışmalardan bu çalışma ile ilgili literatürün özellikleri Tablo 2.1’de özetlenmiştir.

Tablo 2.1. *Konvektif alanlardan kaçınma ilgili literatür özeti*

Çalışma	Hava sahası yapısı	Uçak sayısı	Çakışma çözümleme	Konvektif hava yapısı	Rüzgâr etkisi	Çözüm yöntemi
Hauf vd. (2013)	Geometrik yapılı	1	Yok	Dinamik	Yok	DIVMET modeli
Schilke ve Hecker (2014)	Geometrik yapılı	1	Yok	Dinamik	Yok	Sezgisel algoritma
Xie ve Zhong (2016)	Geometrik yapılı	1	Yok	Statik	Yok	Sezgisel algoritma
G.-Arribas vd. (2017)	Geometrik yapılı	1	Yok	Stokastik	Yok	Ulaşma-kaçınma algoritması
Hentzen vd. (2018)	Geometrik yapılı	1	Yok	Stokastik	Var	Ulaşma-kaçınma algoritması
Franco vd. (2018)	Yapılandırılmış	1	Yok	Yok	Var	MILP
Lindner vd. (2020)	Geometrik yapılı	1	Yok	Yok	Var	TOMATO modeli
Taylor vd. (2018)	Geometrik yapılı	>1	Yok	Statik	Yok	Çok amaçlı genetik algoritma
Pang vd. (2021)	Geometrik yapılı	>1	Yok	Stokastik	Yok	Derin öğrenme algoritması
Liu ve Hwang (2014)	Geometrik yapılı	1	Yok	Statik ya da hareket eden	Var	Stokastik optimal kontrol algoritması
Liu ve Hwang (2014)	Geometrik yapılı	>1	Var	Yok	Var	Stokastik optimal kontrol algoritması
Pannequin vd. (2007)	Geometrik yapılı	>1	Var	Statik	Yok	Doğrusal olmayan algoritma, MPC
Clarke vd. (2009)	Geometrik yapılı	>1	Var	Stokastik	Yok	Stokastik programlama, RHC
Kamgarpour vd. (2010)	Geometrik yapılı	>1	Var	Dinamik	Yok	Doğrusal olmayan model, RHC
Erzberger vd. (2012)	Geometrik yapılı	>1	Var	Statik	Yok	Üç farklı algoritma
Bu çalışma	Hava sahası kesikleştirme tekniği	>1	Var	Dinamik	Var	MILP, RHC

2.7. Çalışmanın Özgünlüğü

Bu çalışmada olumsuz hava koşulları altında hava trafik yönetiminde uçuş rotası optimizasyonunun önemi araştırılmıştır. Yol safhası uçuşlarında hem uçakların konvektif alanlardan kaçınması hem de birbirleri arasındaki potansiyel çakışmaların çözümlenmesi problemi ele alınmıştır. Olumsuz hava koşullarının etkin olduğu konvektif alanlarda hem uçaklar arasındaki hem de uçaklar ile konvektif alanlar arasındaki emniyet gereksinimlerini yerine getiren matematiksel modeller kurularak kaçınmak için optimum rotaların belirlenmesi hedeflenmiştir. Bunun için hava sahası kesikleştirme tekniği kullanılarak biri deterministik bir diğeri stokastik olmak üzere iki model geliştirilmiştir. Deterministik modelde olumsuz hava koşullarının yaşandığı konvektif alanların sabit ve uçuşa kapalı olması durumunda uçakların bu alanlardan kaçındıkları çakışmasız yörünge planlaması yapılmaktadır. Stokastik modelde hava sahası içerisindeki rüzgâr hızı ve yönü belirsizlikleri dikkate alınmıştır. Belirli bir uçuş seviyesindeki rüzgâr verilerine göre senaryolar oluşturulmuştur. Her bir rüzgâr senaryosunun gerçekleşme olasılığı elde edilen verilere dayanarak belirlenmiştir. Bunun yanında konvektif alanların zamanla yer değiştirmesi, büyümesi, küçülmesi gibi dinamik doğasını ele almak için RHC yaklaşımı uygulanmıştır. Böylece, hava sahasındaki hem rüzgâr belirsizliklerinin hem de konvektif alan dinamikliğinin eş zamanlı olarak dikkate alındığı bir yörünge optimizasyonu yapılmıştır. Geliştirilen modellerin amacı, konvektif hava koşullarında hava sahasının giriş ve çıkış noktaları arasındaki uçuş rotalarını belirlerken uçakların toplam uçuş süresini enküçükmektir. Ayrıca, stokastik modelden elde edilen uçuş rotalarının deterministik yaklaşıma göre toplam uçuş süresinde sağladığı kazançlar incelenmiştir. Deterministik yaklaşım kullanılarak alınan kararların belirsizliklerin ortaya çıktığı durumlarda uygulanabilir olup olmadığı araştırılmıştır. Buna karşılık stokastik yaklaşımın çözülen tüm test problemleri için uygulanabilir ve en iyi çözümler sağladığını göstermek hedeflenmiştir.

Bu çalışmada, konvektif hava koşullarında uçan uçakların emniyetli ve verimli bir şekilde uçmalarına yardımcı olacak yeni modeller sunulmaktadır. Bu modellerin yapısındaki uçaklar arasındaki çakışmaları önleyen ve onların konvektif hava koşullarından kaçınmalarını sağlayan operasyonel kısıtlar ile en iyi uçuş rotaları belirlenmektedir. Uçuşlar tek bir uçuş seviyesinde değerlendirilmişlerdir. Çünkü literatürdeki çalışmalarda da olduğu gibi olumsuz hava koşulları altında öncelikle yatay kaçınma manevraları tercih edilmektedir. Ayrıca, pilotlar yakıttan tasarruf etmek adına

ve emniyet nedeniyle yatay manevraları dikey manevralara tercih etmektedirler. Dikey manevraların kullanılması durumunda ortaya çıkacak potansiyel çakışmaların yanında olumsuz hava koşulları altında yeni uçuş seviyesindeki belirsizlikler ve konvektif alan dinamikleri uçuş emniyeti açısından yeni riskler ile karşılaşma olasılığını artırmaktadır. Aynı zamanda hem pilotlar hem de kontrolörler için iş yükünde artış ile sonuçlanmaktadır.

Literatür taraması bölümünde paylaşılan çalışmalardan bu çalışma ile ilgili olanlar dikkate alındığında gerek tek bir uçağın gerekse birden fazla uçağın olumsuz hava koşullarından kaçınması için çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir. Yalnızca Franco, Rivas ve Valenzuela (2018) çalışmalarında bir MILP model geliştirmişlerdir. Ancak onlar da konvektif alanları dikkate almamışlardır. Yapılandırılmış bir hava sahasında rüzgâr ve sıcaklık belirsizliklerinin olduğu stokastik bir çalışma yapmışlardır. Rüzgâr etkisinin hesaba katıldığı bir diğer çalışmada (Lindner vd., 2020) TOMATO yöntemini kullanan bir algoritma geliştirilerek tek uçak için bir uçuş koridoru oluşturulmuştur. Birden fazla uçak için rüzgâr etkisinin hesaba katıldığı çalışma Liu ve Hwang (2014) tarafından yapılmıştır. Ancak bu çalışmada da tek bir uçak için konvektif alandan kaçınma rotaları oluşturulmuştur. Birden fazla uçak arasındaki çakışmaları çözümlemek için algoritma geliştiren araştırmacılar belirsizliklerden özellikle rüzgârın uçağın hareketini önemli ölçüde etkilediğini ve gerçek uygulamalarda göz ardı edilemeyeceğini belirtmişlerdir. Tablo 2.1’de de verildiği üzere birden fazla uçağın ele alındığı diğer çalışmalarda rüzgâr etkisi hesaba katılmamıştır ve çözüm yaklaşımı olarak çeşitli algoritmalar önerilmiştir.

Ulaşılabilen literatürde rüzgâr etkisinin dikkate alındığı çalışmalar yalnızca tek uçak için yapılan çalışmalardır. Bu çalışmalardan da bir tanesi dışında konvektif alan yapısı dikkate alınmamıştır. Ayrıca tek bir çalışma dışında çözüm yöntemi olarak çeşitli algoritmalar önerilmiştir. Bu çalışmada birden fazla uçak için hem konvektif alanlardan kaçınma rotaları üreten hem de uçaklar arasındaki potansiyel çakışmaları çözen tam sayılı doğrusal bir matematiksel model önerilmiştir. Ayrıca, hava sahası içerisindeki rüzgâr hızı ve yönü belirsizlikleri hesaba katılarak problemin çözümü için stokastik bir model geliştirilmiştir. Konvektif alanların yapısında zamanla bazı değişiklikler meydana gelmektedir. Bu değişiklikler kapladıkları alanların büyümesi ya da küçülmesi ve yer değiştirmesidir. Bununla birlikte zamanla bazı konvektif alanlar yok olmasının yanında yeni alanların oluşması ve diğer konvektif alanlarla birleşmesi mümkündür. Konvektif alanların yapısında zamanla meydana gelen değişiklikler bazı çalışmalarda dikkate

alınmazken bazılarında stokastik süreç olarak alınmıştır. Bilindiği kadarıyla da yalnızca Kamgarpour, Dadok ve Tomlin (2010) tarafından yapılan çalışmada dinamik hava koşulları hesaba katılmıştır. Bu çalışma kapsamında konvektif alanların yapısındaki zamanla değişiklikler dikkate alınmıştır ve RHC yaklaşımı uygulanmıştır.



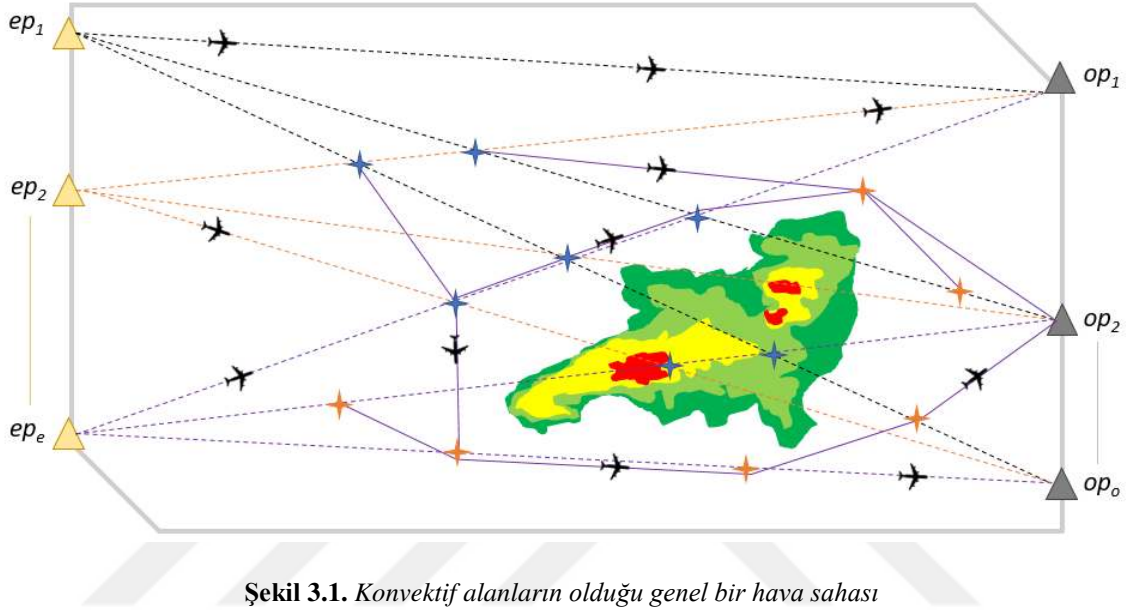
3. METODOLOJİ

Hava sahaları, atmosfer içinde belirli bir hacme ve tanımlanmış geometriye sahip olan bölgelerdir. Hava trafik kontrol sürecini kolaylaştırmak için hava sahası pozitif kontrollü hava sahası, kontrollü hava sahası ve kontrolsüz hava sahası olmak üzere üç sınıfa ayrılır (De Neufville ve Odoni, 2013). Kontrollü hava sahaları hava trafik hizmetleri ve uçuş gereklilikleri temel alınarak sınıflandırılmaktadır. Bunlar; yol hava sahası, TMA ve havaalanı kontrol bölgesi (CTR) olarak adlandırılır (Çeçen ve Çetek, 2017). Bir uçuşun en büyük kısmını yol hava sahaları oluşturur.

Hava trafik kontrol ve hava sahası yönetimi bağlamında geleneksel rotalı ve serbest rotalı hava sahaları bulunmaktadır. Geleneksel rotalı hava sahası, belirli rota ve hava yollarını içeren, genellikle belirlenmiş sabit rotalara sahip olan bir hava sahasını ifade eder. Pilotlar, bu rotalarda ilerlerken belirli bir düzen içinde seyrederek ve bu rota üzerinde trafikle ilişkili talimatları takip ederler. Serbest rotalı hava sahası, pilotlara belirli rota kısıtlamaları olmaksızın, daha esnek bir şekilde uçuş rotası seçme özgürlüğü tanıyan bir hava sahasını ifade eder. Pilotlar, belirli bir başlangıç ve varış noktası arasında en uygun rotayı seçebilirler. Bu, daha verimli uçuş rotaları seçmelerine ve hava sahasının daha iyi kullanılmasına yardımcı olabilir. Hava trafik yönetimi, serbest rotalı hava sahalarında çakışmaları önlemek ve emniyetli uçuşları sağlamak için gerekli prosedürleri ve rehberliği sağlar. Bu çalışmada serbest rotalı hava sahalarındaki yol safhası uçuşları ele alınmıştır. Olumsuz hava koşulları altında gerçekleşen uçuşlar arasındaki potansiyel çakışmaları çözümlemek için hava sahası kesikleştirme tekniği kullanılmıştır. Hava sahası kesikleştirme tekniği uçuş rotalarını ve hava sahasını analiz etmek için güçlü bir araçtır ve potansiyel çakışma noktalarını tanımlama sürecini hızlandırmaktadır.

Olumsuz hava koşullarının meydana geldiği konvektif alanları içeren serbest rotalı bir hava sahası yapısı Şekil 3.1’de verilmiştir. Uçaklar önceden tahmin edilen zamanlarda $ep_1, ep_2, \dots, ep_e$ noktalarından hava sahasına giriş yaparlar ve daha sonra mümkün olan en kısa rotaları kullanarak $op_1, op_2, \dots, op_o$ hava sahası çıkış noktalarına ulaşmayı hedeflerler. Şekilde kesikli çizgilerle verilen rotalar giriş ve çıkış noktaları arasındaki en kısa rotaları temsil ederler ve direk rotalar olarak adlandırılırlar. Direk uçuş rotalarının kesiştiği ve uçaklar arasında çakışmaların meydana gelebileceği yerler mavi renkli noktalar ile gösterilmiştir. Bu noktalarda uçakların bulunma zamanlarına göre aralarındaki potansiyel çakışmaların belirlenmesi ve çözülmesi gerekir. Ancak, burada yalnızca direk rotaların kullanılması durumunda meydana gelebilecek çakışmaları

kontrol etmek mümkündür. Uçakların giriş ve çıkış noktaları arasında farklı uçuş rotaları kullanmaları durumunda hava sahasının herhangi bir noktasında çakışmaların gerçekleşme olasılığı vardır. Hava sahası, sonsuz sayıda noktadan oluşur, bu nedenle çakışmaların hava sahasının belirli noktalarında kontrol edilmesi için genellikle hava sahası kesikleştirme tekniği kullanılmaktadır.

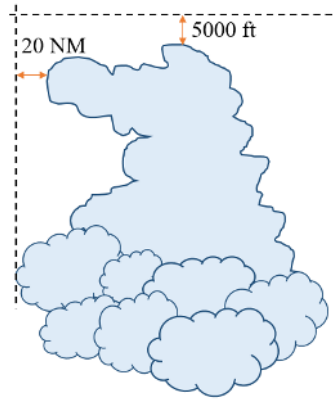


Şekil 3.1. Konvektif alanların olduğu genel bir hava sahası

Kaplan, Çetek ve Saraç (2023) çalışmalarında serbest rotalı bir hava sahasındaki kesikleştirme oranı ile çözüm kalitesi arasındaki ödünleşmeyi irdemişlerdir. Hava sahası kesikleştirme oranı arttıkça hava sahası çözünürlüğü de artmaktadır. Başka bir deyişle, giriş ve çıkış noktaları arasındaki toplam en kısa mesafeyi verecek rota sayısında artış meydana gelmektedir. Böylece birden fazla en kısa mesafeyi sağlayacak rota seçeneği olmasından dolayı potansiyel çakışmalar çözümlenirken uçuşların daha kısa mesafelerde tamamlanmasına olanak sağlamaktadır. Ancak, hava sahası kesikleştirme oranı arttıkça elde edilen çözümlerin kalitesi artsa da çözüm sürelerinde de büyük oranda artış meydana gelmektedir. Kabul edilebilir süreler içinde en iyi çözümlere ulaşılamamaktadır. Ayrıca, kesikleştirme oranı artışı ile çözüm kalitesinin artış oranı arasındaki ilişkiye bakıldığında belirli bir kesikleştirme oranından sonra çözüm kalitesindeki iyileşme sınırlı bir seviyede olmaktadır. Buna karşılık çözüm sürelerinde önemli ölçüde artış meydana gelmektedir. Sonuç olarak ideal hava sahası kesikleştirme oranı seçilerek kabul edilebilir sürelerde en iyi çözümlere ulaşılabilir. Çalışma kapsamında önerilen bir çözüm yaklaşımı ile çözüm sürelerinde iyileştirme yapılabileceği

de vurgulanmıştır. Önerilen yaklaşıma göre belirli giriş ve çıkış nokta çiftleri arasında uçakların kullanabilecekleri rotalar önceden tanımlanmaktadır.

Konvektif alanlardan uçakların kaçınması için öncelikli olarak bu alanların uçuşa yasaklı olarak tanımlanması gerekir. Bunun için hava sahasına kesikleştirme tekniği uyguladıktan sonra oluşan rotalardan konvektif alan bulunanlar uçuşa kapalı rotalar olarak tanımlanmalıdır. Ayrıca, türbülanslı alan yalnızca bulutun içi ile sınırlı değildir ve çevresinde de etkilidir. Meteoroloji radarları temiz (yağış olmayan) havadaki türbülansı tespit edemezler, bu nedenle ihtiyati tedbirlerin alınması gerekir. Şiddetli türbülansla karşılaşma riskini en aza indirmek için Şekil 3.2’de gösterildiği gibi yatayda en az 20 NM mesafe bırakılmalıdır. Konvektif bir bulutun üzerinden uçmak kaçınılmazsa 5000 ft dikey bir mesafe uygulanmalıdır (Airbus, 2016). DeLaura ve Evans (2006) çalışmalarında 20 NM mesafenin hava sahasının kullanılabilir alanını oldukça daralttığını vurgulamışlardır. Beş farklı günde gerçekleşmiş olan 800 farklı uçuş yörüngesini inceledikleri çalışmada, pilotların konvektif alanlardan kaçınma mesafelerini de analiz etmişlerdir. 220 sapma rotası için yapılan mesafe analizleri sonucunda, pilotların %75’inin 20 km (10,8 NM) ile 25 km (13,5 NM) sınırları içerisinde sapmalarını gerçekleştirdiklerini belirtmişlerdir. Uçakların konvektif alanlardan gerekli emniyet mesafesi bırakarak izleyebilecekleri rotalar Şekil 3.1’de mor renkli düz çizgiler ile gösterilmiştir. Bu rotaların geçtiği turuncu renkli noktalarda uçaklar arasındaki çakışmalar kontrol edilmektedir.

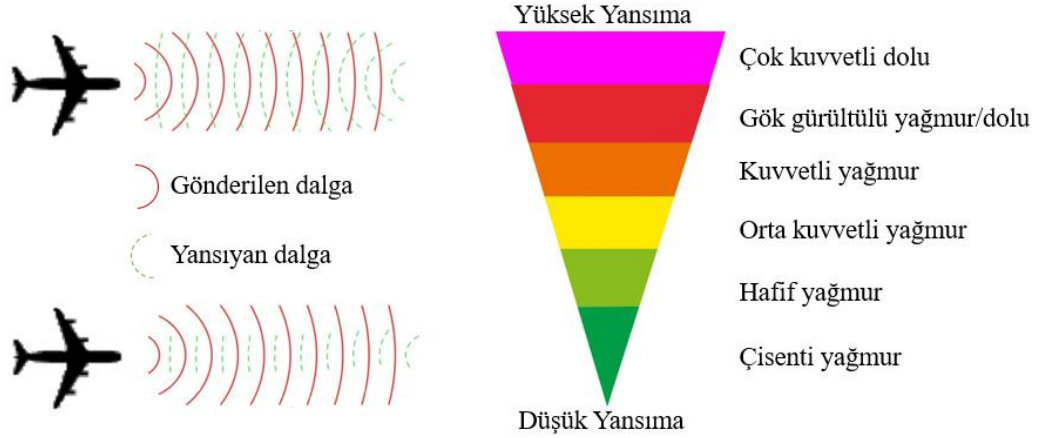


Şekil 3.2. Konvektif bulut ile uçak arasında olması gereken mesafe (Airbus, 2016)

Uçaklarda bulunan hava radarı, uçağın çevresindeki atmosferdeki hava koşullarını izlemek ve belirli meteorolojik olayları tespit etmek için kullanılan bir sistemdir. Hava

Şekil 3.3’de 40000 ft irtifada uçuşunu gerçekleştiren bir uçağın kokpitteki hava radarı ekranı paylaşılmıştır. Şekilde konvektif bir alan ve uçağın bu alandan kaçınmak için rota belirleme aşaması görünmektedir. Hem Şekil 3.1’de hem de Şekil 3.3’de görüldüğü üzere konvektif alanlar farklı renklerde bölgelerden oluşmaktadır. Bu bölgelerde meydana gelen farklı hava koşulları farklı renkler olarak hava radarı ekranına yansımaktadır. Hava durumu tespiti temel olarak hava radarından yayılan dalgaların atmosferdeki su damlacıkları, kar tanecikleri, bulutlar ve diğer meteorolojik öğelerden yansımaları prensibine dayanmaktadır.





Şekil 3.4. Hava durumu radarı yansımaya prensibi (Airbus, 2016; Federal Aviation Administration, 2013)

Hava trafik yönetimine yönelik yağış yoğunluğu terminolojisi yansımaya ile ilişkilidir. Hava radarı yağış şiddeti terminolojisi Tablo 3.1’de verilmiştir. Tabloda hava radarı renkleri ile yansımaya yoğunluğu terminolojisi arasındaki ilişki ve yansımaya desibeli aralıkları verilmiştir. Genel olarak dBZ değeri 15’e ulaştığında yağış başlamış demektir ve 30 dBZ değerine kadar hafif yağış görülür. Yağış yoğunluğu arttıkça yansımaya desibeli artış gösterir (Federal Aviation Administration, 2013).

Tablo 3.1. Hava radarı yağış şiddeti terminolojisi (Federal Aviation Administration, 2013)

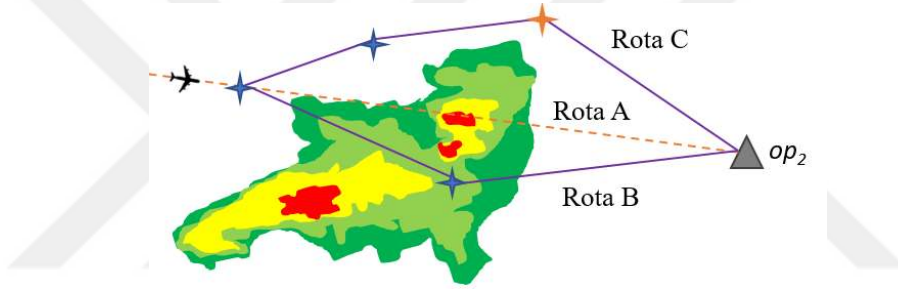
Renk	Yansımaya desibeli (dBZ)	Hava radarı yansımaya yoğunluğu terminolojisi
Yeşil / Koyu yeşil	<30 dBZ	Hafif (Light)
Sarı	30 – 40 dBZ	Orta derece (Moderate)
Turuncu / Kırmızı	>40 – 50 dBZ	Yoğun (Heavy)
Kırmızı / Magenta	> 50 dBZ	Aşırı yoğun (Extreme)

Uçuş ekibi yukarıda ayrıntılarını vermiş olduğumuz bilgilere dayalı olarak hava radarı ekranında gözlemlediği konvektif alan yapısına göre kaçınma rotasına karar verecektir. Konvektif alanlardan kaçınmak için izlenebilecek rotalar Şekil 3.5’de verilmiştir. A rotası hedeflenen uçuş rotası iken B ve C rotaları olası kaçınma rotalarını göstermektedir. Tercih edilecek rotalarda karşılaşılabilecek durumları ayrı ayrı açıklayabiliriz (Airbus, 2016):

Rota A: Hedeflenen varış noktasına planlanan direk rotadır. Ancak, konvektif alanların en şiddetli ve aktif olduğu bölgeden geçtiği için büyük risk taşımaktadır. Bu sebeple tercih edilen bir uçuş rotası değildir.

