



## UÇAKLARIN ÇAKIŞMA ÖNLEYİCİ MANEVRALARI SONRASI YAKIT TÜKETİMİNİ ENAZLAYACAK ŞEKİLDE YÖRÜNGEYE GERİ DÖNMELERİNİ SAĞLAYACAK KARAR DESTEK SİSTEMİ ÖNERİSİ

Elifnur AKTÜRK<sup>1</sup>, Beyza ALDANMAZ<sup>2</sup>, Şevin TUĞCU<sup>3</sup>, Müjgan SAĞIR<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup> Eskisehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

ORCID No : <http://orcid.org/0009-0002-8111-0676>

<sup>2</sup> Eskisehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

ORCID No : <http://orcid.org/0009-0002-9633-6416>

<sup>3</sup> Eskisehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

ORCID No : <http://orcid.org/0009-0006-1193-2120>

<sup>4</sup> Eskisehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-2781-658X>

### Anahtar Kelimeler

### Öz

Çakışma Önleme,  
Sürdürülebilir  
Havacılık,  
Optimizasyon,  
Metasezgisel  
Algoritma,  
Karar Destek Sistemi

Hava Trafik Kontrolörleri, hava sahasındaki uçakların konum ve hız bilgilerine göre gerekli durumlarda pilotlara irtifa, uçuş açısı, hız değişikliği gibi talimatlar verebilmektedir. Bu talimatlar, hava sahası güvenliğinin sağlanmasında önemli rol oynarken literatürde de birçok çalışmanın odak noktası olmuştur. Ancak çakışma önleyici bu değişikliklerin ardından uçakların kendi yörüngelerine dönüş süreci, ayrı bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu alandaki çalışmalar ise sınırlı sayıda kalmıştır. Öte yandan havayolu taşımacılığı sektöründe yakıt maliyetleri, toplam operasyonel giderlerin en büyük kalemlerinden birini oluşturmaktadır. Bununla birlikte, yakıt tüketiminin azaltılması yalnızca ekonomik

\*Sorumlu yazar; e-posta : [msagir@ogu.edu.tr](mailto:msagir@ogu.edu.tr)

doi : <https://doi.org/10.46465/endustrimuhendisligi.1789091>

*fayda sağlamakla kalmayıp aynı zamanda karbon salınımını düşürmek ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemlidir.*

*Bu çalışma, uçuş esnasında çakışmaları önlemek amacıyla verilen yön, irtifa ya da hız değişiklikleri komutları sonrası uçağın kendi orijinal rotasına dönüşü için gerçekleştirilmesi gereken manevraların türünü ve zamanlamasını hem uçuş performansını artıracak hem de yakıt tüketimini azaltacak şekilde belirleyecek bir yaklaşım önermektedir. Ayrıca dönüş sürecindeki yakıt maliyeti, önceden verilen çakışma önleyici manevralarla doğrudan ilişkilidir.*

*Bu çalışmada çakışma önleyici faaliyetler sonrası rotaya dönüş senaryolarını optimize edecek bir matematiksel model geliştirilmiş ve Python programlama diliyle, hava trafik kontrolörüne yardımcı olacak kullanıcı dostu bir bilgi sistemi tasarlanmıştır. ESCAPE uçuş simülöründe yapılan çalışmalarla elde edilen sonuçlar; hız, irtifa, yön komutları gibi değişkenleri girdi, yakıt tüketimini ise bağımlı değişken olarak yakıt tüketimi ve karbon emisyonu açısından analiz edilmiştir. Bu çalışma ayrıca, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları'ndan biri olan "Erişilebilir ve Temiz Enerji" hedefi doğrultusunda yüksek enerji tüketimli hava araçlarında yakıt tasarrufu sağlama potansiyeline katkı sunmaktadır. Özgün değer ve yaygın etki açısından çalışmamızın katkısı sonuçlar bölümünde özetlenmiştir.*

## OPTIMIZING FUEL-EFFICIENT TRAJECTORY RECOVERY AFTER AIRCRAFT CONFLICT-AVOIDANCE MANEUVERS: A DECISION SUPPORT APPROACH

### Keywords

*Conflict Avoidance, Sustainable Aviation, Optimization, Metaheuristic Algorithm, Decision Support System*

### Abstract

*Air Traffic Controllers can issue commands such as altitude changes, heading adjustments, or speed modifications to pilots based on the position and velocity of aircraft in the airspace. While these instructions play a crucial role in maintaining airspace safety and have been the focus of numerous studies in the literature, the process of aircraft returning to their original trajectories after conflict-avoidance maneuvers emerges as a distinct and less explored problem.*

*On the other hand, fuel costs constitute one of the largest components of total operational expenses in the aviation industry. Reducing fuel consumption not only offers economic benefits but also contributes significantly to lowering carbon emissions and promoting environmental sustainability.*

*This study proposes an approach to determine the type and timing of maneuvers required for an aircraft to return to its original route after conflict-avoidance commands involving changes in heading, altitude, or speed. The objective is to enhance flight performance while minimizing fuel consumption. Additionally, the fuel cost incurred during the*

*return phase is directly influenced by the initial conflict-avoidance maneuvers.*