Rota B: Bu rota, planlanan rotadan az sapma gerektirmekte ve konvektif alanların en yoğun olduğu kırmızı alanlardan kaçınılmış gibi görünmektedir. Ancak, bu bölgenin üst tarafındaki konvektif hücreler hızlı ve aşağı doğru gelişiyor olabilir ve böylece yoğun bölgeler arasındaki boşluğu kapatabilir. Bununla birlikte, konvektif alanın içine doğru ilerlendiği için şiddetli hava koşulları ve türbülans ile karşılaşma riski artmaktadır. Bu sebeple risk taşıyan bir rotadır.

Rota C: Konvektif alanların ve fırtınaların çoğunu geniş bir emniyet mesafesiyle geçtiği için alternatif bir kaçınma rotası olarak görünmektedir. Konvektif kümelenmelerden tamamen kaçınan en düşük riskli yol olarak tanımlayabiliriz. Ancak planlanan rotadan daha fazla sapma gerektirdiği için fazla yakıt tüketimi veya gecikmeler gibi operasyonel etkileri olacaktır.

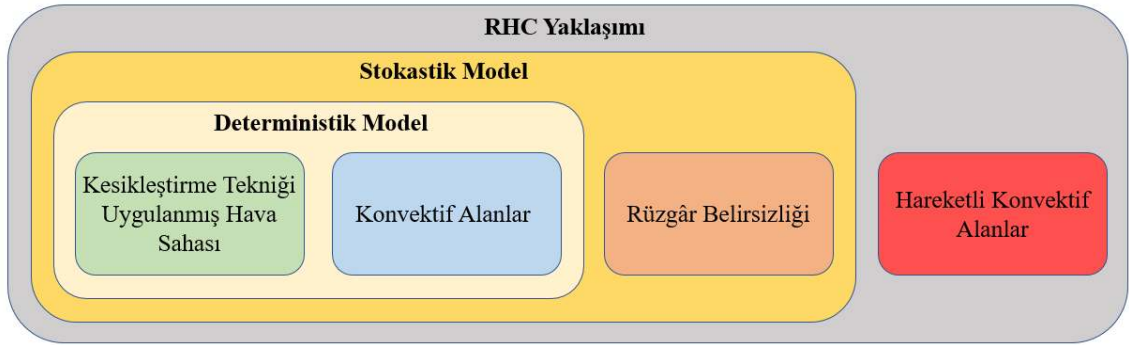


Şekil 3.5. Konvektif alanlardan kaçınma rotaları

Uçakların konvektif alanların olduğu bir hava sahasında uçuşlarına emniyetli bir şekilde devam etmeleri için rüzgâr etkisinin hesaba katılması son derece önemlidir. Rüzgârın uçak hareketleri üzerindeki etkisi emniyet ve operasyonel verimlilik açısından kritik bir rol oynar. Rüzgâr hızı ve yönü uçakların seyir hızını ve dolayısıyla uçuş sürelerini etkiler. Bu durum aynı zamanda yakıt tüketiminin etkilenmesi anlamına gelir. Bir uçağın baş rüzgârı alması seyir hızının azalmasına sebep olurken kuyruk rüzgârı alması daha yüksek seyir hızı hareket etmesini sağlar. Hızların değişmesinden dolayı uçakların belirli noktalara ulaşma zamanları değişir. Sonuç olarak rüzgâr hızı ve yönü, uçakların nihai hızını ve rotasını etkilediği için uçuş rotası optimizasyonu çalışmalarında emniyetli rotaların üretilmesinde dikkate alınmalıdır. Bu çalışma kapsamında rüzgâr hızı ve yönü belirsizlikleri hesaba katılarak bir stokastik model geliştirilmiştir.

Çalışma kapsamında ele alınan problem için çalışmanın genel metodolojisi Şekil 3.6'da verilmiştir. Belirli bir uçuş seviyesindeki yol safhası operasyonlarının

gerçekleştirdiği hava sahasına kesikleştirme tekniği uygulanmıştır. Uçakların hava sahasına giriş ve çıkış yapacakları noktalar ile tahmini giriş zamanları önceden bilinmektedir. Geliştirilen deterministik ve stokastik modeller ile en kısa uçuş sürelerinin elde edildiği uçuş rotalarının üretilmesi hedeflenmiştir. Bu rotalar uçakların hem konvektif alanlardan kaçındığı hem de uçaklar arasındaki potansiyel çakışmaların çözümlendiği emniyetli rotalardır. Deterministik modelde konvektif alanlar hesaplama yapılan periyot boyunca sabittirler. Stokastik modelde, hava sahasındaki rüzgâr hızı ve yönü belirsizlikleri modele dahil edilmiştir. Wyoming Üniversitesi veri tabanı kullanılarak elde edilen veriler ile rüzgâr senaryoları oluşturulmuştur (Weatherdata, 2023). Sonrasında, konvektif alanların zamanla yer değiştirmesi, büyümesi ve küçülmesi gibi dinamik özelliklerini hesaba katmak adına RHC yaklaşımı uygulanmıştır. Konvektif alanlar ile ilgili gerçekleşmiş olan veriler Meteoroloji Genel Müdürlüğünden resmi yazı ile talep edilmiştir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2023a).



Şekil 3.6. Çalışmanın genel metodolojisi

4. MATEMATİKSEL MODELLEME

Bu bölümde çalışma kapsamında ele alınan problem için geliştirilen deterministik ve stokastik modeller paylaşılmıştır. Ayrıca, stokastik modelde rüzgâr hızı ve yönü verilerine dayanarak rüzgâr senaryolarının oluşturulması ve rüzgâr etkisinden dolayı uçakların yer hızlarının hesaplanması anlatılmıştır.

4.1. Deterministik Matematiksel Model

Hava sahası kesikleştirme tekniği ile $F = (1, 2, \dots, f)$ olarak tanımlanmış uçuş noktalarından oluşan bir hava sahasında $A = (1, 2, \dots, a)$ kümesine ait uçakların olumsuz hava koşulları altında operasyonlarını gerçekleştirmeleri için geliştirilen matematiksel modelin indisleri, parametreleri, karar değişkenleri, amaç fonksiyonu ve kısıtlarının açıklamaları bu bölümde paylaşılmıştır. Uçaklar hava sahasına $E = (1, 2, \dots, e)$ kümesine ait noktalardan giriş yapmakta ve $O = (1, 2, \dots, o)$ kümesine ait noktalardan ise çıkış yapmaktadır.

İndisler

$i, j \in A$: Uçak indisi

$m, n \in F$: Uçuş noktası indisi

Parametreler

Herhangi bir i uçağının hava sahasına giriş yapacağı nokta, tahmin edilen giriş zamanı ve hava sahasını terk edeceği nokta önceden bilinmektedir. Kesikleştirme tekniğine göre hava sahası yapısını oluşturan m ve n noktaları arasındaki mesafeler ve olumsuz hava koşulları altında hangi rotaların uçuşa açık ya da kapalı olduğu bilinen parametrelerdir. Ayrıca ele alınan uçuş seviyesine göre uçakların gerçek hava hızlarına da ulaşılabilir. Modelin parametreleri aşağıda verildiği gibidir:

ep_i : i . uçağın hava sahasına giriş yapacağı nokta

op_i : i . uçağın hava sahasından çıkış yapacağı nokta

et_i : i . uçağın hava sahasına tahmin edilen giriş zamanı

$b_{m,n}$: olumsuz hava koşulları altında m ve n noktaları arasındaki rotada uçuş yapılabilirse 1; diğer durumda 0 değeri olan parametre

$d_{m,n}$: m ve n noktaları arasındaki rotaların mesafe matrisi

v_i : i . uçağın gerçek hava hızı

sep_i : i . uçağın diğer uçaklarla arasında olması gereken radar zaman ayırması

G : Yeterince büyük pozitif bir sayı

Karar Değişkenleri

Geliştirilen matematiksel model ile uçakların hava sahasına giriş ve hava sahasında çıkış noktaları arasında geçeceği tüm noktalar ve bu noktalarda bulunma zamanları belirlenmektedir. Ayrıca geçtikleri noktalardaki uçuş hızları göz önünde bulundurularak gerekli emniyet ayırmalarını sağlamak adına hangi uçağın önde hangi uçağın arkada olduğu tespit edilmektedir. Modelin karar değişkenleri aşağıda verildiği gibidir:

$t_{i,m}$: i . uçağın m noktasından geçme zamanı

$x_{i,m,n}$: i . uçak m ve n noktaları arasındaki rotadan gidecekse 1; diğer durumda 0 değeri alan 0-1 tam sayı karar değişkeni

$y_{i,m}$: i . uçak m noktasından geçecekse 1; diğer durumda 0 değeri alan 0-1 tam sayı karar değişkeni

$r_{i,j,m}$: i uçağı m noktasına j uçağından önce ulaşıyorsa 1; diğer durumda 0 değeri alan 0-1 tam sayı karar değişkeni

Amaç Fonksiyonu

Pilotlar hava sahasına girdikten sonra olabildiğince en kısa sürede hava sahası çıkış noktasına ulaşmayı hedefler. Matematiksel modelin amaç fonksiyonu Denklem (4.1)'de verildiği üzere tüm uçakların toplam uçuş süresinin enküçüklenmesidir.

$$z_{det} = \text{enk} \sum_{i \in A} \sum_{m \in F} \sum_{n \in F} \frac{x_{i,m,n} d_{m,n}}{v_i} \quad (4.1)$$

Kısıtlar

Uçakların hava sahasındaki operasyonlarını emniyetli bir şekilde tamamlamaları için atama kısıtları, zaman hesabı kısıtları ve çakışma çözümleme kısıtları için gerekli denklemler kurulmuştur.

Atama Kısıtları

Denklemler (4.2) – (4.6) ile uçakların uçuş rotaları boyunca uğrayacakları noktaların ataması yapılmaktadır. Her bir i uçağının ep_i noktasından hava sahasına giriş yaptıktan sonra uçuş rotasını oluşturmaya başladığı ilk nokta Denklem (4.2) ile belirlenmektedir. Sonrasında her bir uçuşun hava sahası çıkış noktasına kadar uçacağı

tüm rotaların ataması Denklem (4.3) ile yapılmaktadır. Hava sahasına giriş noktasından sonra uçağın uğrayacağı nokta bir önceki denklem ile belirlendiği için bu denklemin koşullarında hariç tutulmuştur. Ayrıca her bir i uçağının hava sahasını terk edeceği op_i noktasından önce uğrayacağı nokta atamasının yapılması için Denklem (4.4) kullanılmaktadır. Bu sebeple Denklem (4.3)'de çıkış noktası hariç tutulmuştur. Denklemler (4.2) – (4.4)'de uçuş rotalarının atamaları yapılırken m ve n noktaları arasında bağlantı olması ($d_{m,n} \neq 0$) ve olumsuz hava koşulları sebebiyle uçuşlara kapalı olmaması koşulları ($b_{m,n} = 1$) bulunmaktadır. Bu iki koşuldan herhangi birinin sağlanmaması durumunda atama yapılmaması Denklem (4.5) ile sağlanmaktadır. Uçaklar arasındaki çakışma kontrolü her bir noktada sağlanmalıdır. Bu sebeple her bir noktadan geçecek uçakların bilinmesi gerekmektedir. Denklem (4.6) uçakların kullanacakları m ve n noktaları arasındaki rotalar ile uğramış olacakları noktalar arasındaki ilişkiyi gösteren kısıttır. Bu denklem, uçakların m ve n noktaları arasındaki rotayı kullanmaları durumunda n noktasına uğramalarının kesinleşmesi yaklaşımı ile kurulmuştur. Her bir i uçağının ulaştığı n noktaları için $y_{i,n} = 1$ olmaktadır. Bu sayede uçakların geçtikleri tüm n noktaları bilinerek bu noktalardaki potansiyel çakışmalar kontrol edilebilmektedir.

$$\sum_{\substack{m \in F \\ m \neq n \\ m = ep_i}} \sum_{\substack{n \in F \\ d_{m,n} \neq 0 \\ b_{m,n} = 1}} x_{i,m,n} = 1 \quad \forall i \quad (4.2)$$

$$\sum_{\substack{n \in F \\ n \neq m \\ n \neq ep_i \\ d_{m,n} \neq 0 \\ b_{m,n} = 1}} x_{i,m,n} - \sum_{\substack{n \in F \\ n \neq m \\ n \neq op_i \\ d_{m,n} \neq 0 \\ b_{n,m} = 1}} x_{i,n,m} = 0 \quad \forall i, m \quad (4.3)$$

$m \neq ep_i, m \neq op_i$

$$\sum_{\substack{m \in F \\ m \neq n \\ b_{m,n} = 1}} \sum_{\substack{n \in F \\ n \neq op_i \\ d_{m,n} \neq 0}} x_{i,m,n} = 1 \quad \forall i \quad (4.4)$$

$$\sum_{m \in F} \sum_{\substack{n \in F \\ d_{m,n} = 0 \\ b_{m,n} = 0}} x_{i,m,n} = 0 \quad \forall i \quad (4.5)$$

$veya$

$$\sum_{\substack{m \in F \\ m \neq n}} x_{i,m,n} = y_{i,n} \quad \forall i, n \quad (4.6)$$

Zaman Hesabı Kısıtları

Uçakların hava sahasına giriş zamanları önceden bilinmektedir. Bu andan itibaren uğrayacakları tüm noktalarda bulunma zamanları Denklemler (4.7) – (4.10) ile hesaplanmaktadır. Denklemler (4.7) – (4.8) ile her bir i uçağının hava sahası giriş noktasından (ep_i) hemen sonra uğrayacağı noktada bulunma zamanı belirlenmektedir. Oluşturulan uçuş rotası boyunca uğrayacağı tüm noktalarda bulunma zamanları da Denklemler (4.9) – (4.10) ile hesaplanmaktadır. Giriş noktasından sonraki noktada bulunma zamanı ilk iki denklemle sağlandığı için bu denklemlerde giriş noktası hariç tutulmuştur.

$$t_{i,n} \geq et_i + \frac{d_{m,n}}{v_i} - G(1 - x_{i,m,n}) \quad \forall i, n, m = ep_i \quad (4.7)$$

$$t_{i,n} \leq et_i + \frac{d_{m,n}}{v_i} + G(1 - x_{i,m,n}) \quad \forall i, n, m = ep_i \quad (4.8)$$

$$t_{i,n} \geq t_{i,m} + \frac{d_{m,n}}{v_i} - G(1 - x_{i,m,n}) \quad \forall i, m, n \quad m \neq n, m \neq ep_i \quad (4.9)$$

$$t_{i,n} \leq t_{i,m} + \frac{d_{m,n}}{v_i} + G(1 - x_{i,m,n}) \quad \forall i, m, n \quad m \neq n, m \neq ep_i \quad (4.10)$$

Uçaklar arasındaki çakışmaları çözümleme kısıtları

Hava sahası içerisinde uçuş rotaları boyunca operasyonların çakışmasız bir şekilde gerçekleşmesi gerekmektedir. Buna göre, rotaları birbirine bağlayan tüm m noktalarında uçakların geçiş zamanları arasında minimum emniyet ayırması kadar süre olmalıdır. Denklemler (4.11) – (4.12) ile m noktasından geçen i ve j uçakları arasındaki zamanın minimum radar ayırması (sep_i veya sep_j) kadar olması sağlanmaktadır. Ayırma zamanları minimum radar ayırma mesafesinin (5 NM) uçakların hızlarına bölünmesi ile elde edilmektedir. $r_{i,j,m}$ karar değişkeni ile i ve j uçaklarından hangisinin önde olduğu belirlenmektedir. Uçak kategorilerine göre uçuş hızları farklılık gösterdiği için radar ayırma zamanı arkadaki uçağın hızı dikkate alınarak sağlanmalıdır. Denklem (4.11)'de i

uçağının arkada olduğu durum için emniyet ayırması (sep_i), Denklem (4.12)'de j uçağının arkada olduğu durum için emniyet ayırması (sep_j) garanti edilmektedir.

$$t_{i,m} \geq t_{j,m} + sep_i - G(2 - y_{i,m} - y_{j,m}) - Gr_{i,j,m} \quad \forall i, j, m \quad (4.11)$$

$$i \neq j, m \neq ep_i$$

$$t_{j,m} \geq t_{i,m} + sep_j - G(2 - y_{i,m} - y_{j,m}) - G(1 - r_{i,j,m}) \quad \forall i, j, m \quad (4.12)$$

$$i \neq j, m \neq ep_i$$

4.2. Stokastik Matematiksel Model

Stokastik programlama, belirsizlik içeren problemlerin matematiksel olarak modellenmesi ve çözümü için kullanılan bir yaklaşımdır. Bu tür problemlerde, bir veya daha fazla rassal değişken ve bu değişkenlere bağlı olarak ortaya çıkan belirsizlikler vardır. Bir veya daha fazla rassal değişken genellikle olasılık dağılımları ile ifade edilerek belirsiz olayları temsil eder. Stokastik programlama ile bu belirsizlikler hesaba katılarak karar verme süreçlerinin daha gerçekçi bir şekilde optimize edilmesi amaçlanır (Birge ve Louveaux, 2011).

İki aşamalı stokastik programlama, belirsizlik içeren karar verme problemlerini çözmek için kullanılan bir tekniktir. Bu teknikte, karar verici belirsizliğin varlığını göz önünde bulundurarak, bir olasılık dağılımına göre değişen parametrelere sahip bir karar problemini iki aşamada çözer. Bu durumda birinci aşama karar değişkenleri ve ikinci aşama karar değişkenleri olmak üzere iki çeşit karar değişkeni kümesi bulunmaktadır. Birinci aşama karar değişkenleri rassal değişkenler oluşmadan alınan kararlardır. İkinci aşamada ise rassal değişkenlerin gerçekleşmesi ile telafi edici ikinci aşama kararları verilir. Birinci aşama kararları x vektörü ile temsil edilirken, ikinci aşama kararları y vektörü ile temsil edilir. Rassal olayları temsil etmek için ξ vektörü kullanılır (Birge ve Louveaux, 2011).

İki aşamalı stokastik programlama modelini, Denklemler (4.13) – (4.16) 'da verildiği gibi standart bir şekilde gösterebiliriz. Denklemler (4.13) – (4.14) stokastik modelin ilk aşamasını ifade etmektedir:

$$enk \ z = c^T x + E[Q(x, \xi)] \quad (4.13)$$

$$Ax = b, x \geq 0 \quad (4.14)$$

$Q(x, \xi)$ ikinci aşama probleminin en iyi çözümünü göstermektedir. c, A, b vektörleri bilinen parametrelerdir. $c^T x$ ifadesi amaç fonksiyonuna karşılık gelirken $\{x \mid Ax = b, x \geq 0\}$ uygulanabilir çözümler kümesidir. Stokastik modelin ikinci aşaması Denklemler (4.15) – (4.16) ile ifade edilmektedir:

$$\text{enk } z = q(\xi)^T y \quad (4.15)$$

$$T(\xi)x - W(\xi)y = h(\xi), y \geq 0 \quad (4.16)$$

$\xi = (q, h, T, W)$ vektörü ile temsil ettiğimiz ve tüm elemanları rassal değer alabilen değişkenlerin değerleri problemin ikinci aşamasını belirlemektedir. W ve T matrisleri telafi ve teknoloji matrisleridir. İkinci aşama amaç vektörü q ile temsil edilirken sağ taraf vektörü h ile temsil edilmektedir.

Stokastik programlamada belirsizlikler, karar vericinin kontrolünde olmayan ve gelecekte gerçekleşme olasılıkları olan durumlar olarak tanımlanır. Bu belirsizlikler, kesikli ve sürekli olasılık olmak üzere iki şekilde temsil edilebilir. Kesikli olaylar, belirsizliklerin belirli anlarda veya noktalarda ortaya çıktığı durumları temsil eder. Bu tür belirsizlikler, belirli olayların gerçekleşip gerçekleşmeyeceğini veya belirli durumların meydana gelip gelmeyeceğini ifade eder. Sürekli olasılık dağılımları, belirsizliklerin sürekli bir aralık içinde değer alabileceği durumları temsil eder. Bu tür belirsizlikler, genellikle bir değişkenin olasılık yoğunluk fonksiyonu ile tanımlanır. Stokastik programlamada, belirsizliklerin temsil şekli, problemin doğasına ve karar vericinin sahip olduğu bilgiye bağlı olarak değişebilir. Karar vericiler, belirsizlikleri, modelin karmaşıklığını ve hesaplama maliyetini dikkate alarak hangi yaklaşımın kullanılacağına karar vermelidirler (Birge ve Louveaux, 2011).

Senaryo temelli yaklaşım olarak da isimlendirilen kesikli olay yaklaşımı farklı türde belirsizlikleri ele alırken her biri belirli avantajlara ve dezavantajlara sahiptir. Sürekli olasılık dağılımları kullanarak daha ayrıntılı ve hassas belirsizlik modelleri oluşturulurken doğrusal olmayan eşitsizlikler ve hesaplama yükü ile karşılaşmaktadır. Kesikli olay yaklaşımında ise belirsizliklerin doğru bir şekilde temsil edilmesi için yeterli sayıda senaryo gerekebilir, bu da hesaplama zorluğuna neden olabilir. Bu çalışmada, doğrusallığı sürdürmek ve hesaplama zorluklarını azaltmak amacıyla senaryo temelli iki aşamalı stokastik programlama yaklaşımı tercih edilmiştir. Rassal olayların temsil edildiği ξ vektörünün içerdiği $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_S$ senaryolarının sırasıyla $p_1, p_2, \dots, p_S$

olasılıklarına sahip olduğu varsayılmaktadır. Bu sebeple, Denklem (4.13)'de verilen birinci aşama amaç fonksiyonu ifadesindeki beklenti ($E[Q(x, \xi)]$) Denklem (4.17)'de verildiği gibi rassal olay senaryolarının olasılıklarına bağlı olarak hesaplanmaktadır (Birge ve Louveaux, 2011).

$$E[Q(x, \xi)] = \sum_{s=1}^S p_s Q(x, \xi_s) \quad (4.17)$$

Stokastik programlama problemlerinde "Value of Stochastic Solution" (Stokastik Çözüm Değeri) veya kısaca "VSS" olarak adlandırılan bir kavram, stokastik bir modele dayalı olarak alınan kararları değerlendirmek için kullanılır. Deterministik ve stokastik yaklaşımları karşılaştırarak hesaplanan VSS değeri stokastik programlama kullanmanın avantajını gösterir. VSS değerini hesaplamak için aşağıdaki adımlar takip edilir (Ertem, Özçelik ve Saraç, 2021):

Adım 1: Tüm senaryolar dikkate alınarak stokastik programlama problemi çözülür. Stokastik modelin amaç fonksiyonu değeri (STC) belirsizlik senaryoları ve olasılıkları dikkate alınarak hesaplanır.

Adım 2: Rassal olay senaryolarının olasılıklarına bağlı olarak gerçekleşme olasılığı en yüksek olan senaryo için problem deterministik model kullanılarak çözülür ve uçuş rotaları belirlenir.

Bu çalışma kapsamında rüzgâr etkisinin hesaba katılması ve konvektif alanların gerçekleştiği zamanlarda diğer zamanlara göre rüzgârın daha etkili olması nedeniyle olasılığı en yüksek olan rüzgâr senaryosu ile deterministik modelin çözdürülmesi problemi daha gerçekçi bir şekilde temsil etmeyi sağlamaktadır.

Adım 3: Bir önceki adımda belirlenen uçuş rotaları sabitlenerek stokastik programlama modeli çözülür ve beklenen çözümün amaç fonksiyonu değeri (VES) hesaplanır.

Adım 4: STC ve VES değerleri arasındaki fark bulunarak VSS değeri Denklem (4.18)'de verildiği gibi hesaplanır:

$$VSS = VES - STC \quad (4.18)$$

Ele alınan enküçüklenme problemi için pozitif bir VSS değeri elde edilmesi belirsizliği azaltmada ilk aşama kararının başarılı olduğunu gösterir. Bu durumda deterministik çözüme kıyasla daha iyi bir sonuç elde edilmiştir.

4.2.1. Uçakların yere göre hızlarının hesaplanması

Çalışmamızda hava sahasındaki rüzgâr belirsizliklerini hesaba katan bir stokastik model geliştirilmiştir. Geliştirilen bu model ile tüm rüzgâr senaryolar için geçerli olacak şekilde uçuş rotaları belirlenmektedir. Hava sahasındaki mevcut rüzgârdan uçakların uçuş hızları etkilenecektir. Bu sebeple uçakların gerçek hava hızları (V_{TAS}) yerine yere göre hızları (V_{ground}) kullanılmalıdır. Yere göre hız hesabı Denklem (4.19)'da verildiği gibi hesaplanmaktadır:

$$V_{ground} = V_{TAS} + V_{wind} \cos(AC_{heading} - Wind_{direction}) \quad (4.19)$$

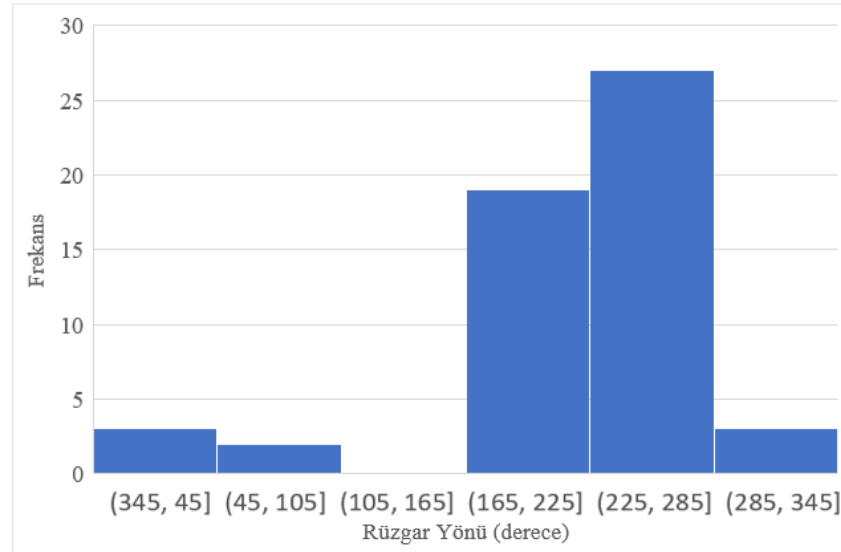
Burada V_{wind} rüzgâr hızını, $Wind_{direction}$ rüzgâr yönünü, $AC_{heading}$ uçağın uçuş baş açısını temsil etmektedir. Her bir uçağın baş açısı uçuş yörüngesi boyunca m ve n nokta çiftleri arasındaki uçuş rotasının yönüne eşittir.

4.2.2. Rüzgâr senaryolarının belirlenmesi

Çalışma kapsamında yol safhası uçuşlarının gerçekleştiği hava sahası içerisindeki rüzgâr belirsizlikleri ele alınmıştır. Uçakların operasyonlarını konvektif alanların bulunduğu hava sahası içerisinde gerçekleştirdikleri göz önünde bulundurulduğunda bu alanların oluştuğu zamanlardaki verilere göre rüzgâr senaryolarının oluşturulması ele alınan problemi daha doğru bir şekilde temsil etmeyi sağlayacaktır. Konvektif alanların gerçekleştiği zamanları ve buna dayalı olarak da rüzgâr senaryolarını belirlemek için İstanbul Kartal'da bulunan 17064 numaralı “İstanbul Bölge” isimli meteoroloji istasyonu referans istasyon olarak seçilmiştir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2023a). İstanbul üzerindeki meteorolojik verilerin elde edildiği bu istasyon için 2015 ve 2023 yılları arasında meydana gelmiş olan konvektif alanlar “meteomanz.com” internet sitesi ve IOWA Eyalet Üniversitesi hava durumu veri tabanları kullanılarak belirlenmiştir. Bunun için sekiz yıllık süreçte tüm hava durumu verileri birer aylık zaman dilimlerine ayrılarak kaydedilmiştir. Sonrasında “meteomanz.com” internet sitesinden elde edilen verilerden “CB” bulut kodlarının ve “thunderstorm” açıklamalarının yer aldığı veriler ayıklanarak

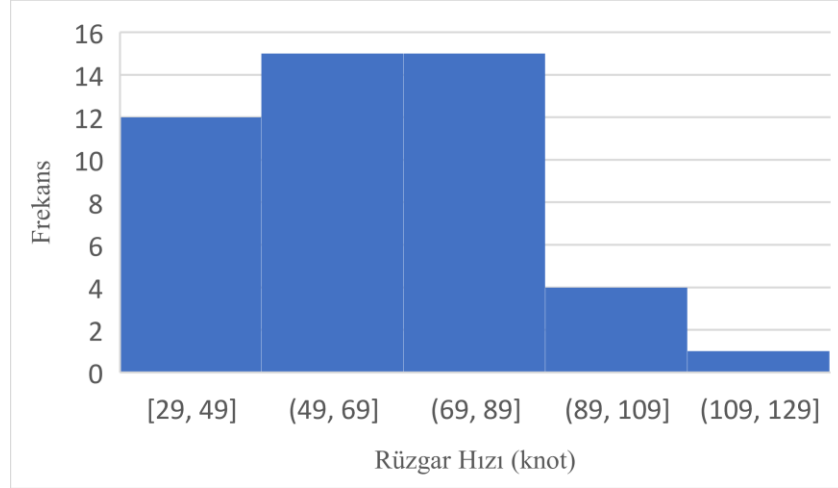
konvektif alanların gerçekleştiği günler ve eşgüdümlü evrensel zamanlar (UTC) belirlenmiştir (Meteomanz.com, 2023). Aynı şekilde IOWA Eyalet üniversitesi veri tabanından elde edilen verilerden “TS” kodlarının yer aldığı veriler ayıklanarak konvektif alanların gerçekleştiği günler ve eşgüdümlü evrensel zamanlar (UTC) belirlenmiştir (Iowa State University, 2023). Her iki veri tabanından ayıklanan veriler karşılaştırılarak son ayıklama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu veri tabanlarındaki bilgiler resmi havalimanı ve hava istasyonları tarafından yayınlanan verilere dayanmaktadır.

Konvektif alanların meydana geldiği günler ve zamanlar belirlendikten sonra bu zamanlarda gerçekleşen rüzgâr verileri 17064 numaralı İstanbul Kartal istasyonu için Wyoming Üniversitesi veri tabanından elde edilmiştir (Weatherdata, 2023). Elde edilen veriler farklı irtifalar için derece cinsinden rüzgâr yönü ve knot (kt) cinsinden rüzgâr hızı bilgilerini içermektedir. Uçuş irtifası 35000 ft (uçuş seviyesi FL350) için veriler ayıklanmıştır. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de rüzgâr yönü ve rüzgâr hızı verilerinin çubuk grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.1. FL350 için rüzgâr yönü ve frekansı

Rüzgâr yönü verileri Şekil 4.1’de görüldüğü üzere 60 derecelik aralılarla temsil edilmiştir. Grafiğe göre 105°- 165° aralığında hiç veri gözlenmezken 225°- 285° aralığında en çok veri gözlenmiştir. 165°- 225° aralığı yüksek oranda verinin gözleendiği bir diğer aralıktır. Ancak 345°- 45°, 45°- 105° ve 285°- 345° aralıklarında çok düşük oranda veri gözlenmiştir.



Şekil 4.2. FL350 için rüzgâr hızı ve frekansı

Şekil 4.2’de verilen çubuk grafiğinde rüzgâr hızları 20 kt aralıklarla temsil edilerek görülme sıklıkları paylaşılmıştır. Toplamda 5 farklı aralıkta gözlenen rüzgâr hızları 29 – 49, 49 – 69 ve 69 – 89 aralıklarında en çok gözlenen veriye sahiptir. Rüzgâr hızı ve yönü verilerinden ortak gözlem sayıları Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Ortak gözlenen rüzgâr yönü ve rüzgâr hızı veri sayıları

Yön aralıkları (°)	Hız aralıkları (knots)				
	29-49	49-69	69-89	89-109	109-129
165-225	4	6	4	1	0
225-285	2	9	11	2	2
285-345	2	0	1	0	0
345-45	1	1	0	0	0
45-105	1	0	0	0	0

Rüzgâr yönü ve hızı çapraz tablosu oluşturulduktan sonra rüzgâr senaryoları belirlenmiştir. Bunun için öncelikli olarak Tablo 4.1’de verilen gözlem sayıları incelenerek yalnızca bir veya iki defa gözlenen değerlerin dikkate alınmamasına karar verilmiştir. Konvektif alanların oluştuğu durumlardaki çok az gözlenen verilerden ziyade daha çok gözlenen verilerin dikkate alınması, bu alanların oluştuğu hava sahasında daha çok karşılaşılabilecek rüzgarları temsil etmeyi sağlamaktadır. Tablodaki değerler incelendiğinde hâkim rüzgâr aralıklarının 165°- 225° ve 225°- 285° olduğu görülmektedir. Diğer aralıklarda ise bir veya iki defa ölçüm verisi ile karşılaşılmıştır. Rüzgâr hızı açısından baktığımızda ise yüksek değerlerde (89 kt ve üzeri) bir veya iki defa gözlem verisi elde edilmiştir. Buna göre oluşturulan rüzgâr senaryoları ve olasılıkları

Tablo 4.2’de paylaşılmıştır. Senaryo olasılıkları, gözlenen rüzgâr verisi sayısının bir veya iki defa gözlenen değerler haricindeki verilerin toplam gözlem sayısına oranlanması ile elde edilmiştir.

Tablo 4.2. Rüzgâr senaryoları ve olasılıkları

Senaryo	Yön	Hız	Olasılık (%)
s1	195	39	11.8
s2	195	59	17.6
s3	195	79	11.8
s4	255	59	26.5
s5	255	79	32.4

Rüzgâr senaryoları oluşturulurken rüzgâr yönü ve hızı aralıklarının ortanca değerleri alınarak ilgili aralıktaki tüm durumları temsil etmesi sağlanmıştır. Örneğin, 165°- 225° aralığı 195° ortanca değeri ile 225°- 285° aralığı 255° ortanca değeri ile temsil edilerek rüzgâr senaryolarındaki yön değerleri belirlenmiştir. Rüzgâr hızları için baktığımızda, 29 – 49 aralığı 39 kt, 49 – 69 aralığı 59 kt ve 69 – 89 aralığı 79 kt ortanca değerleri ile temsil edilmiştir. Konvektif alanların meydana geldiği zamanlardaki veriler dikkate alınarak oluşturulan beş farklı rüzgâr senaryosunun tamamı için geçerli uygulanabilir çözümler üretmek bu çalışmanın amaçlarından birisidir.

4.3. İki Aşamalı Stokastik Programlama Modeli

Çalışmada geliştirilen iki aşamalı stokastik programlama modelini oluşturan kümeler, indisler, parametreler, amaç fonksiyonu, birinci ve ikinci aşama karar değişkenleri sırasıyla bu bölümde verilmiştir.

Kümeler ve indisler

$F = (1, 2, \dots, f)$: Hava sahası uçuş noktaları ($m, n \in F$)

$A = (1, 2, \dots, a)$: Uçak kümesi ($i, j \in A$)

$E = (1, 2, \dots, e)$: Hava sahasına giriş noktaları ($ep_i \in E$)

$O = (1, 2, \dots, o)$: Hava sahasından çıkış noktaları ($op_i \in O$)

$S = (1, 2, \dots, s)$: Rüzgâr senaryoları kümesi ($s \in S$)

Parametreler

ep_i : i . uçağın hava sahasına giriş yapacağı nokta

op_i : i . uçağın hava sahasından çıkış yapacağı nokta

et_i : i . uçağın hava sahasına tahmin edilen giriş zamanı

$b_{m,n}$: olumsuz hava koşulları altında m ve n noktaları arasında uçuş yapılabiliriyorsa 1; diğer durumda 0 değeri alan parametre

$d_{m,n}$: m ve n noktaları arasındaki mesafe matrisi

$v_{i,m,n,s}$: s rüzgâr senaryosunda m ve n noktaları arasında i . uçağın yer hızı

sep_i : i . uçağın diğer uçaklarla arasında olması gereken radar ayırması

$k_{i,m,n,s}$: s rüzgâr senaryosunda m 'den n noktasına giden i . uçağının radar ayırması düzeltme katsayısı

G : Yeterince büyük pozitif bir sayı

$prob_s$: s rüzgâr senaryosunun gerçekleşme olasılığı

Stokastik modelin birinci aşama karar değişkenleri

$x_{i,m,n}$: i . uçak m noktasından n noktasına gidecekse 1; diğer durumda 0 değeri alan 0-1 tam sayı karar değişkeni

$y_{i,m}$: i . uçak m noktasından geçecekse 1; diğer durumda 0 değeri alan 0-1 tam sayı karar değişkeni

Stokastik modelin ikinci aşama karar değişkenleri

$t_{i,m,s}$: s rüzgâr senaryosunda i . uçağın m noktasından geçme zamanı

$r_{i,j,m,s}$: s rüzgâr senaryosunda i uçağı m noktasına j uçağından önce ulaşıyorsa 1; diğer durumda 0 değeri alan 0-1 tam sayı karar değişkeni

$total_time_s$: s rüzgâr senaryosunda uçakların toplam uçuş süresi

Amaç Fonksiyonu

Ele alınan problem için amaç fonksiyonu Denklemler (4.20) – (4.21) verildiği gibi uçakların hava sahası içinde toplam uçuş süresinin enküçüklenmesidir.

$$total_time_s = \sum_{i \in A} \sum_{m \in F} \sum_{n \in F} \frac{x_{i,m,n} d_{m,n}}{v_{i,m,n,s}} \quad (4.20)$$

$$z_{sto} = enk \sum_s prob_s total_time_s \quad (4.21)$$

Atama Kısıtları

Stokastik modelde uçakların rotalarını belirlemek için oluşturulmuş olan rota atama kısıtları Denklemler (4.22) – (4.26) arasında verilmiştir. Atama kısıtlarında yer alan karar değişkenlerinin tamamı stokastik modelin birinci aşama karar değişkenlerinden oluşmaktadır. Bu sebeple atama kısıtlarında rüzgâr senaryolarını temsil eden s indisi bulunmamaktadır. Denklem (4.22) ile uçağın hava sahasına girdikten sonra ilk uğrayacağı nokta ataması yapılarak hava sahasına giriş noktası ile atanan nokta arasında ilk uçuş rotası belirlenmektedir. Sonrasında Denklem (4.23) ile hava sahasını terk edeceği noktaya kadar olan tüm m ve n noktaları arasındaki rotaların ataması yapılmaktadır. Uçağın hava sahasını terk etmeden hemen önce uğrayacağı son noktanın Denklem (4.24) ile atanması ile uçuş yörüngesi tamamlanmaktadır. Denklem (4.25) aralarında uçuş rotası bulunmayan nokta çiftleri ve olumsuz hava koşullarından dolayı uçuşa kapalı olan rotalar için atama yapılmamasını sağlamaktadır. Uçakların rotaları oluşturulurken kullanacakları noktaları tek tek belirlemek için (4.26) oluşturulmuştur. Bu denklem m ve n noktaları arasındaki atanan rotalar ile noktalar arasındaki ilişkiyi gösteren kısıttır.

$$\sum_{\substack{m \in F \\ m \neq n \\ m = ep_i}} \sum_{\substack{n \in F \\ d_{m,n} \neq 0 \\ b_{m,n} = 1}} x_{i,m,n} = 1 \quad \forall i \quad (4.22)$$

$$\sum_{\substack{n \in F \\ n \neq m \\ n \neq ep_i \\ d_{m,n} \neq 0 \\ b_{m,n} = 1}} x_{i,m,n} - \sum_{\substack{n \in F \\ n \neq m \\ n \neq op_i \\ d_{m,n} \neq 0 \\ b_{n,m} = 1}} x_{i,n,m} = 0 \quad \forall i, m \\ m \neq ep_i, m \neq op_i \quad (4.23)$$

$$\sum_{\substack{m \in F \\ m \neq n \\ b_{m,n} = 1}} \sum_{\substack{n \in F \\ n = op_i \\ d_{m,n} \neq 0}} x_{i,m,n} = 1 \quad \forall i \quad (4.24)$$

$$\sum_{\substack{m \in F \\ veya \\ b_{m,n} = 0}} \sum_{\substack{n \in F \\ d_{m,n} = 0 \\ b_{m,n} = 0}} x_{i,m,n} = 0 \quad \forall i \quad (4.25)$$

$$\sum_{\substack{m \in F \\ m \neq n}} x_{i,m,n} = y_{i,n} \quad \forall i, n \quad (4.26)$$

Zaman Hesabı Kısıtları

Uçakların hava sahasına girdikten sonra rotaları üzerindeki her bir noktada bulunma zamanları Denklemler (4.27) – (4.30) ile hesaplanmaktadır. Uçakların hızları hava sahasındaki rüzgâr yönü ve rüzgâr hızına bağlıdır. Bu sebeple Denklem (4.19)'da verildiği gibi uçakların yere göre uçuş hızları dikkate alınmalıdır. Model tarafından belirlenecek olan uçuş rotaları üzerindeki uçuş baş açısı, rüzgâr yönü ve rüzgâr hızına göre hesaplanan uçuş hızları dikkate alınarak uçakların her bir noktada bulunma zamanları hesaplanmaktadır. Böylece model rüzgâr belirsizliği senaryolarının tamamını dikkate alarak uçuşların yörüngelerini belirlemektedir.

$$t_{i,n,s} \geq et_i + \frac{d_{m,n}}{v_{i,m,n,s}} - G(1 - x_{i,m,n}) \quad \forall i, m, n, s \quad m = ep_i \quad (4.27)$$

$$t_{i,n,s} \leq et_i + \frac{d_{m,n}}{v_{i,m,n,s}} + G(1 - x_{i,m,n}) \quad \forall i, m, n, s \quad m = ep_i \quad (4.28)$$

$$t_{i,n,s} \geq t_{i,m,s} + \frac{d_{m,n}}{v_{i,m,n,s}} - G(1 - x_{i,m,n}) \quad \forall i, m, n, s \quad m \neq n, m \neq ep_i \quad (4.29)$$

$$t_{i,n,s} \leq t_{i,m,s} + \frac{d_{m,n}}{v_{i,m,n,s}} + G(1 - x_{i,m,n}) \quad \forall i, m, n, s \quad m \neq n, m \neq ep_i \quad (4.30)$$

Uçaklar arasındaki çakışmaları çözümleme kısıtları

Hava sahası içerisinde uçuş rotaları boyunca operasyonların çakışmasız bir şekilde gerçekleşmesi gerekmektedir. Buna göre, rotaları birbirine bağlayan tüm m noktalarında, uçakların geçiş zamanları arasında minimum emniyet ayırması kadar süre olmalıdır. Denklemler (4.31) – (4.34) ile m noktasından geçen i ve j uçakları arasındaki zamanın minimum radar ayırması (sep_i veya sep_j) kadar olması sağlanmaktadır. Deterministik modelden farklı olarak stokastik modelde çıkış noktasındaki emniyet ayırmalarını sağlamak için Denklemler (4.33) – (4.34) eklenmiştir. Uçakların hava sahası çıkış noktasına hangi noktadan gelecekleri dolayısıyla hangi uçuş baş açısı ile uçacakları model tarafından belirlenecektir. Uçuş baş açısına ve rüzgâr senaryolarına bağlı olarak da uçuş hızları değişecektir. Bu sebeple çıkış noktası ayırmalarını kontrol etmek için ayrı kısıtlar yazılmıştır. $r_{i,j,m}$ karar değişkeni ile i ve j uçaklarından hangisinin önde olduğu belirlenmektedir. Uçak kategorilerine göre uçuş hızları farklılık gösterdiği için radar

ayırma zamanı arkadaki uçağın hızı dikkate alınarak sağlanmalıdır. Denklem (4.31) ve Denklem (4.33)'de i uçağının arkada olduğu durum için emniyet ayırması (sep_i), Denklem (4.32) ve Denklem (4.34)'de j uçağının arkada olduğu durum için emniyet ayırması (sep_j) garanti edilmektedir.

Rüzgâr yönü ve hızına bağlı olarak uçakların hızları değiştiği için radar ayırması mesafesini yol alma zamanları değişmektedir. Bu sebeple çakışma çözümleme kısıtlarına ayırma düzeltme katsayısı ($k_{i,m,n,s}$) eklenmiştir.

$$t_{i,m,s} \geq t_{j,m,s} + sep_i \left(\sum_{\substack{n \\ n \neq m}} x_{i,m,n} \cdot k_{i,m,n,s} \right) \quad \begin{array}{l} \forall i, j, m, s \\ i \neq j, m \neq ep_i \end{array} \quad (4.31)$$

$$- G(2 - y_{i,m} - y_{j,m}) - Gr_{i,j,m,s}$$

$$t_{j,m,s} \geq t_{i,m,s} + sep_j \left(\sum_{\substack{n \\ n \neq m}} x_{j,m,n} \cdot k_{j,m,n,s} \right) \quad \begin{array}{l} \forall i, j, m, s \\ i \neq j, m \neq ep_i \end{array} \quad (4.32)$$

$$- G(2 - y_{i,m} - y_{j,m}) - G(1 - r_{i,j,m,s})$$

$$t_{i,m,s} \geq t_{j,m,s} + sep_i \left(\sum_{\substack{n \\ n \neq m}} x_{i,n,m} \cdot k_{i,n,m,s} \right) \quad \begin{array}{l} \forall i, j, m, s \\ i \neq j, m = op_i \end{array} \quad (4.33)$$

$$- G(2 - y_{i,m} - y_{j,m}) - Gr_{i,j,m,s}$$

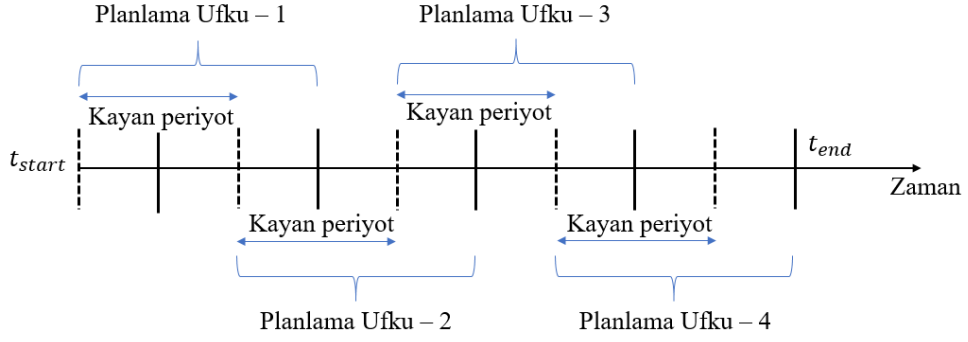
$$t_{j,m,s} \geq t_{i,m,s} + sep_j \left(\sum_{\substack{n \\ n \neq m}} x_{j,n,m} \cdot k_{j,n,m,s} \right) \quad \begin{array}{l} \forall i, j, m, s \\ i \neq j, m = op_i \end{array} \quad (4.34)$$

$$- G(2 - y_{i,m} - y_{j,m}) - G(1 - r_{i,j,m,s})$$

5. KAYAN UFUK KONTROLÜ (RHC) YAKLAŞIMI

Zamana bağlı bir modelin tekrar tekrar çözdürüldüğü ve her bir çözüm adımı sırasında planlama aralığının zaman içinde ileriye taşındığı yaklaşım kayan ufuk kontrolü olarak adlandırılır. Her bir planlama ufku bir önceki ufuktaki veriler dikkate alınmakta ve yeni veriler sisteme dahil edilmektedir. Bir önceki periyottaki verilerin dikkate alınması üretilen çözümlerin daha sağlam ve uygulanabilir olmasını sağlamaktadır (Lieder, Briskorn ve Stolletz, 2015; Lieder ve Stolletz, 2016; Samà, D'Ariano ve Pacciarelli, 2013). Geleneksel dinamik optimizasyon yönteminde mevcut zamandan tüm planlama ufuklarının sonuna kadar olan süreç için çözümler üretilip mevcut periyot için uygulanmaktadır. RHC yaklaşımında ise mevcut planlama ufku için çözümler üretilmektedir ve üretilen çözümler mevcut periyot için uygulanmaktadır. Ayrıca, dinamik programlama stratejisi sıklıkla ağır çevrim içi hesaplama yükü ile gerektirmektedir. Bunun yanında performansı mevcut bilgilerdeki bozulmalara ve/veya belirsizliklere karşı nispeten fazla hassastır (Hu ve Chen, 2005; Hu ve Di Paolo, 2008).

RHC yaklaşımında problem alt problemlere (planlama ufuklarına) ayrılmaktadır. Bu alt problemlerin her biri ayrı ayrı çözdürülebileceği gibi iç içe geçmiş şekilde de çözdürülebilir. Ayrı ayrı çözdürme yönteminde her bir planlama ufku arasında herhangi bir bilgi akışı olmadan çözümler üretilmektedir. İç içe geçmiş çözdürme yönteminde ise planlama ufukları arasında bilgi akışı olmaktadır. Bu çalışmada iç içe geçmiş çözdürme yöntemi benimsenmiştir. Belirli bir başlangıç zamanı (t_{start}) ve bitiş zamanı (t_{end}) için RHC akış şeması Şekil 5.1'de verilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere planlama ufuklarının başlangıç zamanı bir önceki ufkun bitiş zamanından değil de daha öncesinden başlamaktadır. Planlama ufukları için mevcut veriler altında çözümler üretilmekte, ancak kayan periyot (t_{period}) için çözümler uygulanmaktadır. Bu durumda kayan periyot için üretilen çözümler sabitlenmektedir. Sonrasında mevcut planlama ufkunun geri kalan zamanı bir sonraki planlama ufkuna dahil edilerek veri akışı sağlanmaktadır. Daha basit ifadeyle, her bir planlama ufku için üretilen çözümlerin kayan periyoda kadar olan kısmı uygulanmaktadır. İç içe geçmiş kayan planlama ufku yaklaşımında daha fazla planlama ufku ve daha fazla hesaplama yükü oluşmaktadır. Ancak planlama ufukları arasında bilgi paylaşımı ile daha kaliteli çözümlerin elde edilmesini sağlamaktadır (De Schutter ve Van Den Boom, 2001; Furini, Persiani ve Toth, 2012; Van Den Boom ve De Schutter, 2002).



Şekil 5.1. Kayan ufuk kontrolü yaklaşımı

5.1. RHC Yaklaşımının Uygulanması

Bu çalışmada Şekil 5.1’de verildiği gibi iç içe geçmiş kayan planlama ufku yaklaşımı stokastik model için uygulanmıştır. Yaklaşımın zaman akışını belirtmek için kullanılan parametreler aşağıda verildiği gibi tanımlanmıştır:

t_{start} : RHC başlangıç zamanı

t_{end} : RHC bitiş zamanı

t_{period} : Kayan periyot uzunluğu

$t_{horizon_period}$: Planlama ufku periyot uzunluğu

$t_{horizon_start}$: Her bir planlama ufku başlangıç zamanı

$t_{horizon_end}$: Her bir planlama ufku bitiş zamanı

t_{win} : Her bir planlama ufku kayan periyot bitiş zamanı

Her bir planlama ufkunun başlangıç zamanı bir önceki ufkun kayan periyot zamanının bitişine denk gelmektedir. Her bir planlama ufku için aynı uzunluğa sahip olan kayan periyot bitiş zamanı Denklem (5.1)’de verilen zamana karşılık gelmektedir. Planlama ufku periyot uzunluğu tüm periyotlar için aynıdır. Denklem (5.2)’de verilen eşitlik ile tüm planlama ufuklarının bitiş zamanları hesaplanmaktadır.

$$t_{win} = t_{horizon_start} + t_{period} \quad (5.1)$$

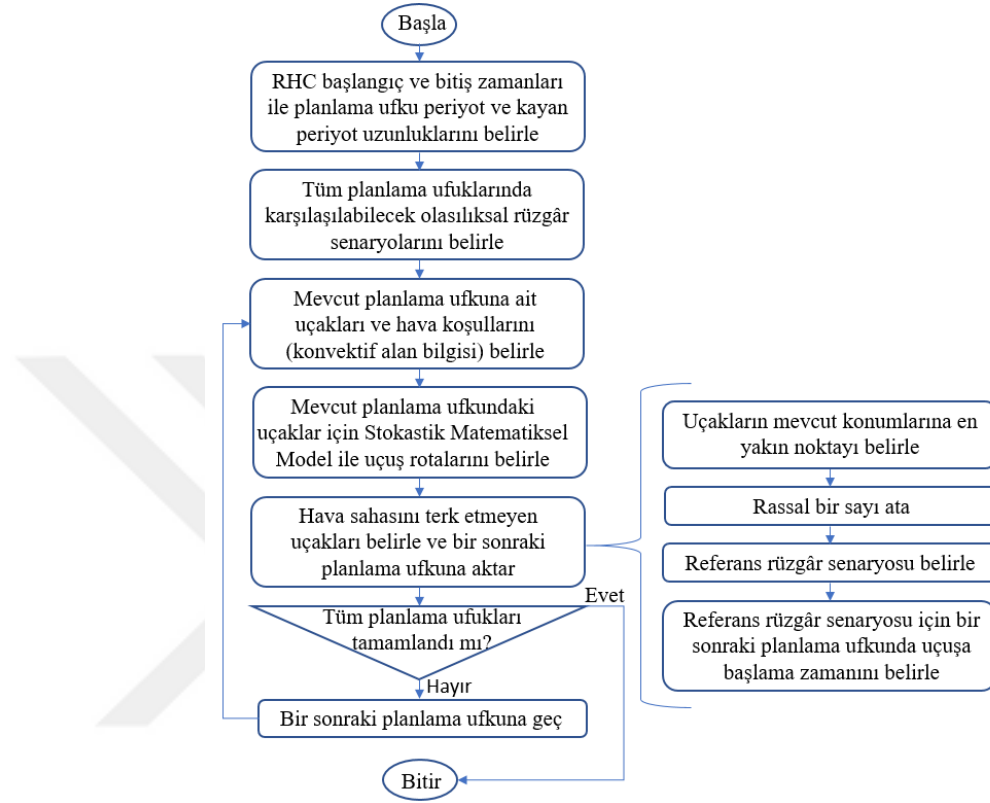
$$t_{horizon_end} = t_{horizon_start} + t_{horizon_period} \quad (5.2)$$

Konvektif alanların zamanla hareketi ve gelişimini hesaba katmak için belirli zaman aralıklarında güncellenmesi gerekmektedir. Bu zaman aralıkları her bir planlama ufku periyod uzunluğuna karşılık gelmektedir. Bu durumda üretilen çözümlerin doğruluğu kullanılan güncelleme periyoduna bağlıdır. Literatürdeki çalışmalara

baktığımızda genel olarak güncelleme periyodu 15 dakika alınmıştır (Clarke vd., 2009; Kamgarpour, Dadok ve Tomlin, 2010; Krozel, 2010; Summers vd., 2011; Taylor vd., 2018). Bu zaman değeri radar istasyonlarından alınan radar verilerinin düzenli olarak 15 dakikalık periyodlarda (genel olarak 5 ile 15 dakika arasında) güncellenmesi göz önünde bulundurularak belirlenmiştir (Hupe, Hauf ve Rokitansky, 2014; Sauer vd., 2013; Schilke ve Hecker, 2014). Sheth vd. (2013) Birleşik Devletler ve komşu kıyı suları için her 15 dakikada bir fırtına konumlarına ilişkin olasılıksal tahminlerin bir bütünü sağlandığını belirtmişlerdir. Seenivasan, Olivares ve Staffetti (2020) tarafından kullanılan sistem her 15 dakikada bir 3 km'lik yatay çözünürlükte görüntüler sağlayarak fırtına aktivitesini karakterize etmektedir. Matthews ve DeLaura (2010a) çalışmalarında 15 dakikalık limitin, pilotun daha uzak bir gelecekte havanın spesifik özelliklerinden muhtemelen habersiz olduğu varsayımıyla seçildiğini belirtmişlerdir. Buna göre, çalışmada planlama ufku uzunluğu olarak literatürde yaygın olarak kullanılan 15 dakikalık güncelleme periyodu ($t_{horizon_period} = 15$ dk.) benimsemiştir. Her bir planlama ufku içerisinde kayan periyot uzunluğu da $t_{period} = 10$ dakika olarak alınmıştır. Belirlenen bu periyot uzunlukları hem veri güncelleme sıklığı hem de pratik uygulanabilirlik açısından dikkate alındığında uygun bir denge sağlamaktadır.

Bu çalışmada RHC yaklaşımının olumsuz hava koşulları altında konvektif alanların ve rüzgâr belirsizliklerinin dahil edildiği stokastik model ile uygulanmasının akış şeması Şekil 5.2'de verilmiştir. Öncelikli olarak RHC yaklaşımının uygulanacağı problem için başlangıç zamanı ve bitiş zamanı belirlenmiştir. Bunun yanında planlama ufuklarının periyotları ve kayan periyot uzunluğu da bir önceki paragrafta belirtildiği şekilde sırasıyla 15 dakika ve 10 dakika olarak yaklaşımın başlangıç parametrelerinde tanımlanmıştır. Böylece başlangıç ve bitiş zamanları arasında kaç planlama ufku oluştuğu da ortaya çıkmaktadır. Sonrasında konvektif alanların bulunduğu hava sahasında karşılaşılabilecek rüzgâr senaryoları ile her bir planlama ufku için öngörülen konvektif alan yapısı ve konumu ayrı kümeler halinde oluşturulmuştur. Karşılaşılabilecek rüzgâr senaryoları tüm planlama ufukları boyunca aynıdır. Bölüm 4.2.2'de belirtildiği üzere rüzgâr senaryoları konvektif alanların oluştuğu zamanlarda karşılaşılan verilerden belirlenmiştir. Daha sonra ilk planlama ufkundan başlanarak tüm planlama ufukları için stokastik model ile hem uçakların konvektif alanlardan kaçınmaları sağlanarak hem de uçaklar arasındaki potansiyel çakışmalar çözümlenerek uçuş rotaları optimizasyonu yapılmaktadır. Bunun için öncelikle mevcut planlama ufkunda hava sahasına giriş yapacak uçaklar tahmini hava

sahasına giriş zamanları dikkate alınarak belirlenmektedir. Ayrıca mevcut planlama ufku boyunca hava sahasında olan konvektif alanlar modele tanımlanmaktadır. Bu da uçuşa açık ya da kapalı olan rotaların tanımlanması ile sağlanmaktadır.



Şekil 5.2. RHC akış şeması

Planlama ufkunda mevcut uçaklar için stokastik model ile uçuş rotaları belirlendikten sonra kayan periyot sonunda uçakların konumları belirlenmektedir. Daha açık ifadeyle belirtmek gerekirse; iç içe geçmiş RHC yaklaşımı gereği, 15 dakikalık planlama ufku için model koşturularak sonuçlar elde edildikten sonra 10 dakikalık periyot sonundaki uçak konumları dikkate alınmaktadır. Bu zaman sonunda hava sahasını terk etmeyen uçaklar belirlenerek bir sonraki planlama ufkuna aktarılmaktadır. Bu süreç tüm planlama ufukları tamamlanana kadar devam etmektedir.

Mevcut planlama ufku içerisinde kayan periyot zamanı sonunda hava sahasını terk etmeyen uçakların bir sonraki planlama ufkuna aktarılması süreci Şekil 5.2'deki akış şemasında ek bir parantez açılarak ifade edilmiştir. Uçaklar aktarılırken konum ve zaman bilgilerinin de aktarılması gerekmektedir. Konum bilgisinin modele tanıtılması için her bir uçağın belirlenmiş uçuş rotası üzerindeki uğrayacağı en yakın nokta belirlenerek bir

sonraki planlama ufkunda bu noktadan uçuşa devam etmesi sağlanmaktadır. Uçağın konumu belirlendikten sonra bu konumdaki zaman bilgisinin de aktarılması gerekmektedir. Ancak, stokastik model yapısında rüzgâr belirsizliklerinin temsil edildiği senaryolara göre uçağın noktalarda bulunma zamanları değişkenlik göstermektedir. Bu sebeple referans bir rüzgâr senaryosu belirlenerek bu senaryo için geçerli olan zamanlar bir sonraki planlama ufkuna aktarılmıştır. Referans rüzgâr senaryonun belirlenmesi için senaryoların gerçekleşme olasılıkları dikkate alınarak bir kümülatif olasılık kümesi oluşturulmuştur. Sonrasında rassal bir sayı ataması yapılarak olasılık kümesinde karşılık geldiği rüzgâr senaryosu seçilmektedir. Böylece, olasılığı yüksek olan senaryoların referans olarak seçilme olasılığı da yüksek olmaktadır.

RHC yaklaşımında ufuktaki tüm uçakların ve mevcut planlama ufkundaki uçakların parametrelerinin yer aldığı kümeler tanımlanmıştır. Mevcut planlama ufku parametreleri ufuktaki tüm uçakların parametreleri kümelerinden seçilmektedir. Ayrıca, hava sahasını terk etmeyen uçakların parametrelerini belirlemek amacıyla farklı kümeler tanımlanmıştır. Bu parametre kümeleri bir sonraki periyottaki mevcut parametreler kümesine dahil edilmektedirler. Tanımlanan parametre kümeleri ve açıklamaları aşağıda verildiği gibidir:

ep_{rhc} : Ufuktaki tüm uçakların giriş noktaları kümesi

op_{rhc} : Ufuktaki tüm uçakların çıkış noktaları kümesi

et_{rhc} : Ufuktaki tüm uçakların tahmin edilen giriş zamanları kümesi

b_{rhc} : Tüm planlama ufuklarında konvektif alanlardan dolayı uçuşa açık ya da kapalı olan rotalar kümesi

v_{rhc} : Ufuktaki tüm uçakların rüzgâr senaryolarındaki yer hızları kümesi

k_{rhc} : Ufuktaki tüm uçakların radar ayırması düzeltme katsayısı kümesi

ep_{cur} : Mevcut planlama ufkunda uçakların giriş noktaları kümesi

op_{cur} : Mevcut planlama ufkunda uçakların çıkış noktaları kümesi

et_{cur} : Mevcut planlama ufkunda uçakların tahmin edilen giriş zamanları kümesi

b_{cur} : Mevcut planlama ufkunda konvektif alanlardan dolayı uçuşa açık ya da kapalı olan rotalar kümesi

v_{cur} : Mevcut planlama ufkunda uçakların rüzgâr senaryolarındaki yer hızları kümesi

k_{cur} : Mevcut planlama ufkunda uçakların radar ayırması düzeltme katsayısı kümesi

ep_{nxt} : Bir sonraki planlama ufkuna kalan uçakların giriş noktaları kümesi
 op_{nxt} : Bir sonraki planlama ufkuna kalan uçakların çıkış noktaları kümesi
 et_{nxt} : Bir sonraki planlama ufkuna kalan uçakların tahmin edilen giriş zamanları kümesi
 v_{nxt} : Bir sonraki planlama ufkuna kalan uçakların rüzgâr senaryolarındaki yer hızları kümesi
 k_{nxt} : Bir sonraki planlama ufkuna kalan uçakların radar ayırması düzeltme katsayısı kümesi

Yukarıda ayrıntıları verilen RHC yaklaşımı Python ortamında kodlanmış ve uygulanmıştır. Yaklaşımın kodlanması ile ilgili sözde kod Şekil 5.3’de verilmiştir. Sözde kod aynı zamanda RHC yaklaşımının uygulanması hakkında özet bir bilgi de sağlamaktadır. Uçakların hava sahasına giriş zamanları referans alınarak mevcut planlama ufkuna dahil olup olmayacaklarına karar verilmektedir. Hava sahasına giriş zamanları $t_{horizon_start} - t_{horizon_end}$ zaman aralığındaki tüm uçaklar mevcut planlama ufkuna dahil edilmektedir.

Başla

Tanımla $ep_{rhc}, op_{rhc}, et_{rhc}, b_{rhc}, v_{rhc}, k_{rhc}$ tüm ufuk kümelerini

Döngü $t_{start} - t_{end}$ aralığındaki her bir planlama ufku için

Tanımla $t_{horizon_start} - t_{horizon_end}$ planlama ufkunu ve uçakları

Tanımla $ep_{cur}, op_{cur}, et_{cur}, b_{cur}, v_{cur}, k_{cur}$ planlama ufku kümelerini

Çöz Stokastik model

Döngü mevcut planlama ufkundaki i uçakları için

Eğer t_{win} anına kadar i uçağı hava sahasını terk etmemişse;

Belirle i uçağının t_{win} anındaki konumunu

Seç i uçağının uçuş rotası üzerindeki uğrayacağı en yakın noktayı

Belirle i uçağının en yakın noktadaki zamanını

Ekle i uçağının nokta ve zaman bilgisini ep_{nxt}, et_{nxt} kümelerine

Bitir

Tanımla hava sahasını terk etmeyen uçaklar için $ep_{nxt}, op_{nxt}, et_{nxt}, v_{nxt}, k_{nxt}$

Ekle $ep_{nxt}, op_{nxt}, et_{nxt}, v_{nxt}, k_{nxt}$ parametrelerini bir sonraki planlama ufku kümelerine

Bitir

Şekil 5.3. RHC yaklaşımının sözde (pseudo) kodu

Mevcut planlama ufkundaki tüm uçaklar için gerekli parametreler tanımlandıktan sonra model çözdürülür. Sonrasında t_{win} kayan periyot bitiminde hava sahasını terk etmeyen uçaklar belirlenir. Bu anda hava sahasını terk etmeyen uçaklar bir sonraki planlama ufkuna dahil edilmelidirler. Bu sebeple, hava sahasını terk etmeyen uçakların

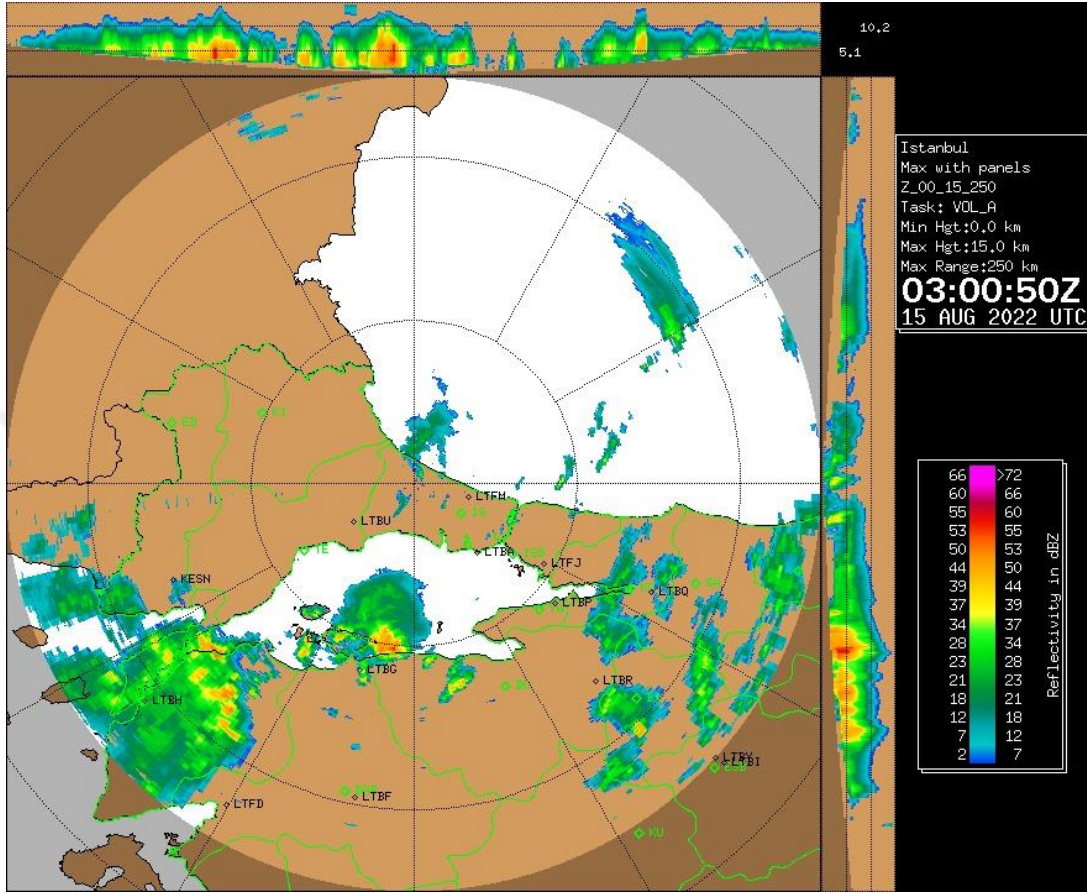
t_{win} anındaki konumları belirlenir. Ancak sonraki periyotta uçağın konumunu modele verebilmek amacıyla mevcut konumuna en yakın nokta seçilir. Bu noktada bulunma zamanı bir sonraki planlama ufkunda uçuşu başlangıç zamanını oluşturmaktadır. O sebeple referans bir rüzgâr senaryosu için bu noktadaki zamanı belirlenir. Böylece hava sahasını terk etmeyen uçakların bir sonraki planlama ufkundaki başlangıç noktaları ve zamanları ilgili kümelerle eklenir. Bir sonraki planlama ufkuna kalan uçakların tüm parametre kümeleri ($ep_{nxt}, op_{nxt}, et_{nxt}, v_{nxt}, k_{nxt}$) tanımlanır ve sonraki planlama ufku kümelerine dahil edilir. $t_{start} - t_{end}$ aralığındaki tüm planlama ufukları için bu süreç tamamlanır.

5.2. Konvektif Alanların Belirlenmesi

Uçakların hava sahası içerisinde karşılaşılabilecekleri konvektif alanları gerçeğe uygun olarak temsil etmek ve modele tanımlamak için geçmişte belirli bir bölgede gerçekleşmiş olan olayların incelenmesi kararlaştırılmıştır. Bu amaçla, İstanbul Kartal'daki 17064 numaralı "İstanbul Bölge" meteoroloji istasyonu referans istasyon olarak seçilmiştir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2023a). Bu istasyon için "meteomanz.com" internet sitesi ve IOWA Eyalet Üniversitesi hava durumu veri tabanları kullanılarak elde edilen veriler kullanılarak, 2015-2023 yılları arasında İstanbul'da meydana gelen konvektif alanlar belirlenmiştir. Bu amaçla, ilk olarak sekiz yıllık süreçteki tüm hava durumu verileri birer aylık zaman periyotlarına ayrılarak kaydedilmiştir. Daha sonra, "meteomanz.com" internet sitesinden elde edilen verilerden "CB" bulut kodlarının ve "thunderstorm" açıklamalarının yer aldığı veriler ile IOWA Eyalet üniversitesi veri tabanından elde edilen verilerden "TS" kodlarının yer aldığı veriler ayıklanarak konvektif alanların gerçekleştiği günler ve eşgüdümlü evrensel zamanlar (UTC) belirlenmiştir (Iowa State University, 2023; Meteomanz.com, 2023). Her iki veri tabanından ayıklanan veriler karşılaştırılarak son ayıklama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Konvektif alanların meydana geldiği günler ve UTC zamanları belirlendikten sonra Meteoroloji Genel Müdürlüğünden radar görüntüleri talep edilmiştir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2023a). 15 Ağustos 2022 tarihi 03 UTC zamanına ait olan örnek bir radar görüntüsü Şekil 5.4'de verilmiştir. Radar görüntüsünün sağ tarafında İstanbul radarında ait olduğu, maksimum bulut tavanı yüksekliği, maksimum menzil mesafesi, UTC zamanı

ve tarih bilgileri yer almaktadır. Bu bilgilerin altında genel hava radarı yağış şiddetini okumamızı sağlayan yansıma desibeli (dbZ) değerleri verilmiştir.



Şekil 5.4. Meteoroloji radar görüntüsü

Radar görüntüsünün üstünde yatay olarak ve sağ tarafında dikey olarak verilen grafikler bulut tavanı yüksekliklerini göstermektedir. Grafiklerde 5,1 km ve 10,2 km bulut tavanı yüksekliği eksenleri noktalı çizgiler olarak gösterilmiştir. Bu grafiklerde bulut tavanı yüksekliğinin yanında yağış şiddetinin irtifaya göre değişimi de görülmektedir. Radar görüntüsünün maksimum menzil mesafesi 250 km olarak verilmiştir. Bu durumda radar görüntüsü 250 km yarıçapındaki çemberden oluşmaktadır. Noktalı çemberler sırasıyla 100 km ve 200 km yarıçapındaki dairesel alanları temsil etmektedir.

Uçak üzerindeki hava radarı için radar ekranındaki renklerin yağış şiddeti terminolojisi metodoloji bölümünde ayrıntılı olarak verilmiştir. Meteoroloji radarındaki renkler, yansıma desibeli değerleri ve yağış şiddeti terminolojisi uçak hava radarı ile benzerdir. Magenta rengi dolu içeren aşırı yoğun yağış bölgelerini, kırmızı renk gök gürültülü yoğun yağış bölgelerini, turuncu renk kuvvetli yağmur bölgelerini, sarı renk

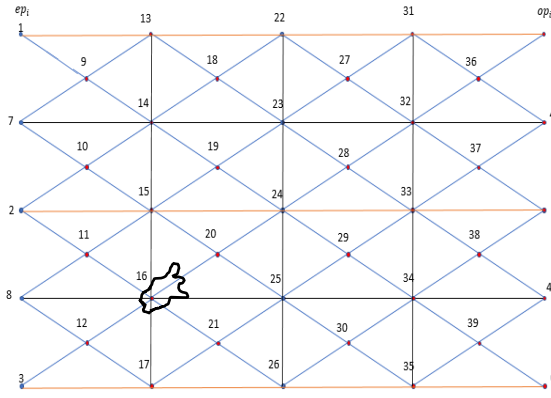
orta kuvvetli yağış bölgelerini, açık yeşil hafif yağış bölgelerini ve koyu yeşil de çisenti yağmur bölgelerini göstermektedir. Meteoroloji radar görüntülerinde uçak radarından farklı olarak açık ve koyu mavi renkteki bölgeler olduğu görünmektedir. Bu alanlar yağışın olmadığı ancak yağış potansiyelinin bulunduğu buz parçacıkları içeren orta ve düşük seviyedeki bulutları temsil etmektedir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2023b).

Çalışma kapsamında FL350 uçuş seviyesinde $120 \times 120 \text{ nm}^2$ genişliğindeki bir hava sahasında yapılan düz uçuşlar ele alınmıştır ($120 \text{ nm} = 222,24 \text{ km}$). Böyle bir hava sahası içerisindeki konvektif alanlar bulut tavanları da dikkate alınarak radar görüntülerinden belirlenmiştir. Radar görüntülerindeki 10,2 km bulut tavanı eksenini yaklaşık olarak 33500 ft (uçuş seviyesi FL335) irtifaya karşılık gelmektedir. Bulut tavanı yüksekliği bu eksenin üzerinde olan alanlar FL350 uçuş seviyesinde uçakların kaçınması gereken konvektif alanlar olarak alınmışlardır.

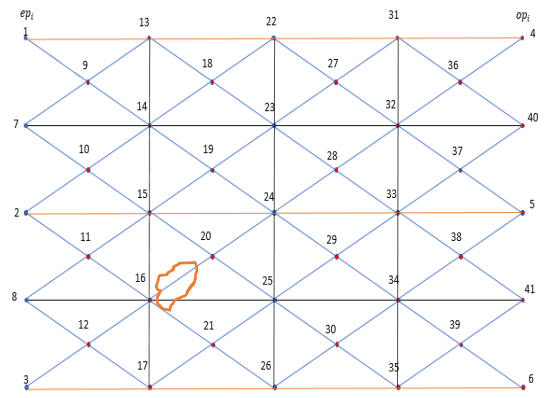
Şekil 5.5’de 29 Eylül 2020 tarihi 07:30 UTC ile 08:30 UTC saatleri arası için radar görüntüleri paylaşılmıştır. Görüntülerdeki bordo renkli noktalı alan $120 \times 120 \text{ nm}^2$ genişliğindeki hava sahasını temsil etmektedir. Bu alan içerisinde kalan konvektif alanlar tavan bulutları da dikkate alınarak işaretlenmiştir. İlk görüntüdeki konvektif alan siyah renkli, ikincisinde turuncu renkli, üçüncüsünde mor renkli, dördüncüsünde kahverengi renkli, beşincisinde kırmızı renkli ve altıncısında sarı renkli çerçevelerle gösterilmişlerdir. İlk radar görüntüsündeki alan zamanla kuzeydoğuya doğru hareket etmektedir. 07:54 UTC zamanına gelindiğinde ise bu alanın güneydoğusunda ve hava sahasının güneyinde yeni konvektif alanlar oluşmaya başlamıştır. Sonrasında bu alanlar da zamanla büyümeye ve hareket etmeye devam etmektedirler. 08:18 UTC zamanında hava sahasının kuzeyinde bir alan oluşmuş ve bir sonraki radar görüntüsünde görüldüğü üzere zamanla büyümüştür.

Bulut tavanları dikkate alınarak uçuş seviyesi FL350 için konvektif alanlar ve bu alanların zamanla değişimleri Şekil 5.5’de gösterildiği gibi belirlenmiştir. Bir saatlik zaman periyodu içerisinde altı farklı radar görüntüsündeki konvektif alanların sınırları sırasıyla siyah, turuncu, mor, kahverengi, kırmızı ve sarı renklerle çizilmişlerdir. Radar görüntüleri üzerinden tüm alanların sınırları belirlendikten sonra Şekil 5.6’da verildiği gibi hava sahası üzerine gerekli ölçeklendirmeler yapılarak entegre edilmişlerdir. Şekilde hava sahası kesikleştirme tekniği kullanılarak oluşturulan $120 \times 120 \text{ nm}^2$ genişliğindeki hava sahasının genel yapısı da görülmektedir. Hava sahası 1,2 ve 3 numaralı noktalar hava sahasına giriş noktaları; 4, 5 ve 6 numaralı noktalar hava sahasından çıkış noktaları

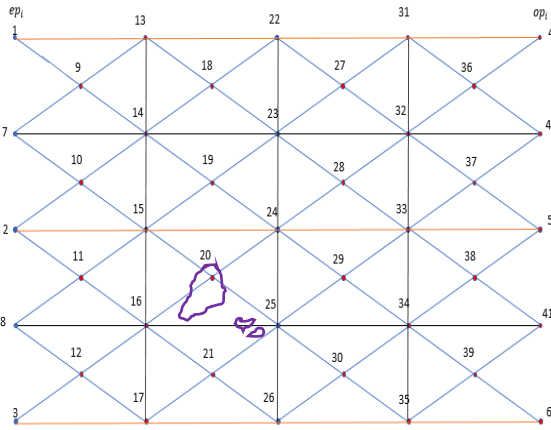
54



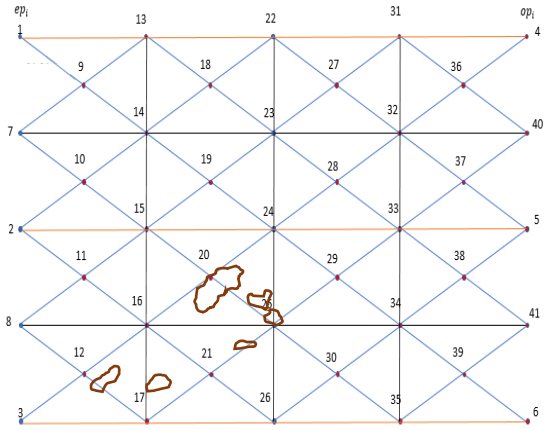
(a) 07:30:51Z UTC



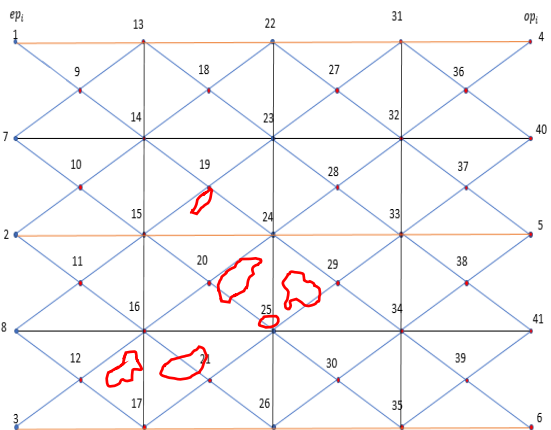
(b) 07:42:51Z UTC



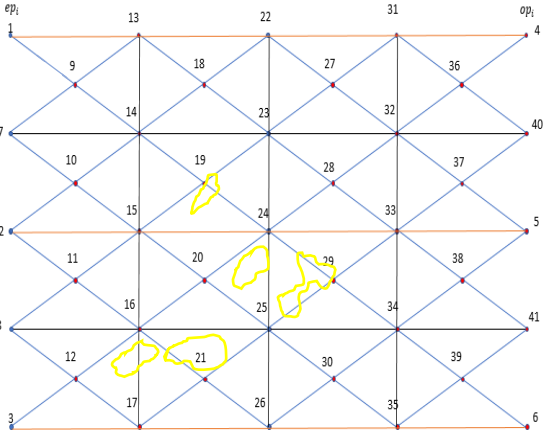
(c) 07:54:50Z UTC



(d) 08:06:50Z UTC



(e) 08:18:51Z UTC



(f) 08:30:50Z UTC

Şekil 5.6. 29 Eylül 2020 tarihindeki İstanbul radar görüntülerinin hava sahasındaki görünimleri

6. SAYISAL SONUÇLAR

Olumsuz hava koşulları altında hem uçakları konvektif alanlardan kaçındırarak hem de uçaklar arasındaki çakışmaları çözümleyerek operasyonların emniyetli bir şekilde gerçekleşmesi için geliştirilen matematiksel modeller test edilmiştir. Bu bölümde, üretilen test problemlerinden ve test sonuçlarından bahsedilmektedir.

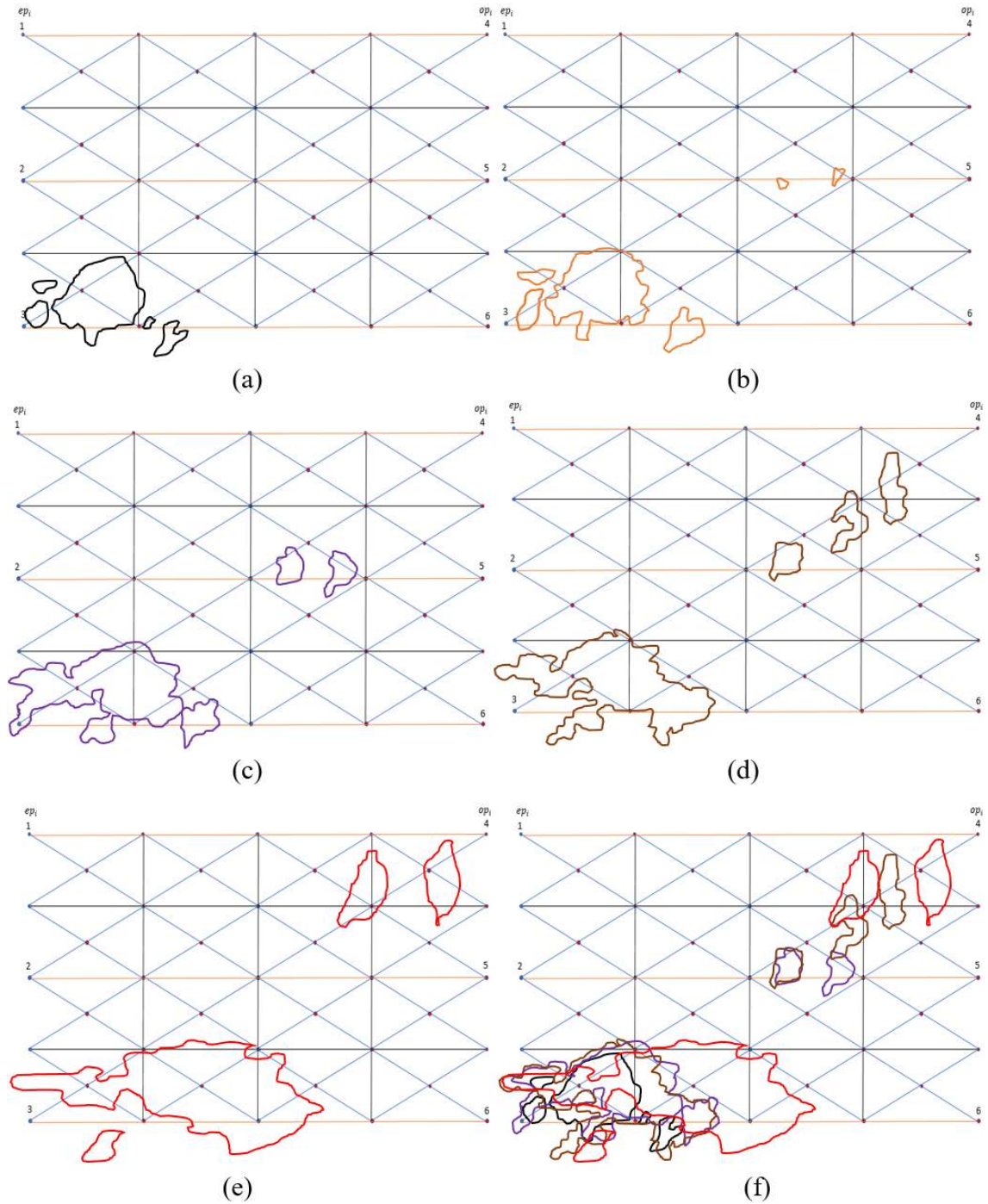
Öncelikli olarak Meteoroloji Genel Müdürlüğünden elde edilen konvektif alanlar incelenerek 5 farklı konvektif alan senaryosu (CB-1, CB-2, CB-3, CB-4, CB-5) Bölüm 5.2’de anlatıldığı gibi belirlenmiştir. Her bir konvektif alan senaryosu için 5 farklı test problemi (TP-1, TP-2, ..., TP-25) üretilmiştir. Bölüm 4.2.2’de verildiği üzere oluşturulan rüzgâr senaryoları tüm konvektif alan senaryoları ve test problemleri için geçerlidir. Test problemlerinin her biri planlama ufuklarından oluşmaktadır. CB-1 ve CB-2 elli dakikalık trafik sürecini kapsayan 5 planlama ufukuna sahiptirler. Bu senaryolar için üretilen test problemleri 30 uçak içermektedir. CB-3, CB-4 ve CB-5 konvektif alan senaryoları bir saatlik trafik sürecini kapsamaktadır ve 6 planlama ufukuna sahiptir. Bu senaryolar için üretilen test problemleri de 36 uçak içermektedir. Üretilen test problemleri planlama ufuklarında farklı alt problemler oluşturmaktadır. Her bir planlama ufku için stokastik model ile ayrı ayrı çözümler üretilmekte ve STC amaç fonksiyonu değerleri hesaplatılmaktadır. Sonrasında VES amaç fonksiyonu değerini hesaplatmak için deterministik ve stokastik modeller tüm planlama ufukları için tekrar koşuturulmaktadır. Böylece 5 farklı konvektif alan senaryosu için geliştirilen deterministik model 140, stokastik model 280 defa olmak üzere toplamda 420 defa modeller koşuturulmuştur. Modeller Python programında modellenerek tüm test problemlerini çözdürmek için Gurobi çözücüsü kullanılmıştır. Tüm çözümler 2.8 GHz Intel Core i7 işlemcili 4 GB bellekli 64-bit bir bilgisayar kullanılarak elde edilmiştir.

Test problemlerinde üretilen parametreler; uçak kategorileri, uçakların hava sahasına tahmini giriş zamanları, hava sahasına giriş noktaları ve hava sahasından çıkış noktalarıdır. Uçak kategori dağılımları %50 orta kategori ve %50 ağır kategoriden oluşmaktadır. Uçak kategorileri ICAO düzenlemelerine göre belirlenmektedir (ICAO, 2016a). İlgili uçuş seviyesindeki (FL350) uçuş hızları uçak kategorilerine göre tanımlanmıştır. Ayrıca kategorilere göre uçuş hızı farklılıklarından dolayı uçaklar arasındaki emniyet ayırma zamanları değiştiği için referans ayırma zamanına göre ayırma düzeltme katsayıları hesaplatılmıştır. Uçakların hava sahasına tahmini giriş zamanları üstel dağılıma uygun olarak rassal olarak oluşturulmuştur. Hava sahasına giriş ve hava

sahasından çıkış noktalarının ataması rassal olarak yapılmıştır. Hava sahasına giriş ve hava sahasından çıkış noktalarının kullanımı eşit olasılığa sahiptir.

CB – 1 sonuçları

Konvektif alan senaryolarından birincisinin hava sahası görünümü Şekil 6.1’de verilmiştir. Bu senaryonun tüm planlama ufuklarında hava sahasına girişler sadece 1 ve 2 numaralı noktalardan yapılmaktadır.



Şekil 6.1. CB-1 senaryosu hava sahası görünümüleri

Şekil 6.1-(a)'daki konvektif alan zamanla büyümeye devam ederek Şekil 6.1-(e)'de verildiği gibi hava sahasının güneyindeki büyük bir alanı kaplar hale gelmiştir. Şekil 6.1-(b)'de görüldüğü üzere yeni alanlar oluşmaya başlamıştır. Sonrasında bu alanlar da büyümeye devam ederek Şekil 6.1-(c) ve (d) görüntülerindeki hali almışlardır. Bu alanlar zamanla kuzeye doğru hareket etmişler ve bir kısmı da birleşmiştir. Bu hareketleri 4 numaralı hava sahası çıkış noktasının uçuşlara kapanmasına neden olmuştur. Konvektif alanlar büyümeye devam ettikçe kullanılabilir hava sahası oldukça küçülmüştür. Zamanla değişimlerini ve yer değiştirmelerini göstermek için konvektif alanlar tek bir görselde birleştirilerek Şekil 6.1-(f)'de verilmiştir.

CB-1 konvektif alan senaryosu için oluşturulan test problemlerinin tüm planlama ufuklarında 3 numaralı noktadan hava sahasına herhangi bir uçak giriş yapmamaktadır. Ayrıca 4 ve 5 numaralı planlama ufuklarında 4 numaralı hava sahası çıkış noktası uçuşlara kapatılarak bu noktadan çıkışların olmadığı veriler üretilmiştir.

İlk konvektif alan senaryosu için oluşturulan test problemlerinin sonuçları Tablo 6.1'de verilmiştir. Tabloda her bir planlama ufukundaki uçak sayısı, stokastik modelin toplam uçuş süresi amaç fonksiyonu değeri (STC), stokastik modelin her bir koşturmadaki çözüm süresi, deterministik modelin amaç fonksiyonu değeri ve stokastik çözüm ile deterministik çözümün amaç fonksiyonları arasındaki farkı gösteren VSS değeri paylaşılmıştır. STC, çözüm süresi, VES ve VSS değerlerinin tamamı saniye cinsindendir.

Tablo 6.1. CB-1 senaryosundaki test problemlerinin sonuçları

Test Problemi	Planlama Ufku	Uçak Sayısı	STC	Çözüm süresi	VES	VSS
TP-1	1	12	11611	89	11754	143
	2	13	13461	134	13497	36
	3	18	18673	60	19066	394
	4	20	18792	246	19142	350
	5	16	16398	526	- *	- **
TP-2	1	6	5871	3	5871	0
	2	11	11657	332	11903	246
	3	17	18709	527	-	-
	4	22	21519	640	-	-
	5	19	16790	256	-	-

Tablo 6.1. (Devam) *CB-1 senaryosundaki test problemlerinin sonuçları*

Test Problemi	Planlama Ufku	Uçak Sayısı	STC	Çözüm süresi	VES	VSS
TP-3	1	12	12847	37	13118	271
	2	13	14880	130	14989	108
	3	16	15038	44	15156	118
	4	19	15892	50	16082	189
	5	13	13306	40	13373	67
TP-4	1	4	2232	2	2232	0
	2	10	11119	138	11205	86
	3	15	17252	495	-	-
	4	18	16243	441	-	-
	5	17	14382	316	-	-
TP-5	1	8	6955	5	6955	0
	2	14	15315	437	-	-
	3	17	18089	274	-	-
	4	20	15383	245	-	-
	5	14	11447	10	11447	0

* Problemin uygulanabilir çözümü yoktur.

** VES amaç fonksiyonu elde edilemediği için VSS hesaplanamamıştır.

Test problemlerinin her birinde farklı planlama ufukları farklı sayıda uçak içermektedir. İlk planlama ufku dışında diğerlerinde hava sahasına dahil olan uçaklar olduğu gibi hava sahasını terk eden uçaklar da olmaktadır. Planlama ufuklarının başlangıç ve bitiş zamanlarına göre hava sahasına dahil olan uçaklar ile modeller koşturulmakta ve çözümler üretilmektedir. Ayrıca uçakların hava sahasına giriş ve çıkış noktaları rassal olarak belirlendiği için bazı uçuşlar daha kısa sürelerde tamamlanırken bazıları daha uzun sürelerde tamamlanmaktadır. Bunda hava sahasına giriş ve çıkış noktaları arasındaki mesafelerin yanında konvektif alanlardan kaçınma, uçaklar arasında çakışmanın olmadığı rotaları belirleme etkili olmaktadır. Aynı zamanda uçuş rotaları belirlenirken minimum uçuş sürelerini elde etmek adına rotalardaki rüzgâr etkileri hesaba katılmaktadır. Rüzgâr etkisi de uçuş sürelerini etkileyen faktörlerden birisidir.

Farklı test problemlerinde ya da aynı test problemleri içerisinde uçak sayısı aynı olmasına rağmen toplam uçuş süreleri arasında önemli farklılıklar bulunmaktadır. Örneğin, TP-3’de planlama ufku-2 ve planlama ufku-5 aynı sayıda uçak içermesine rağmen stokastik modelin amaç fonksiyonu değerleri karşılaştırıldığında 1574 sn. (26,2 dk.) fark bulunmaktadır. Aynı şekilde TP-5’de planlama ufku-2 ve planlama ufku-5 aynı sayıda uçak içermesine rağmen stokastik modelin amaç fonksiyonu değerleri

karşılaştırıldığında 3868 sn. (64,5 dk.) fark bulunmaktadır. Bunun yanında planlama ufuklarındaki uçak sayıları ile toplam uçuş süreleri karşılaştırıldığında uçak sayısı daha fazla olan planlama ufkunda toplam uçuş süresinin daha az olduğu durumlar bulunmaktadır. Örneğin, TP-2’de planlama ufku-3 ve planlama ufku-5; TP-4’de planlama ufku-3, planlama ufku-4 ve planlama ufku-5; TP-5’de planlama ufku-3 ve planlama ufku-4 aralarında kıyaslandığında uçak sayısı artmasına rağmen toplam uçuş süresi daha küçük çıkmıştır. Burada bahsedilen iki durumun temel sebepleri bir önceki paragrafta bahsedilen faktörler ve planlama ufuklarında uçakların uçuşlarına başlangıç noktalarının değişkenlik göstermesidir. Bazı uçaklar önceki planlama ufuklarında uçuşlarının çoğunluğunu tamamlayıp çıkış noktasına daha yakın noktalardan uçuşlarına devam ederken diğer uçaklar hava sahasına yeni girmiş ya da giriş noktasına yakın bir noktadan uçuşuna devam etmektedir.

Tablo 6.1’de verilen sonuçlara göre deterministik model ile elde edilen uçuş rotaları rüzgâr belirsizlikleri altında geçerli olmadığı durumlarda stokastik model ile çözüm elde edilememiş ve VES değeri hesaplanmamıştır. VES değerini hesaplatmak için deterministik model ile elde edilen çözümdeki uçuş rotaları sabitlenerek stokastik model koşturulmaktadır. Deterministik modeldeki uçuş rotalarının tüm rüzgâr senaryoları için geçerli olmaması durumunda stokastik model çözüm üretememektedir. Sabitlenen uçuş rotalarının tüm rüzgâr senaryolarında geçerli olmamasının sebebi, farklı rüzgâr senaryolarında uçakların uçuş rotaları üzerindeki noktalarda bulunma zamanlarının değişmesi ve uçaklar arasında gerekli emniyet ayırmalarının sağlanamamasıdır. Buna göre, deterministik model çözümlerinin rüzgâr etkisi altında geçerli olmadığı ortaya çıkmaktadır. STC modelinin sonuçlarına göre ise test problemlerindeki tüm planlama ufukları için çözümler elde edilmiştir. Bu durum, konvektif alanların etkili olduğu hava sahasında rüzgâr etkisinin hesaba katılmasının ve problemin stokastik olarak ele alınmasının önemini ortaya koymaktadır. VES modeli ile çözüm elde edilen ve VSS değeri hesaplatılan sonuçlara göre dört planlama ufku hariç hepsinde STC modeli ile daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

STC modelinin çözüm sürelerine bakıldığında bir planlama ufku hariç hepsinde 10 dakikanın altında en iyi çözümlere ulaşılabilmektedir. 10 dakikanın aşıldığı planlama ufukundaki çözüm süresinin 40 saniye daha fazla olduğu görülmektedir. Uçak sayısı ile çözüm süreleri arasında bir kıyaslama yapıldığında aralarında direk olarak doğrusal bir ilişki olduğunu söylememiz mümkün değildir. Uçak sayısı ile çözüm süresi arasındaki

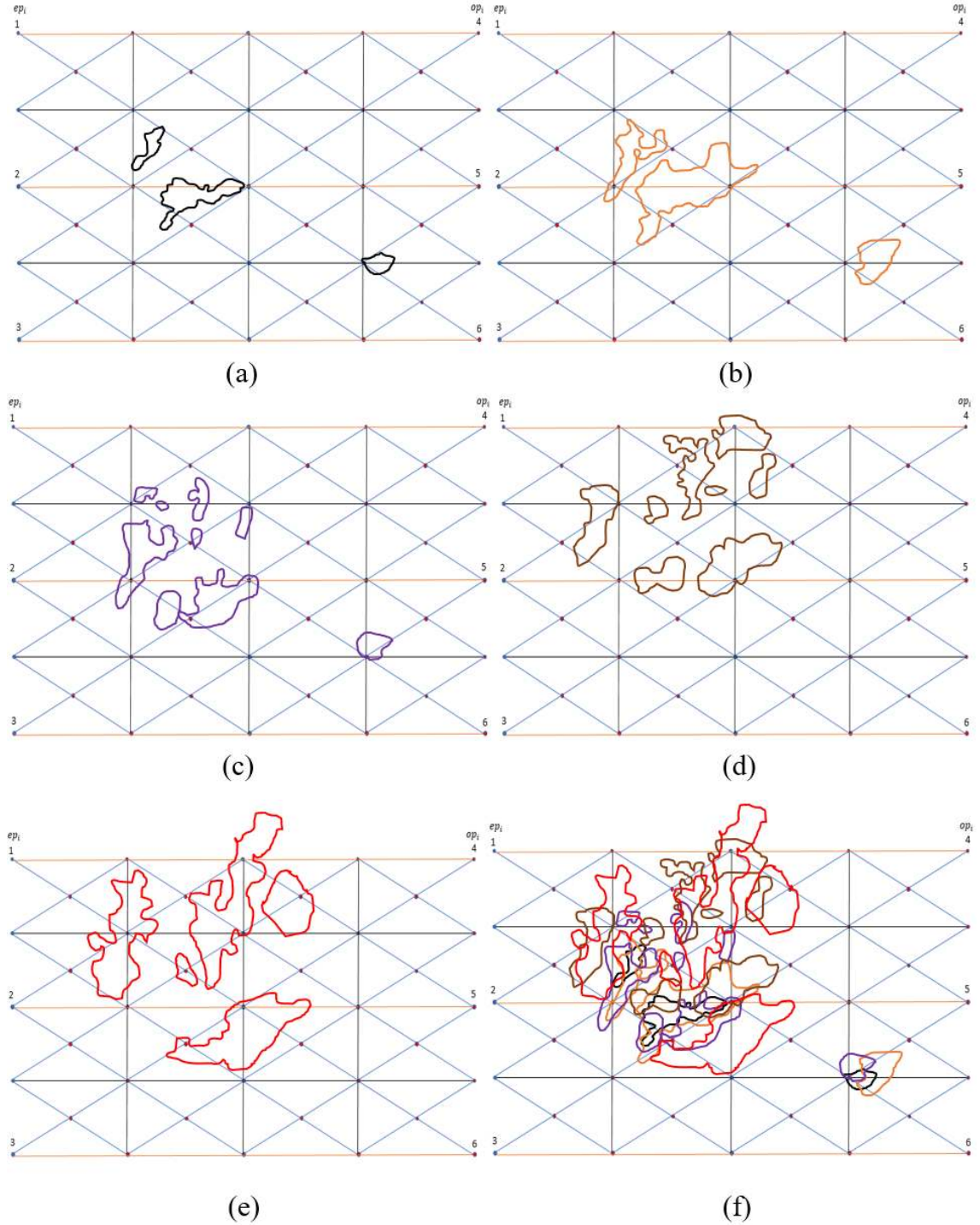
ilişkiyi Kaplan, Çetek ve Saraç (2023) yaptıkları çalışmada incelemişlerdir. Ancak, Tablo 8'deki sonuçlara göre uçak sayısı ile çözüm süresi arasında direk bir ilişki kuramamızın sebebi tüm uçakların hava sahasının 1, 2 ve 3 numaralı noktalarından uçuşlarına başlamaması ve dolayısıyla bazı planlama ufuklarında uçaklar arasındaki çakışma olasılıklarının daha düşük olmasıdır. Önceki planlama ufuklarında bazı uçaklar uçuşlarının belirli kısmını tamamlayarak mevcut planlama ufuklarına ulaşmaktadırlar. Bazıları hava sahasını terk edecekleri noktalara oldukça yaklaşmış olmaktadır. Bu da konvektif alanlardan kaçınmış bu uçakların diğer uçaklarla oluşabilecek potansiyel çakışmalarını oldukça düşürmektedir.

Uçaklar arasındaki potansiyel çakışmaların artması durumunda problemin daha karmaşık hal alması ve en iyi çözümlere ulaşma süresinin artması beklenebilir. Ayrıca uçak sayısındaki artış potansiyel çakışmaların artmasına yol açabilir. Olumsuz hava koşullarının etkili olduğu konvektif alanların büyümesi ve zamanla yer değiştirmesi ile kullanılabilir hava sahası alanı giderek küçülmektedir. Bu da konvektif alanlardan uçakların kaçınabilecekleri alanları sınırlandırmaktadır. Hava sahasının sınırlandırılması ile uçaklar belirli bölgelerde yoğunlaşmaya başlayacak ve arasındaki potansiyel çakışma olasılığında artış meydana gelecektir. Bu potansiyel çakışmaların çözülmesi sınırlı kullanılabilir hava sahası sebebiyle daha karmaşık hal alacaktır. VES model sonuçlarının elde edilemediği planlama ufukları için STC modelinin çözüm sürelerine bakıldığında çoğunluğunda, test problemindeki diğer planlama ufuklarına göre çok daha uzun sürelerde en iyi çözümlere ulaşıldığı görülmektedir. Uçaklar arasındaki potansiyel çakışmaların artması ile problemin daha karmaşık hal alması durumunda VES modeli ile çözüm elde edebilmek daha da zorlaşmıştır. Potansiyel çakışmaların artması durumunda, deterministik model ile elde edilen çözümler belirsizliklerin dikkate alındığı tüm rüzgâr senaryoları için geçerli olmamaktadır. Deterministik model ile oluşturulan rotaların bazılarında rüzgâr etkisi hesaba katıldığında çakışmalar meydana gelmektedir. Sonuç olarak, potansiyel çakışma olasılığı arttıkça VES modeli ile sonuç elde etme olasılığı düşmektedir.

Sıfırdan büyük olarak hesaplanan VSS değerleri 36 ile 394 saniye arasında değişmektedir. Bu değerler ilgili planlama ufkundaki VES modeli toplam uçuş sürelerinin sırasıyla %0,27 ve %2,07 oranlarına karşılık gelmektedir. Uçuş süresindeki 394 saniyelik kazanç değeri tek bir uçuş seviyesinde 120x120 nm² genişliğindeki bir hava sahası içerisinde 18 uçak için elde edildiği unutulmamalıdır.

CB – 2 sonuçları

İkinci senaryoda konvektif alanlar zamanla büyümekte ve hareket etmektedir. Şekil 6.2-(d) ve (e)'de görüldüğü üzere yalnızca 6 numaralı çıkış noktasına yakın olan alan yok olmaktadır. Bu alanın yok olması ile 1 numaralı giriş noktasından 6 numaralı çıkış noktasına yapılan uçuşlar daha kısa yoldan gerçekleşebilirler.



Şekil 6.2. CB-2 senaryosu hava sahası görünimleri

Şekil 6.2-(d)'den itibaren konvektif alanların kuzeye doğru hareket etmesi ve büyümesiyle 1 numaralı noktadan hava sahasına giriş yapacak uçaklar için kullanılabilir hava sahası kalmamıştır. Bu sebeple oluşturulan test problemlerinde 4 ve 5 numaralı planlama ufuklarında 1 numaralı noktadan hava sahasına uçak girişi olmamaktadır. Konvektif alanlar yalnızca kuzeye doğru değil aynı zamanda güneye doğru da büyümeye ve hareket etmeye devam etmişlerdir. Bu sebeple kullanılabilir hava sahası oldukça sınırlanmıştır. CB-2 senaryosu için konvektif alanların zamanla değişimleri ve yer değiştirmeleri Şekil 6.2-(f)'de gösterilmiştir.

CB-2 için oluşturulan test problemlerinin çözüm sonuçları Tablo 6.2'da paylaşılmıştır. Tabloda da görüldüğü üzere VES model sonuçları yaklaşık olarak yarısında elde edilebilmiştir. Kullanılabilir hava sahasının oldukça sınırlı olduğu planlama ufku-4 ve planlama ufku-5 için tek bir test problemi (TP-4) dışında VES sonucuna ulaşılamamıştır. VES değeri elde edilemeyen planlama ufukları için VSS değeri hesaplanamamıştır. Hesaplanan VSS değerlerinden 4 tanesi hariç hepsinde sıfırdan büyük değer elde edilmesi STC modelinin daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir. Bu durum, çalışma kapsamında ele alınan problem için belirsizliklerin hesaba katmanın ve problemi stokastik olarak ele almanın önemini ortaya koymaktadır. VSS değerinin sıfır olarak elde edilmesi deterministik ve stokastik modeller tarafından üretilen uçuş sürelerinin aynı olduğunu göstermektedir.

VSS değerinin sıfır olarak elde edildiği planlama ufukları için STC modeli ile çözüm elde etme sürelerine bakıldığında hepsinin bir dakikanın altında oldukça kısa süreler olduğu görülmektedir. Ayrıca bu planlama ufuklarında TP-4 planlama ufku-4 haricinde uçak sayısı daha azdır. Kullanılabilir hava sahasının daha büyük olduğu planlama ufuklarında az sayıda uçağın olması potansiyel çakışma olasılıklarını da düşürmektedir. TP-4 için kullanılabilir hava sahasının daha küçük olduğu planlama ufkunda diğer test problemlerinden farklı olarak VES değerinin hesaplanması ve daha fazla uçak olmasına rağmen VSS değerinin sıfır elde edilmesi durumları ile karşılaşılmıştır. Bu durum uçakların uçuşlarının çoğunluğunu önceki planlama ufuklarında tamamlaması ve potansiyel çakışma olasılığının azalması ile ilişkilidir.

Sıfırdan büyük olarak hesaplanan VSS değerleri 50 ile 285 saniye arasında değişmektedir. Bu değerler ilgili planlama ufkundaki VES modeli toplam uçuş sürelerinin sırasıyla %0,41 ve %2,07 oranlarına karşılık gelmektedir.

Tablo 6.2. CB-2 senaryosundaki test problemlerinin sonuçları

Test Problemi	Planlama Ufku	Uçak Sayısı	STC	Çözüm süresi	VES	VSS
TP-6	1	9	9573	10	9573	0
	2	15	16710	143	16966	255
	3	18	20430	370	- *	- **
	4	21	23390	201	-	-
	5	17	18386	337	-	-
TP-7	1	10	12336	12	12386	50
	2	19	21841	295	21989	148
	3	18	19861	392	-	-
	4	20	22989	274	-	-
	5	18	18177	255	-	-
TP-8	1	7	9929	27	9988	58
	2	11	14592	42	14592	0
	3	17	19257	536	19504	247
	4	24	28693	634	-	-
	5	20	24082	634	-	-
TP-9	1	7	7189	4	7189	0
	2	9	11374	15	11508	133
	3	15	17641	277	17905	264
	4	20	22910	72	22910	0
	5	20	25717	555	-	-
TP-10	1	11	14916	143	15073	156
	2	13	14185	59	14378	193
	3	16	13522	27	13808	285
	4	18	22900	516	-	-
	5	17	24696	486	-	-

* Problemin uygulanabilir çözümü yoktur.

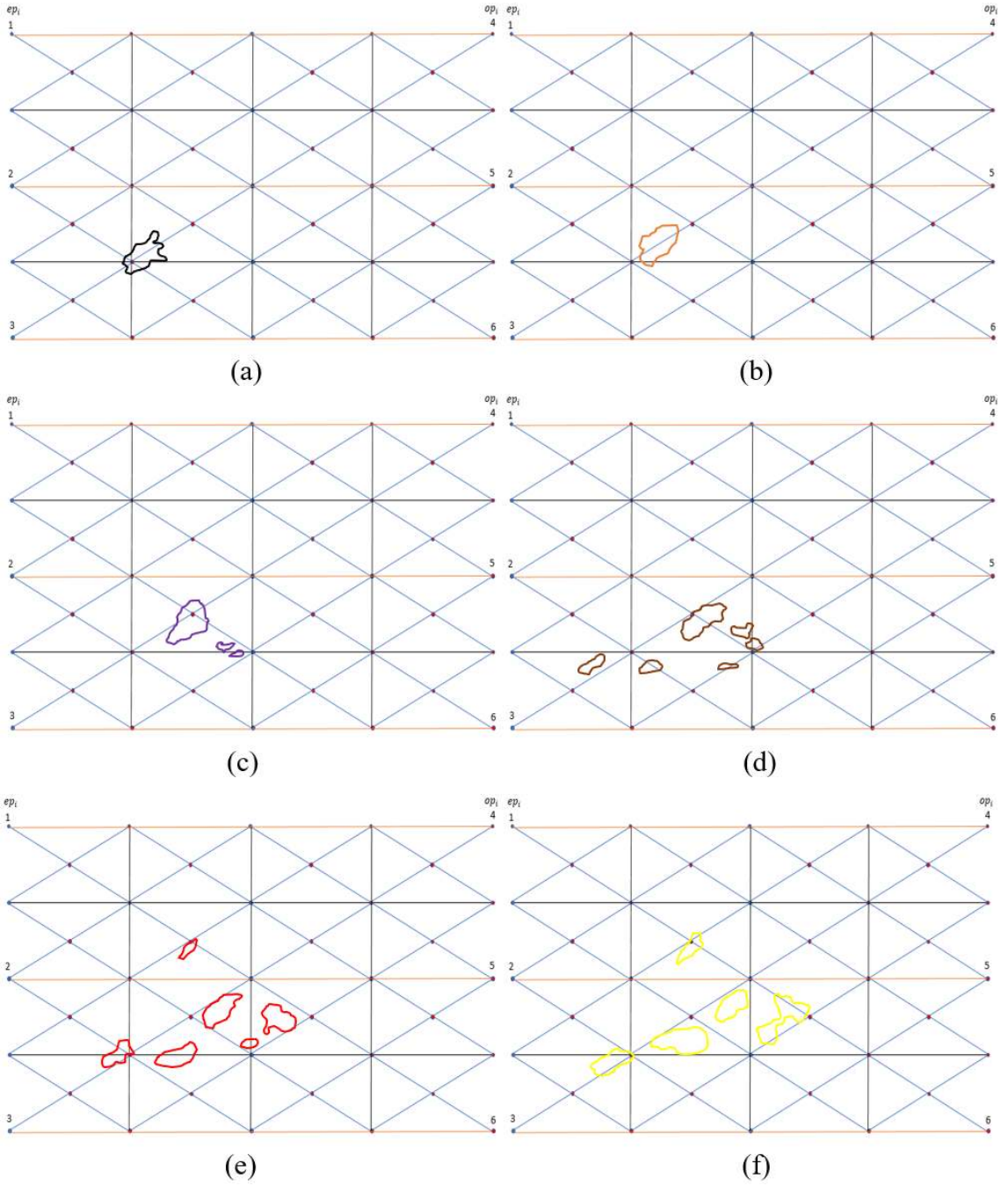
** VES amaç fonksiyonu elde edilemediği için VSS hesaplanamamıştır.

STC çözüm sürelerine bakıldığında TP-3'deki planlama ufku-4 ve planlama ufku-5 haricinde tüm planlama ufuklarında 10 dakikanın altındaki sürelerde en iyi çözümlere ulaşılmıştır. Bu iki planlama ufuklarındaki çözüm süresi 10 dakikayı 34 saniye aşmıştır. Kullanılabilir hava sahasının azalması durumlarında çözüm sürelerinde artış olduğu görülmektedir.

CB – 3 sonuçları

CB – 3 senaryosunda konvektif alanların hava sahasındaki görünimleri Şekil 6.3'de verilmiştir. Başlangıçta küçük bir alanda etkili olan konvektif alanlar zamanla büyümeye

devam etmişlerdir. Şekil 6.3-(a)'daki alan zaman ilerledikçe neredeyse aynı büyüklükte olsa da doğuya doğru hareket etmiştir. Ayrıca Şekil 6.3-(c)'de verildiği gibi hemen yakınında yeni alanlar oluşmaya başlamış ve zamanla daha geniş bir alanı kaplamışlardır. Konvektif alanlar büyüdükçe kullanılabilir hava sahası daha sınırlı hale gelmiştir. İlk iki senaryodan farklı olarak CB – 3 ve sonraki senaryolarda test problemleri 6 planlama ufkundan oluşarak bir saatlik süreci kapsamaktadır.



Şekil 6.3. CB-3 senaryosu hava sahası görünümleri

CB – 3 senaryosundaki test problemlerinin sonuçları Tablo 6.3’de paylaşılmıştır. Tabloya göre deterministik model ile elde edilen uçuş rotaları rüzgâr belirsizlikleri altında uygulandığında planlama ufuklarının %40’ında çözüm elde edilememiştir. Deterministik model ile elde edilen uçuş rotalarının belirsizlik koşullarında geçersiz olması ATCO tarafından uçuş rotalarının yeniden belirlenmesini gerektirir.

Tablo 6.3. CB-3 senaryosundaki test problemlerinin sonuçları

Test Problemi	Planlama Ufku	Uçak Sayısı	STC	Çözüm süresi	VES	VSS
TP-11	1	9	11611	13	11855	244
	2	15	15537	106	15705	168
	3	17	14541	25	14541	0
	4	20	17765	307	- *	- **
	5	19	19339	341	-	-
	6	17	16753	433	-	-
TP-12	1	10	11597	10	11839	242
	2	9	9963	11	10171	208
	3	14	16043	205	-	-
	4	14	14564	28	14564	0
	5	18	18479	210	-	-
	6	22	20439	530	-	-
TP-13	1	9	11065	44	11196	131
	2	16	16726	185	17024	299
	3	17	16312	448	-	-
	4	15	16060	503	-	-
	5	19	21675	114	22128	453
	6	19	17719	56	17842	123
TP-14	1	8	10022	12	10089	67
	2	12	12515	106	12824	309
	3	15	14351	351	14549	198
	4	15	15432	75	15706	274
	5	19	18994	547	-	-
	6	21	21947	639	-	-
TP-15	1	5	7274	13	7356	82
	2	13	15410	435	-	-
	3	18	16970	598	17355	385
	4	19	14846	27	14846	0
	5	19	19198	348	19595	397
	6	20	18821	310	-	-

* Problemin uygulanabilir çözümü yoktur.

** VES amaç fonksiyonu elde edilemediği için VSS hesaplanamamıştır.

Çözümlerin uygulanabilir olmamasının sebebi çakışma önleme kısıtlarının sağlanamamasıdır. STC model sonuçlarına göre tüm planlama ufuklarında çözüm elde edilmiştir. VES modeli ile sonuç elde edilen planlama ufukları için VSS değerlerinin bazıları sıfır olarak hesaplanmıştır. Bu STC ve VES model sonuçlarına göre toplam uçuş sürelerinin eşit çıktığını göstermektedir. VSS değeri sıfır olan planlama ufukları için STC modelinin çözüm sürelerine bakıldığında oldukça kısa süreler olduğu görülmektedir.

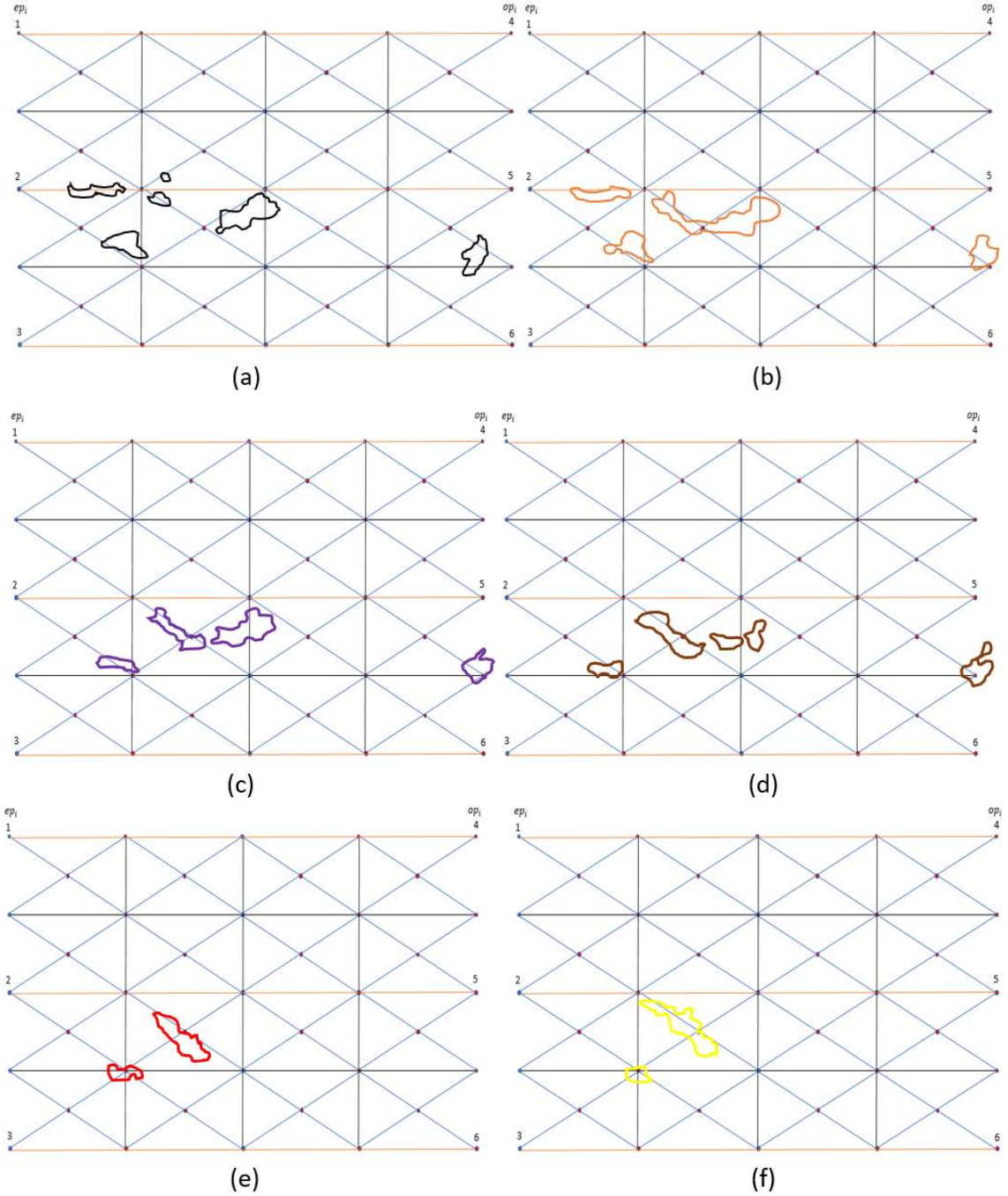
Sıfırdan büyük olarak hesaplanan VSS değerleri 67 ile 453 saniye arasında değişmektedir. Bu değerler ilgili planlama ufukundaki VES modeli toplam uçuş sürelerinin sırasıyla %0,66 ve %2,05 oranlarına karşılık gelmektedir. STC modeli çözüm sürelerine baktığımızda bir tanesi hariç tamamının 10 dakikanın altında olduğu görülmektedir.

CB – 4 sonuçları

Konvektif alan senaryolarından dördüncüsü olan CB – 4’de önceki senaryolardan farklı olarak alanların zamanla büyümesi yerine küçülmesi ve yok olması durumları ile karşılaşmıştır. Şekil 6.4-(a) ve (b)’de görüldüğü üzere 2 numaralı hava sahasına giriş noktasından uçakların operasyonlarını gerçekleştirmeleri mümkün değildir. Bu sebeple test problemlerindeki planlama ufku-1 ve planlama ufku-2’de 1 ve 3 numaralı noktalardan hava sahasına uçaklar girmektedir. Planlama ufku-3’den itibaren üç noktadan hava sahasına girişler başlamıştır. Ancak, 2 numaralı giriş noktasından 5 ve 6 numaralı çıkış noktalarına gidecek olan uçakların kuzeye doğru saparak uçuş rotalarını uzatmaları gerekmektedir. Bu durumda konvektif alanlardan kaçınmak isteyen uçakların hava sahasının kuzeyinde yoğunlaşması beklenir.

Tablo 6.4’de verilen CB – 4 senaryosuna ait test problemlerinin sonuçları incelendiğinde %72’sinde VSS değeri hesaplanabilmiştir. Hesaplanan VSS değerlerinden üç tanesi TP-4 test probleminde sıfır olmuştur. Buradaki planlama ufuklarında STC çözüm sürelerine bakıldığında oldukça düşük olduğu görülmektedir.

Planlama ufuklarındaki uçak sayısı hava sahasına giren ve hava sahasını terk eden uçaklar nedeniyle azalarak ya da artarak değişkenlik göstermektedir. Daha önce de belirtildiği gibi her bir planlama ufukundaki uçak sayıları ile toplam uçuş süreleri arasında doğrusal bir ilişki kurulamamaktadır. Uçak sayısı aynı ya da daha fazla olan planlama ufuklarında daha düşük uçuş süreleri görülebilmektedir. Bunun sebebi önceki planlama ufuklarında uçakların uçuş rotalarının belirli bir kısmını tamamlamış olmalarıdır.



Şekil 6.4. *CB-4 senaryosu hava sahası görünümüleri*

Uçak sayısı ile modelin en iyi çözümlere ulaşma süreleri arasındaki ilişki için de benzer durum söz konusudur. Çözüm sürelerinin potansiyel çakışma olasılıklarının artması ile artması beklenir. Çözüm süreleri incelendiğinde üç tanesi hariç tüm planlama ufuklarında 10 dakikanın altında en iyi çözümlere ulaşmak mümkün olmuştur. Bu üç planlama ufukundaki modelin çözüm süreleri 14, 17 ve 62 saniye kadar 10 dakikadan daha fazla sürmüştür.

Tablo 6.4. CB-4 senaryosundaki test problemlerinin sonuçları

Test Problemi	Planlama Ufku	Uçak Sayısı	STC	Çözüm süresi	VES	VSS
TP-16	1	6	9568	35	9761	193
	2	12	15954	329	16140	185
	3	16	16342	172	16706	364
	4	21	18233	362	18805	572
	5	19	16719	121	17038	319
	6	20	17991	662	- *	- **
TP-17	1	8	12182	14	12352	170
	2	14	17421	293	-	-
	3	18	19153	614	-	-
	4	22	20901	489	-	-
	5	19	19879	472	20394	515
	6	20	17514	521	-	-
TP-18	1	6	9612	28	9663	51
	2	10	12414	130	12589	175
	3	16	16700	134	17013	313
	4	20	21286	359	21804	518
	5	19	16999	325	17427	428
	6	19	17923	343	18244	321
TP-19	1	9	11841	6	11841	0
	2	15	15236	17	15236	0
	3	14	10852	13	10852	0
	4	16	15128	244	15560	432
	5	15	14375	152	14675	301
	6	21	23391	301	-	-
TP-20	1	7	11135	26	11233	97
	2	11	14859	347	-	-
	3	19	19516	540	-	-
	4	21	22751	426	-	-
	5	20	18434	155	19010	576
	6	19	17546	617	-	-

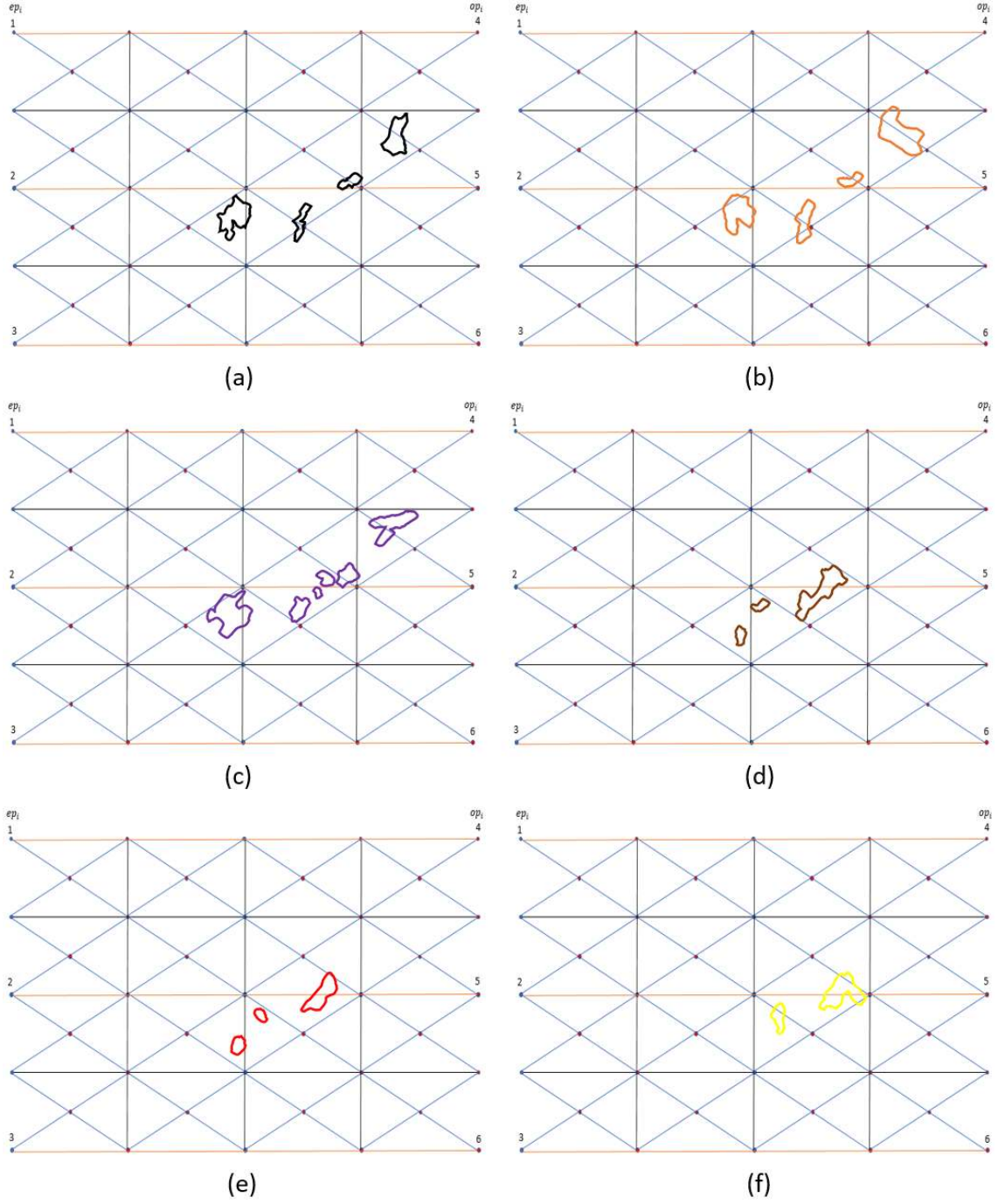
* Problemin uygulanabilir çözümü yoktur.

** VES amaç fonksiyonu elde edilemediği için VSS hesaplanamamıştır.

Sıfırdan büyük olarak hesaplanan VSS değerleri 51 ile 576 saniye arasında değişmektedir. Bu değerler ilgili planlama ufkundaki VES modeli toplam uçuş sürelerinin sırasıyla %0,53 ve %3,13 oranlarına karşılık gelmektedir. Uçuş süresindeki toplam kazancı gösteren bu oranlar düşük olarak görülebilir. Ancak bu kazançların 6 ve 20 uçak için tek bir uçuş seviyesinde elde edildiğini göz önünde bulundurmak gerekir.

CB – 5 sonuçları

Bir diğer konvektif alan senaryosu olan CB – 5 için alanların zamanla görünüşleri Şekil 6.5’de verilmiştir. Konvektif alanların zamanla küçüldüğü ve yok olduğu bir senaryo olduğunu söylenebilir.



Şekil 6.5. CB-5 senaryosu hava sahası görünüşleri

Başlangıçta 1 numaralı giriş noktasından 5 numaralı çıkış noktasına ulaşmak isteyen uçaklar hava sahasının güneyinden dolaşmaları gerekirken Şekil 6.5-(d)'den itibaren kuzeydoğudaki uçuş rotalarının açılması ile daha kısa mesafelerle uçuşlarını tamamlamalarının önü açılmıştır. Hava sahasındaki diğer alanlarında zamanla küçülmesi ve yok olması kullanılabilir hava sahası alanının artmasını sağlamıştır.

CB – 5 için üretilen test problemlerinin sonuçları Tablo 6.5’de paylaşılmıştır. Tablodaki sonuçlara göre %80 oranında VSS değeri hesaplanabilmiştir.

Tablo 6.5. CB-5 senaryosundaki test problemlerinin sonuçları

Test Problemi	Planlama Ufku	Uçak Sayısı	STC	Çözüm süresi	VES	VSS
TP-21	1	12	15353	127	15727	374
	2	18	19545	485	- *	- **
	3	19	20419	184	20804	385
	4	20	17621	52	18070	450
	5	14	13078	13	13078	0
	6	12	9993	10	9993	0
TP-22	1	9	13772	30	13772	0
	2	15	20532	623	-	-
	3	15	16471	18	16471	0
	4	20	19224	295	19518	295
	5	19	18580	91	19107	527
	6	19	17757	265	18212	455
TP-23	1	9	14442	63	14786	344
	2	15	21183	425	-	-
	3	15	16395	13	16395	0
	4	20	18852	96	19239	387
	5	19	18505	403	-	-
	6	18	17109	61	17109	0
TP-24	1	12	16071	19	16467	397
	2	19	20204	534	-	-
	3	19	19997	456	-	-
	4	19	17169	49	17455	285
	5	15	12978	15	12978	0
	6	12	9818	12	9818	0
TP-25	1	6	8942	4	8942	0
	2	10	11885	25	12049	164
	3	16	18016	30	18016	0
	4	20	21344	102	21911	567
	5	18	17597	348	17687	90
	6	20	18053	580	18471	418

* Problemin uygulanabilir çözümü yoktur.

** VES amaç fonksiyonu elde edilemediği için VSS hesaplanamamıştır.

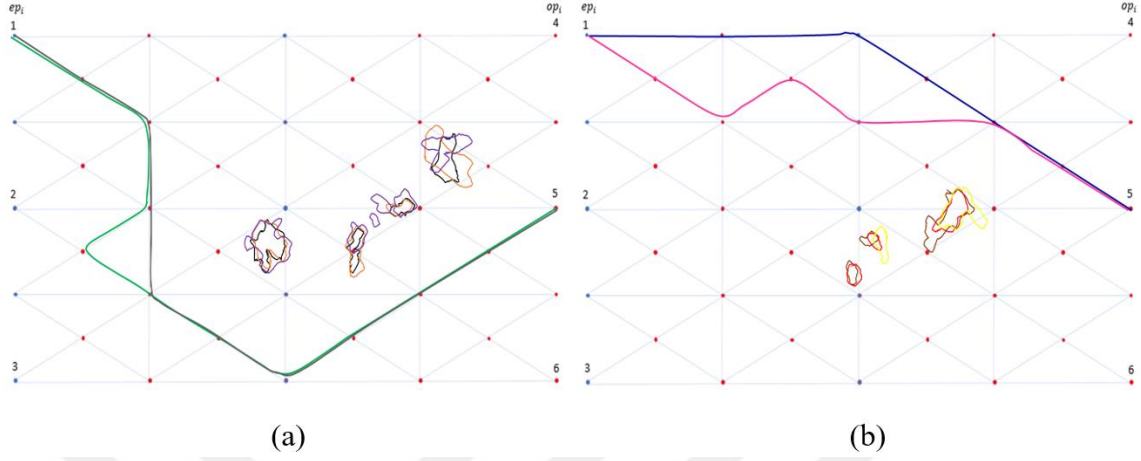
Hesaplanan VSS değerlerinin %35'i sıfır olarak elde edilmiştir. Bu durumdaki planlama ufuklarının STC model ile en iyi çözümlerine kısa sürelerde ulaşılmıştır. Sıfır olan değerlerin yarısının da planlama ufku-5 ve planlama ufku-6'da olduğu görülmektedir. Sıfırdan büyük olarak hesaplanan VSS değerleri 90 ile 567 saniye arasında değişmektedir. Bu değerler ilgili planlama ufkundaki VES modeli toplam uçuş sürelerinin sırasıyla %0,51 ve %2,66 oranlarına karşılık gelmektedir.

Uçuş rotalarının değerlendirilmesi

Model tarafından üretilen uçuş rotalarının değerlendirilmesi amacıyla CB-5 senaryosundaki TP-1 problemi örnek olarak seçilmiştir. Bu test probleminde planlama ufuklarına göre uçuş rotalarındaki değişimler incelenmiştir. Farklı hava sahasına giriş ve hava sahasından çıkış noktaları arasında üretilen uçuş rotaları Şekil 6.6 – Şekil 6.9'da paylaşılmıştır. Şekillerde verilen rotalar bir ya da birden fazla uçak için uçuş rotalarını temsil etmektedir.

Şekil 6.6'da 1 numaralı giriş noktasından 5 numaralı çıkış noktasına uçan uçakların uçuş rotaları paylaşılmıştır. Şekil 6.6-(a) planlama ufku-1, planlama ufku-2 ve planlama ufku-3'deki uçuş rotalarını; Şekil 6.6-(b) planlama ufku-4, planlama ufku-5 ve planlama ufku-6'daki uçuş rotalarını göstermektedir. İlk üç planlama ufkundaki gri çizgi giriş ve çıkış noktaları arasında minimum uçuş süresiyle uçulabilecek uçuş rotasını temsil etmektedir. Yeşil renkle gösterilen rotaya baktığımızda sapma meydana geldiğini görmekteyiz. Uçuşların çakışmasız bir şekilde gerçekleşmesi amacıyla bu sapma gerçekleşmiştir. Planlama ufku-4'den itibaren hava sahasının kuzeydoğusundaki konvektif alanların yok olması ile 1 numaralı girişten 5 numaralı çıkış noktasına uçuş rotaları da değişmiştir. Öncesinde hava sahasının güneyinden dolaşarak uçuşlar için daha uzun bir rota gerekirken planlama ufku-4'den itibaren daha kısa uçuş rotası ile hava sahasının kuzeyinden uçuşların gerçekleşmiştir. Burada mavi ve pembe olmak üzere iki farklı uçuş rotası ile karşılaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak incelendiğinde planlama ufku-3'de elde edilen çözümlerde bir uçağın gri renkli rotada uçuşu planlanmıştır. Planlama ufku-4'e geçildiğinde bu uçak hava sahasına giriş noktasına yakın noktadan uçuşuna başlamıştır. Konvektif alanların yok olması ile uçuşuna pembe renkli rotada verildiği gibi devam etmiştir. Pembe renkli rotada kuzeye doğru bir sapma

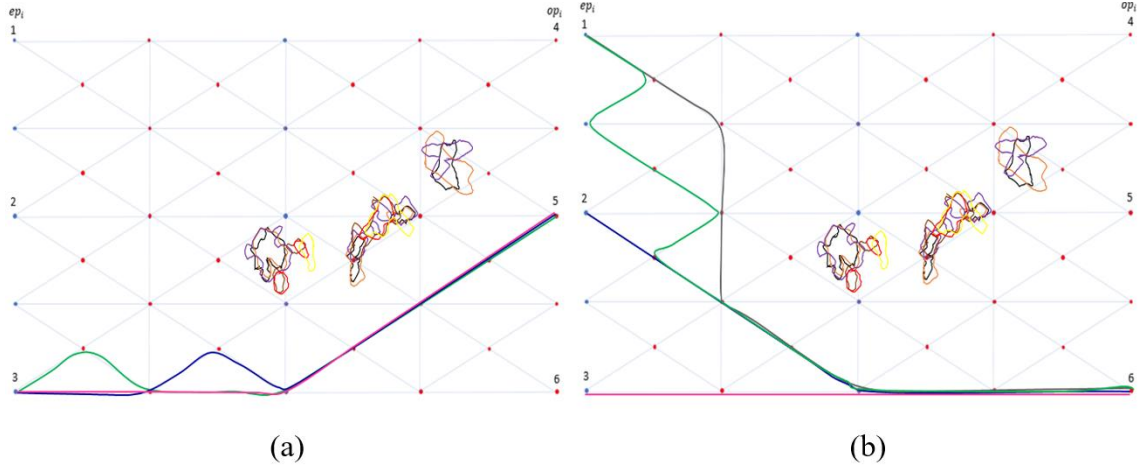
gerçekleşmiştir. Bu durum uçaklar arasındaki çakışmaların çözümlenmesi için uygulanan bir manevrayı göstermektedir.



Şekil 6.6. CB-5 senaryosu uçuş rotaları-1

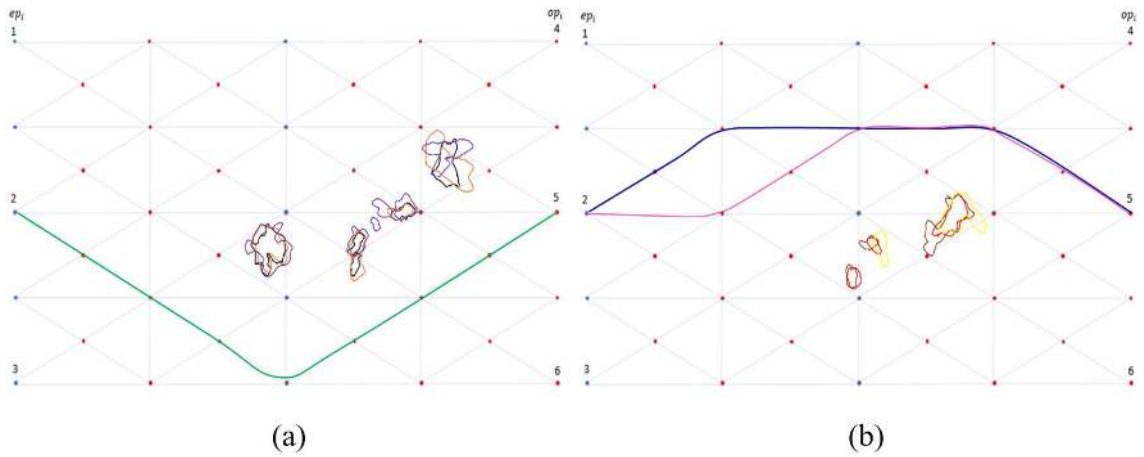
Şekil 6.7-(a)'da 3 numaralı giriş noktasından 5 numaralı çıkış noktasına gerçekleşen uçuşların rotaları verilmiştir. Görselde yeşil, mavi ve pembe renkli üç farklı uçuş rotası görülmektedir. Pembe renkli uçuş rotası minimum rotayı temsil etmektedir. Mavi ve yeşil renkli uçuş rotalarında sapmalar olmuştur. Yeşil olanda hava sahasına uçak girdikten hemen sonra saparken, mavi olanda daha sonrasında bir sapma gerçekleşmiştir.

Şekil 6.7-(b)'de 1,2 ve 3 numaralı giriş noktalarından 6 numaralı çıkış noktasına model tarafından belirlenen uçuş rotaları paylaşılmıştır. İncelenen test problemi için 2 ve 3 numaralı noktalardan hava sahasında giren uçaklar görseldeki verildiği gibi mümkün olan en kısa rota ile uçuşlarını gerçekleştirmişlerdir. Ancak bir numaralı noktadan giriş yapan bir uçağın yeşil renkli rotayı izlediği görülmüştür. En kısa rotayı temsil eden gri renkli rotaya göre bazı sapmalar olmuştur. Uçak 2 numaralı giriş noktasına doğru sapma gerçekleştirmemiştir. Ele alınan problemde uçakların hava sahasına giriş zamanları arasındaki fark gerekli emniyet ayırmalarını sağlamaktadır. Bu sebeple giriş noktalarının diğer uçaklar tarafından kullanılmasına izin verilmemiştir.



Şekil 6.7. CB-5 senaryosu uçuş rotaları-2

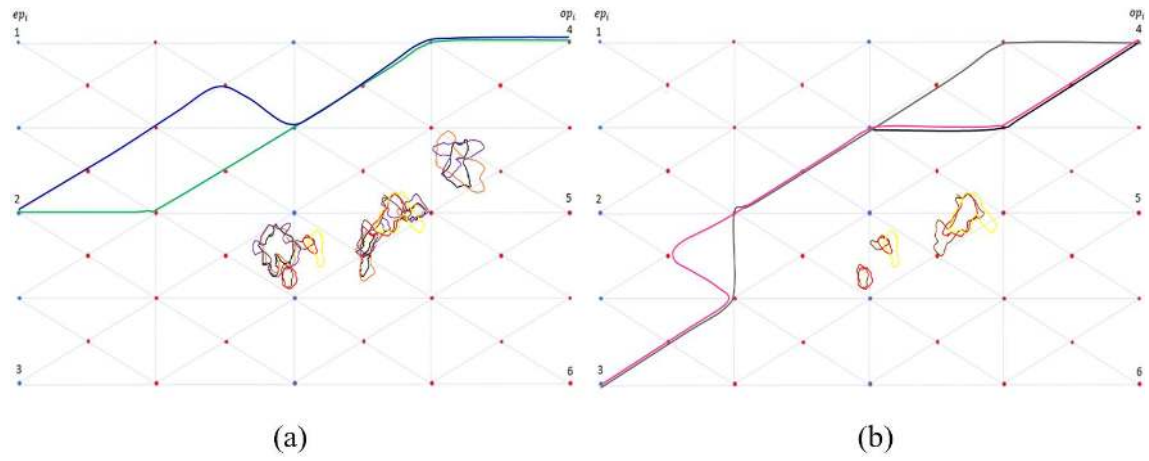
Şekil 6.8’de 2 numaralı giriş noktasından 5 numaralı çıkış noktasına giden uçakların uçuş rotaları paylaşılmıştır. Şekil 6.8-(a)’da görüldüğü üzere ilk üç planlama ufkunda uçaklar hava sahasının güneyinden uçuşlarını gerçekleştirmişlerdir. Planlama ufku-4’den itibaren konvektif alanların yok olması ile hava sahasının kuzeyine yönelmişlerdir. Şekil 6.8-(b)’de pembe ve mavi renkle gösterilen bu rotaların uçuş süreleri birbirine eşittir. Ancak uçaklar arasında çakışmalar dolayı farklı uçuş rotaları ortaya çıkmıştır. Böylece bazı durumlarda uçaklar arasındaki çakışmaların çözümlendiği aynı uçuş süresine sahip farklı uçuş rotaları model tarafından üretilmiştir.



Şekil 6.8. CB-5 senaryosu uçuş rotaları-3

Şekil 6.9’da 2 ve 3 numaralı giriş noktalarından 4 numaralı çıkış noktasına gerçekleşen uçuşların rotaları paylaşılmıştır. Şekil 6.9-(a)’da görüldüğü üzere 2 numaralı noktadan hava sahasına giren uçaklar için farklı rotalar üretilmiştir. 3 numaralı girişten 4

numaralı çıkışa gidişler için üretilen rotalar incelendiğinde gri renkli olanın en kısa rotayı temsil ettiği görülmektedir. Model tarafından üretilen sonuçlar incelendiğinde tüm planlama ufuklarında bu rota ile karşılaşılmıştır. Ancak planlama ufku-4 ve sonrasında pembe ve siyah renkli rotalar görülmüştür. Bazı uçakların uçuş rotaları planlama ufku-3'e kadar gri rota şeklinde oluşturulduktan sonra planlama ufku-4'den itibaren pembe ve siyah olarak devam etmiştir. Gri rotadan pembe rotaya geçiş uçuşun belirli kısmından sonra gerçekleşmiştir. Görselde giriş ve çıkış noktaları arasında tam bir rota olarak verilmesi tüm uçuşları temsil etmek içindir. Planlama ufku-4 ve sonrasında rotaların değişmesinde konvektif alanlardaki değişimlerin etkisi vardır.



Şekil 6.9. CB-5 senaryosu uçuş rotaları-4

7. TARTIŞMA VE SONUÇ

Olumsuz hava koşullarının etkili olduğu konvektif alanlar içeren bir hava sahasında uçakların bu alanlardan kaçınması ve uçaklar arasındaki potansiyel çakışmaların çözülmesi için çalışma kapsamında deterministik ve stokastik modeller önerilmiştir. Modeller tarafından emniyetli uçuş rotaları üretilmektedir. Stokastik modelde rüzgâr belirsizlikleri hesaba katılarak farklı rüzgâr senaryoları için geçerli uçuş rotaları elde edilmektedir. Ayrıca konvektif alanların zamanla büyüüp küçülmeleri ve yer değiştirmelerini göz önünde bulundurarak kayan planlama ufku yaklaşımı uygulanmıştır. Modelleri test etmek amacıyla 5 farklı konvektif alan senaryosu oluşturulmuştur. Bu senaryoların her biri için 5 farklı test problemi rassal olarak üretilmiştir. Kayan ufuk yaklaşımı gereği tüm test problemleri alt problemler olarak tanımlayabileceğimiz planlama ufuklarından oluşmaktadır. 25 farklı test problemi ile test edilen modeller toplamda 420 defa koşturulmuştur. 50 dakikalık süreç için 30, bir saatlik süreç için 36 uçak içeren test problemleri için elde edilen sonuçlar deterministik model amaç fonksiyonu değerini, stokastik model amaç fonksiyonu değerini, çözüm sürelerini, her bir planlama ufukunda üretilen uçuş rotalarını içermektedir. Stokastik model ile tüm planlama ufukları için en iyi çözümler elde edilmiştir. Ancak, bazı planlama ufuklarında deterministik model ile üretilen çözümlerin belirsizlikler altında geçerli olmaması nedeniyle VES model sonuçları elde edilememiştir. Deterministik modeldeki uçuş rotalarının tüm rüzgâr senaryoları için geçerli olmaması durumunda stokastik model çözüm üretememektedir. Sabitlenen uçuş rotalarının tüm rüzgâr senaryolarında geçerli olmamasının sebebi, farklı rüzgâr yönü ve hızı senaryolarında uçakların uçuş rotaları üzerindeki noktalarda bulunma zamanlarının değiştiği için uçaklar arasında gerekli emniyet ayırmalarının sağlanamamasıdır. Buna göre, deterministik model çözümlerinin rüzgâr etkisi altında geçerli olmadığı ortaya çıkmaktadır. Bu durum, belirsizliklerin dahil edilerek problemin stokastik bir süreç olarak ele alınmasının zarureti ortaya koymaktadır.

Problemi stokastik olarak ele almanın sağladığı kazancı görmek amacıyla VSS değeri hesaplatılmıştır. VSS değeri STC modeli amaç fonksiyonu değeri ile VES modeli amaç fonksiyonu arasındaki farktır. Bu durumda VES modeli ile çözüm elde edilebilen planlama ufukları için VSS değeri hesaplanmıştır. VES modeli çözüm elde edilemeyen planlama ufuklarında genel olarak STC modeli ile çözüm elde etme sürelerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Uçaklar arasındaki potansiyel çakışma olasılıklarının artması

durumunda problemin daha karmaşık hal alması ve çözüm sürelerinin artması beklenir. Ayrıca, konvektif alanlardan dolayı kullanılabilir hava sahası alanının sınırlanması ile uçaklar belirli bölgelerde yoğunlaşmaya başlayacak ve arasındaki potansiyel çakışma olasılığında artış meydana gelecektir. Uçaklar arasındaki potansiyel çakışmaların artması ile problemin daha karmaşık hal alması durumunda VES modeli ile çözüm elde edebilmek daha da zorlaşmıştır. Bunun yanında bazı planlama ufuklarında VSS değeri sıfır olarak hesaplanmıştır. Deterministik model ile stokastik model tarafından uçuş rotaları için toplam uçuş sürelerinin birbirine eşit olduğunu göstermektedir. VSS değerinin sıfır olarak hesaplandığı planlama ufukları için STC modeli çözüm sürelerinin genel olarak düşük olduğu görülmüştür.

Sıfırdan büyük VSS değerleri için toplam uçuş süresinde elde edilen kazanç değerleri incelendiğinde 576 saniyeye kadar çıktığı görülmüştür. Bu değer VES modeli tarafından hesaplanan toplam uçuş süresine göre %3,13'lük bir kazançta denk gelmektedir. Ancak, bu kazanç değeri tek bir uçuş seviyesinde belirli hava sahası sınırları içerisinde uçan 20 uçak için elde edilmiştir. Bu 20 uçak için operasyonların bir saatlik olduğu kabulü yapılması durumunda yıllık bazda toplam 1400 saate kadar kazanç elde edilebilir sonucu çıkmaktadır. Aynı hava sahası içerisinde birden fazla uçuş seviyesinin dikkate alınması durumunda elde edilen kazancın boyutu daha da anlaşılır olacaktır.

Konvektif alan senaryoları birbirinden farklı özellikler göstermektedir. Bazılarında konvektif alanlar zamanla büyümeye bazılarında ise küçülmeye devam etmiştir. Bu durum kullanılabilir hava sahasının zamanla azalmasına ya da artmasına yol açmıştır. Kullanılabilir hava sahasının artması çakışmaları çözümlmek için alternatif rotaların artmasını ve daha kısa uçuş rotaları ile uçuşların gerçekleşmesini sağlamıştır. Birbirini izleyen planlama ufuklarında konvektif alanların büyümesi ya da küçülmesi ve yer değiştirmesi her bir planlama ufukunda planlanan uçuş rotalarında değişikliklerin meydana gelmesini yol açmıştır. Bu durum bazı uçakların uçuş rotalarının zamanla daha kısa hale gelerek uçuş sürelerinin azalmasını sağlarken bazıları için uçuş rotalarının daha uzun hale gelerek uçuş sürelerinin artmasına sebep olmuştur. Ayrıca, konvektif alanlardaki değişimlerden dolayı kullanılabilir hava sahası alanlarının değişmesi uçuşların yoğunlaştığı bölgeleri de etkilemiştir.

Literatürdeki olumsuz hava koşullarından uçakların kaçındırılması problemi üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Ulaşılabilen çalışmalar incelendiğinde çoğunluğunun tek uçak için kaçınma rotaları ürettiği görülmüştür. Tek uçak için yapılan

Çalışmalarda ya konvektif alan yapıları ya da rüzgâr etkileri dikkate alınmıştır. Sadece Hentzen vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada her ikisi de hesaba katılmıştır. Problemin özümü için bir çalışmada bir MILP model önerilmiştir. Diğerlerinde özüm yöntemi olarak çeşitli algoritmalar sunulmuştur. Birden fazla uçak için yapılan çalışmalarda rüzgâr etkisi dikkate alınmamıştır ve çeşitli algoritmalar ile özümmler elde edilmiştir. Ancak, yapılan bu tez çalışması kapsamında olumsuz hava koşullarının etkili olduğu hava sahasındaki hem konvektif alanlar hem de rüzgâr belirsizlikleri hesaba katılmıştır. Konvektif alanların olduğu bir hava sahasındaki rüzgâr hızları çalışma kapsamında üretilen rüzgâr senaryolarında da görüldüğü üzere yüksek hızlara çıkabilmektedir. Bu da uçuş sürelerine önemli ölçüde etki etmektedir. Ayrıca, çalışmada deterministik model ile elde edilen özümmlerin tüm rüzgâr belirsizlikleri dikkate alındığında geçerli olmadığı görülmüştür. Bu da rüzgâr belirsizliklerinin hesaba katılmasının önemini ortaya koymuştur.

Bu alışma kapsamında toplam uçuş süresinin enküçüklenmesi amaç fonksiyonu olarak alınmıştır. Çalışmanın ilerleyen aşamalarında farklı amaç fonksiyonları ve kısıtların hesaba katıldığı matematiksel modeller sunulabilir. Ayrıca, hava sahasındaki daha farklı belirsizlikler dikkate alınabilir. Uçaklar arasındaki çakışmalar hava sahası kesikleştirme tekniği kullanılarak belirli noktalarda kontrol edilmiş ve özümmlenmiştir. Gelecek çalışmalarda daha farklı vektör manevraları ya da hız değiştirme manevrası kullanılarak çakışmaların özümmlenmesi sağlanabilir.

KAYNAKÇA

- Airbus (2016). *Optimum use of weather radar*. France.
- Allen, J. T. (2018). Climate Change and Severe Thunderstorms. *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*, Oxford University Press.
doi: 10.1093/acrefore/9780190228620.013.62.
- Alonso-Ayuso, A., Escudero, L.F. ve Martín-Campo, F.J. (2011). Collision avoidance in air traffic management: A mixed-integer linear optimization approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(1), 47-57.
doi: 10.1109/TITS.2010.2061971.
- Alonso-Ayuso, A., Escudero, L.F. ve Martín-Campo, F.J. (2012). A mixed 0-1 nonlinear optimization model and algorithmic approach for the collision avoidance in ATM: Velocity changes through a time horizon. *Computers & Operations Research*, 39(12), 3136-3146. doi: 10.1016/j.cor.2012.03.015.
- Alonso-Ayuso, A., Escudero, L.F. ve Martín-Campo, F.J. (2014). Exact and approximate solving of the aircraft collision resolution problem via turn changes. *Transportation Science*, 50(1), 263-274. doi: 10.1287/trsc.2014.0557.
- Alonso-Ayuso, A., Escudero, L.F. ve Martín-Campo, F.J. (2016). An exact multi-objective mixed integer nonlinear optimization approach for aircraft conflict resolution. *TOP*, 24(2), 381-408. doi: 10.1007/s11750-015-0402-z.
- Alonso-Ayuso, A., Escudero, L.F., Olaso, P., Pizarro, C. (2011). Conflict avoidance: 0-1 linear models for conflict detection & resolution. *TOP*, 21(3), 485-504.
doi: 10.1007/s11750-011-0224-6.
- Birge, J.R. ve Louveaux, F. (2011). *Introduction to Stochastic Programming*, Second Edition. Springer. Erişim adresi: <http://www.springer.com/series/3182>
- Brooks, H. E. (2013). Severe thunderstorms and climate change. *Atmospheric Research*, 123, 129-138. doi: 10.1016/j.atmosres.2012.04.002.
- Cafieri, S. ve Durand, N. (2014). Aircraft deconfliction with speed regulation: New models from mixed-integer optimization. *Journal of Global Optimization*, 58(4), 613-629. doi: 10.1007/s10898-013-0070-1.
- Cafieri, S. ve Omheni, R. (2017). Mixed-integer nonlinear programming for aircraft conflict avoidance by sequentially applying velocity and heading angle changes. *European Journal of Operational Research*, 260(1), 283-290.
doi: 10.1016/j.ejor.2016.12.010.
- Cafieri, S. ve Rey, D. (2017). Maximizing the number of conflict-free aircraft using mixed-integer nonlinear programming. *Computers & Operations Research*, 80, 147-158. doi: 10.1016/j.cor.2016.12.002.
- Çeçen, R.K. ve Çetek, C. (2017). En-Route Airspace Capacity and Traffic Flow Enhancement using Genetic Algorithms. *Anadolu University Journal of Science and Technology A- Applied Sciences and Engineering*, 18(1), 39-58.
doi: 10.18038/aubtda.300431.

- Çeçen, R.K. ve Çetek, C. (2019). A Two-Step Approach for Airborne Delay Minimization Using Pretactical Conflict Resolution in Free-Route Airspace. *Journal of Advanced Transportation*, 2019. doi: 10.1155/2019/4805613.
- Çeçen, R.K. ve Çetek, C. (2020). Conflict-free en-route operations with horizontal resolution manoeuvres using a heuristic algorithm. *Aeronautical Journal*, 124(1275), 767-785. doi: 10.1017/aer.2020.5.
- Çeçen, R.K., Saraç, T. ve Çetek, C. (2021). Meta-heuristic algorithm for aircraft pre-tactical conflict resolution with altitude and heading angle change maneuvers. *TOP*, 29(3), 629-647. doi: 10.1007/s11750-020-00585-8.
- Christodoulou, M. ve Costoulakis, C. (2004). Nonlinear mixed integer programming for aircraft collision avoidance in free flight. *Proceedings of the Mediterranean Electrotechnical Conference - MELECON*, 1, 327-330. doi: 10.1109/MELCON.2004.1346858.
- Clarke, J.P.B., Solak, S., Chang, Y.H., Ren, L., Vela, A.E. (2009). Air traffic flow management in the presence of uncertainty. *Proceedings of the 8th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar* içinde (ss. 571-580).
- Clarke, J.P.B., Solak, S., Chang, Y.H., Ren, L., Vela, A.E. (2009). Air Traffic Flow Management in the Presence of Uncertainty. *Proceedings of the 8th USA/Europe Air Traffic Seminar (ATM'09)*.
- De Neufville, R. ve Odoni, A.R. (2013). *Airport systems: planning design, and management*. McGraw-Hill.
- De Schutter, B. ve Van Den Boom, T. (2001). Model predictive control for max-plus-linear discrete event systems. *Automatica*, 37(7), 1049-1056.
- Delaura, R. ve Evans, J. (2006). An Exploratory Study of Modeling En Route Pilot Convective Storm Flight Deviation Behavior. *12th Conference on Aviation Range and Aerospace Meteorology*, Atlanta, GA: American Meteorological Society.
- Delaura, R., Robinson, M., Pawlak M., Evans, J. (2008). Modeling convective weather avoidance in enroute airspace. *13th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, New Orleans, LA.
- Ertem, M., Özçelik, F. ve Saraç, T. (2021). Stokastik İlişkisiz Paralel Makine Çizelgeleme Problemi için bir Matematiksel Model. *European Journal of Science and Technology*. doi: 10.31590/ejosat.1017475.
- Erzberger, H. ve Heere, K. (2010). Algorithm and operational concept for resolving short-range conflicts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 224(2), 225-243. doi: 10.1243/09544100JAERO546.
- Erzberger, H., Lauderdale, T.A. ve Chu, Y.C. (2012). Automated conflict resolution, arrival management, and weather avoidance for air traffic management. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of aerospace engineering*, 226(8), 930-949. doi: 10.1177/0954410011417347.
- EUROCONTROL (2023a). Aviation's summer impacted by the weather. Erişim adresi: <https://www.eurocontrol.int/press-release/aviations-summer-impacted-weather>

- EUROCONTROL (2023b). Making operations more predictable during adverse weather. Erişim adresi: <https://www.eurocontrol.int/news/making-operations-more-predictable-during-adverse-weather>
- Federal Aviation Administration (2013). Advisory Circular - Thunderstorms - AC 00-24C. Erişim adresi: http://www.faa.gov/regulations_policies/advisory_circulars/.
- Franco, A., Rivas, D. ve Valenzuela, A. (2018). Optimal aircraft path planning in a structured airspace using ensemble weather forecasts. *SESAR Innovation Days*.
- Franco, A., Valenzuela, A., Rivas, D., Sacher, D., Lang, J., Hauf, T. (2020). A Probabilistic Storm Avoidance Concept for En-Route Flight. *10th SESAR Innovation Days*.
- Furini, F., Persiani, C.A. ve Toth, P. (2012). Aircraft Sequencing Problems via a Rolling Horizon Algorithm. *Combinatorial Optimization: Second International Symposium, ISCO* içinde (ss. 273-284). Berlin Heidelberg: Springer, Nis. 2012.
- González-Arribas, D., Hentzen, D., Sanjurjo-Rivo, M., Soler, M., Kamgarpour, M. (2017). Optimal aircraft trajectory planning in the presence of stochastic convective weather cells. *17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*. doi: 10.2514/6.2017-3431.
- Haberlie, A.M., Ashley, W.S., Battisto, C.M., Gensini, V.A. (2022). Thunderstorm Activity Under Intermediate and Extreme Climate Change Scenarios. *Geophysical Research Letters*, 49(14). doi: 10.1029/2022GL098779.
- Hauf, T., Sakiew, L. ve Sauer, M. (2013). Adverse weather diversion model DIVMET. *Journal of Aerospace Operations*, 2(3-4), 115-133. doi: 10.3233/aop-130037.
- Hentzen, D., Kamgarpour, M., Soler, M., González-Arribas, D. (2018). On maximizing safety in stochastic aircraft trajectory planning with uncertain thunderstorm development. *Aerospace Science and Technology*, 79, 543-553. doi: 10.1016/j.ast.2018.06.006.
- Hong, Y., Choi, B., Oh, G., Lee, K., Kim, Y. (2017). Nonlinear Conflict Resolution and Flow Management Using Particle Swarm Optimization. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(12), 3378-3387. doi: 10.1109/TITS.2017.2684824.
- Hu, X. B. ve Chen, W. H. (2005). Genetic algorithm based on receding horizon control for arrival sequencing and scheduling. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 18(5), 633-642. doi: 10.1016/j.engappai.2004.11.012.
- Hu, X. B. ve Di Paolo, E. (2008). Binary-representation-based genetic algorithm for aircraft arrival sequencing and scheduling. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 9(2), 301-310. doi: 10.1109/TITS.2008.922884.
- Hupe, P., Hauf, T. ve Rokitansky, C.H. (2014). Case Study of Adverse Weather Avoidance Modelling. *Fourth SESAR Innovation Days*. Madrid, Spain.
- ICAO (2016a). Information regarding adverse weather. *Doc 4444 - Air Traffic Management Procedures for Air Navigation Services* içinde (s. 8-14).

- ICAO (2016b). Weather deviation procedures. *Doc 4444 - Air Traffic Management Procedures for Air Navigation Services* içinde (s. 15-7, 15-8).
- Iowa State University (2023). Iowa Environmental Mesonet. Erişim adresi: https://mesonet.agron.iastate.edu/request/download.phtml?network=TR__ASOS#
- Kamgarpour, M., Dadok, V. ve Tomlin, C. (2010). Trajectory generation for aircraft subject to dynamic weather uncertainty. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control* içinde (ss. 2063-2068). doi: 10.1109/CDC.2010.5717889.
- Kaplan, Z., Çetek, C. ve Saraç, T. (2023). A mixed-integer linear programming model for conflict resolution using airspace discretization technique in a generic free route airspace. *Journal of Polytechnic*. doi: 10.2339/politeknik.1293137.
- Krozel, J. (2010). Survey of weather impact models used in air traffic management. *10th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference 2010, ATIO 2010*, 1, 1-24. doi: 10.2514/6.2010-9020.
- Lieder, A. ve Stolletz, R. (2016). Scheduling aircraft take-offs and landings on interdependent and heterogeneous runways. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 88, 167-188. doi: 10.1016/j.tre.2016.01.015.
- Lieder, A., Briskorn, D. ve Stolletz, R. (2015). A dynamic programming approach for the aircraft landing problem with aircraft classes. *European Journal of Operational Research*, 243(1), 61-69. doi: 10.1016/j.ejor.2014.11.027.
- Lindner, M., Rosenow, J., Zeh, T., Fricke, H. (2020). In-flight aircraft trajectory optimization within corridors defined by ensemble weather forecasts. *Aerospace*, 7(10), 1-18. doi: 10.3390/aerospace7100144.
- Liu, W. ve Hwang, I. (2014). Probabilistic aircraft midair conflict resolution using stochastic optimal control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(1), 37-46. doi: 10.1109/TITS.2013.2274999.
- Matthews, M.P. ve Delaura, R. (2010a). Evaluation of enroute convective weather avoidance models based on planned and observed flights. *14th American Meteorological Society Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, New Orleans, LA: AMS.
- Matthews, M.P. ve Delaura, R. (2010b). Assessment and interpretation of en route weather avoidance fields from the Convective Weather Avoidance Model. *10th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference*. doi: 10.2514/6.2010-9160.
- McNally, D., Sheth, K., Gong, C., Sahlman, S., Hinton, S., Lee, C., vd. (2015). Dynamic weather routes: Two years of operational testing at American airlines. *Proceedings of the 11th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, EUROCONTROL*. doi: 10.2514/atcq.23.1.55.
- Meteomanz.com (2023). Weather data SYNOPS/BUFR - GFS/ECMWF forecast. Erişim adresi: <http://meteomanz.com/index?l=1>
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü (2023a). Meteorolojik Veri Bilgi Satış ve Sunum Sistemi (MEVBİS). Erişim adresi: <https://mevbis.mgm.gov.tr/mevbis/ui/index.html#/Workspace>

- Meteoroloji Genel Müdürlüğü (2023b). Radar Meteorolojisi. Erişim adresi: <https://www.mgm.gov.tr/genel/meteorolojiradarlari.aspx?s=hedefler>
- Omer, J. (2015). A space-discretized mixed-integer linear model for air-conflict resolution with speed and heading maneuvers. *Computers & Operations Research*, 58, 75-86. doi: 10.1016/j.cor.2014.12.012.
- Pallottino, L., Feron, E.M. ve Bicchi, A. (2002). Conflict Resolution Problems for Air Traffic Management Systems Solved with Mixed Integer Programming. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 3(1), 3-11. doi: 10.1109/6979.994791.
- Pang, Y., Zhao, X., Yan, H., Liu, Y. (2021). Data-driven trajectory prediction with weather uncertainties: A Bayesian deep learning approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 130. doi: 10.1016/j.trc.2021.103326.
- Pannequin, J.J., Bayen, A.M., Mitchell, I.M., Chung, H., Sastry, S. (2007). Multiple Aircraft Deconflicted Path Planning with Weather Avoidance Constraints. *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*. South Carolina: AIAA.
- Raupach, T.H., Martius, O., Allen, J.T., Kunz, M., Lasher-Trapp, S., Mohr, S., Rasmussen, K.L., Trapp, R.J., Zhang, Q. (2021). The effects of climate change on hailstorms. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(3), 213-226. doi: 10.1038/s43017-020-00133-9.
- Rubnich, M. ve Delaura, R. (2010). An Algorithm to Identify Robust Convective Weather Avoidance Polygons in En Route Airspace. *10th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference* içinde (s. 9164), Fort Worth, Texas.
- Samà, M., D'Ariano, A. ve Pacciarelli, D. (2013). Rolling Horizon Approach for Aircraft Scheduling in the Terminal Control Area of Busy Airports. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 80, 531-552. doi: 10.1016/j.sbspro.2013.05.029.
- Sauer, M., Hauf, T., Sakiew, L., Chan, P.W., Tse, S.M., Hupe, P. (2016). On the identification of weather avoidance routes in the terminal maneuvering area of Hong Kong International Airport. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 17(3), 171-185. doi: 10.1631/jzus.A1500186.
- Sauer, M., Sakiew, L., Hauf, T., Hupe, P. (2013). Some applications of the adverse weather diversion model DIVMET. *16th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*. Austin. Erişim adresi: <https://www.researchgate.net/publication/305584981>
- Schilke, C. ve Hecker, P. (2014). Dynamic route optimization based on adverse weather data. *SIDs 2014 - Proceedings of the SESAR Innovation Days*.
- Seenivasan, D.B., Olivares, A. ve 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. doi: 10.1016/j.trc.2019.11.014.

- SESAR (2023). SESAR Joint Undertaking | A new dawn for weather-resilient air traffic management. Erişim adresi: <https://www.sesarju.eu/news/new-dawn-weather-resilient-air-traffic-management0>
- Sharman, R.D. ve Williams, J. K. (2009). The complexities of thunderstorm avoidance due to turbulence and implications for traffic flow management. *AMS aviation, range and aerospace meteorology special symposium on weather-air traffic management integration*.
- Sheth, K., Amis, T., Gutierrez-Nolasco, S., Sridhar, B., Mulfinger, D. (2013). Development of a probabilistic convective weather forecast threshold parameter for flight-routing decisions. *Weather Forecast*, 28(5), 1175-1187. doi: 10.1175/WAF-D-12-00052.1.
- Summers, S., Kamgarpour, M., Tomlin, C., Lygeros, J. (2011). A stochastic reach-avoid problem with random obstacles. *HSCC'11 - Proceedings of the 2011 ACM/SIGBED Hybrid Systems: Computation and Control*, 251-260. doi: 10.1145/1967701.1967738.
- Taylor, C., Liu, S., Wanke, C., Stewart, T. (2018). Generating diverse reroutes for tactical constraint avoidance. *Journal of Air Transportation*, 26(2), 49-59. doi: 10.2514/1.D0089.
- Trier, S.B. ve Sharman, R. D. (2009). Convection-Permitting Simulations of the Environment Supporting Widespread Turbulence within the Upper-Level Outflow of a Mesoscale Convective System. *Monthly Weather Review*, 137(6), 1972-1990. doi: 10.1175/2008MWR2770.1.
- Van Den Boom, T. ve De Schutter, B. (2002). Properties of MPC for Max-Plus-Linear Systems. *European Journal of Control*, 8(5), 453-462.
- Vela, A., Solak, S., Singhose, W., Clarke, J.P. (2009). A mixed integer program for flight-level assignment and speed control for conflict resolution. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control* içinde (ss. 5219-5226). doi: 10.1109/CDC.2009.5400520.
- Vela, A.E., Solak, S., Clarke, J.P.B., Singhose, W.E., Barnes, E.R., Johnson, E.L. (2010). Near real-time fuel-optimal en route conflict resolution. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 11(4), 826-837. doi: 10.1109/TITS.2010.2051028.
- Weatherdata (2023). University of Wyoming College of Engineering. Erişim adresi: <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
- Xie, Z. ve Zhong, Z. W. (2016). Aircraft Path Planning under Adverse Weather Conditions. *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences. doi: 10.1051/(2016).

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0000-0001-8555-4579

Adı Soyadı : Zekeriya KAPLAN

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- Doktora (2024), Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Enstitüsü, Hava Trafik Kontrolü Anabilim Dalı
- Yüksek Lisans (2019), Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hava Trafik Kontrol Anabilim Dalı
- Lisans (2015), Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
- 2022 (devam ediyor), Araştırma Görevlisi, Samsun Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Hava Trafik Kontrol Bölümü
- 2018, Araştırma Görevlisi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzak Bilimleri Fakültesi, Hava Trafik Kontrol Bölümü
- 2016, Araştırma Görevlisi, Anadolu Üniversitesi, Havacılık ve Uzak Bilimleri Fakültesi, Hava Trafik Kontrol Bölümü
- 2016, Araştırma Görevlisi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Hava Trafik Kontrol Bölümü

Görev Aldığı Projeler:

- 2020, (Araştırmacı). Development of Common ATC Simulation Training Assessment Criteria Based on Future Pan -European Single Star Targets (ATCOSIMA), AB Erasmus+, <http://atcosima.org>

Yayınları ve/veya Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

- Kaplan, Z. (2019). Toplam Yakıt Tüketiminin Enküçüklenmesi ve Pist Kapasitesinin En Etkin Şekilde Kullanımı İçin Bir Yaklaşma Sıralama Modeli, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/221580>

- Kaplan, Z., Çetek, C., & Saraç, T., (2023). Jenerik Serbest Rotalı Hava Sahasında Kesikleştirme Tekniği Kullanılarak Çakışmaların Çözümleme Problemi için Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama Modeli. Politeknik Dergisi.
- Kaplan, Z., Tutumlu, B., & Tükenmez, İ., (2023). Scheduling of Air Traffic Controllers in Turkey: A Two-Step Solution Approach Using Goal Programming. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 11(2), 439-454. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1228166>
- Kaplan, Z., Çetek, C., & Saraç, T., (2023). A multi-objective nonlinear integer programming model for mixed runway operations within the TMAs. The Aeronautical Journal, 1-31. <https://doi.org/10.1017/aer.2023.50>
- Donmez, K., Kaplan, Z., Aybek Cetek, F., Rogošić, T., Juričić, B., Francetić, I., (2022). Service Quality and Efficiency-Oriented Training Design in Air Traffic Management. Transportation Research Procedia, 64, 345-355. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.09.038>
- T Rogošić, T., Juričić, B., Aybek Çetek, F., Kaplan, Z., (2021). ATCO radar training assessment and flight efficiency: the correlation between trainees' scores and fuel consumption in real-time simulations. The Aeronautical Journal, 125(1287), 949-965. <https://doi.org/10.1017/aer.2020.142>
- Kaplan, Z., & Çetek, C., (2020). Yapay bağışıklık metasezgiseli ile tek pistli havaalanlarında iniş sıralamasının eniyilenmesi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 28 (3), 321-331. <https://doi.org/10.31796/ogummf.721672>