*In this study, a mathematical model was developed to optimize return-to-route scenarios following conflict-avoidance actions. A user-friendly decision support system was also designed using the Python programming language to assist air traffic controllers. Simulations conducted using the ESCAPE flight simulator analyzed fuel consumption and carbon emissions by taking variables such as speed, altitude, and heading as inputs and fuel consumption as the dependent variable.*

*Furthermore, this study contributes to the United Nations Sustainable Development Goal of "Affordable and Clean Energy" by offering a potential solution to reduce fuel consumption in high-energy-demand aviation operations. The contribution of this work in terms of its originality and broader impact is summarized in the results section.*

Araştırma Makalesi	Research Article
Başvuru Tarihi : 24.09.2025	Submission Date : 24.09.2025
Kabul Tarihi : 30.01.2026	Accepted Date : 30.01.2026

## 1. Giriş

Günümüzde ulusal çapta meydana gelen iklim krizleri ve doğal afetler, küresel ısınma temelli olup bu tehditlerin her geçen gün artması tüm canlıların geleceğini tehlikeye atmaktadır. Bireysel karbon ayak izini azaltma gerekliliğinin yanı sıra geniş çaplı iyileştirmelerin de mümkün olduğu düşünülmektedir. Uçakların neden olduğu emisyonları azaltmak için uçak motoru ve uçağın genel aerodinamik yapısının optimizasyonu ve havacılıkta alternatif yakıt kullanımının artırılması gibi teknolojik çözümlerin yanı sıra, havaalanlarında pist, taksi yolları ve terminal binalarının uygun bir şekilde yapılandırılması gibi önlemler de etkili olabilmektedir (Dönmez, Aydoğan, Çetek ve Maraş, 2023; Li ve diğ., 2019; Zhang, Ding, Wang ve Chen, 2016; Zhao, Li, Sun ve Zhang, 2021). Ancak bu gibi önlemlerin uygulanması uzun yıllar alacak planlama, tasarım ve uygulama süreçleri gerektirebilir. Diğer taraftan uçuş operasyonlarını optimize etmek hava taşımacılığının çevresel etkilerini azaltmada önemli bir rol üstlenebilir (Reynolds, 2014; Jiang ve Hao 2024). Özellikle hava taşımacılığında uçakların yüksek yakıt tüketimi çevresel etkileri artıran önemli bir faktördür. Bu nedenle yakıt tasarrufu sağlamak ve emisyonları azaltmak amacıyla çeşitli iyileştirme çalışmaları yapılmaktadır. Uçuş operasyonlarının minimum emisyona göre optimize edilmesi görece daha kısa sürede ve daha düşük maliyetlerle uygulanabilecek stratejilerdir. Çevresel faydaların yanı sıra, bu stratejilerin uygulanmasıyla yakıt tüketiminin azaltılması yoluyla ekonomik faydalar da sağlanabilir (Özdemir, 2024).

Yüksek enerji tüketimine sahip hava araçlarında katedilen mesafeyi iyileştirerek yakıt tasarrufu sağlama amacıyla başlatılan bu projede odak nokta, çakışma

önleyici sistemler sonrası uçaklara verilen geri dönüş komutlarının verimliliğini sorgulamaktır. Çakışma önleyici faaliyetler sonrası uygulanan rotalarda, sezgisel yaklaşım içeren bir bilgi destek sistemi kullanılarak rotaya geri dönme sürecine katkı verilebilir ve yakıt tüketimi de mevcut yöntemlere göre daha etkin bir şekilde azaltılabilir. Erişilebilen literatürde çakışma önleyici manevralar ile ilgilenen çoğu çalışma operasyonel maliyetler üzerine yoğunlaşırken manevra sonrası rotaya dönüşte yakıt tüketimi ve çevresel etkiler sınırlı düzeyde incelenmiştir (Sun ve diğ., 2022). Bu bağlamda önerilen karar destek sisteminin sadece çakışma sonrası güvenli geri dönüşü sağlamakla kalmayıp aynı zamanda yakıt tüketimini en küçükleyerek operasyonel verimliliği artırmayı hedeflemesi çalışmanın özgün yönünü oluşturmaktadır.

Önerilen çalışmanın özgün yanını oluşturan temel fark; erişilebilen literatürde çakışma önleyici manevraların operasyonel maliyetleri yoğun şekilde incelenirken, manevra sonrası rotaya geri dönüş sürecindeki yakıt tüketimi ve çevresel etkilerin oldukça sınırlı düzeyde ele alınmış olmasıdır. Geliştirilen karar destek sistemi, sadece çakışmaların önlendiği güvenli bir rota sağlamakla kalmayıp, sezgisel bir bilgi destek sistemi kullanarak uçağın en uygun şekilde rotasına dönmesini sağlayarak yakıt verimliliğini mevcut yöntemlere göre daha etkin bir şekilde artırmayı hedeflemektedir. Ayrıca bu çalışma ESCAPE platformu üzerinde kurulan gerçekçi uçuş senaryoları ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Çalışmanın geri kalanı dört ana bölüm altında yapılandırılmıştır. İkinci bölüm, hava trafik yönetiminde çakışma çözümü ve rotaya dönüş süreci yaklaşımlarının yanında yakıt optimizasyonu üzerine kapsamlı bir literatür taraması sunmakta ayrıca mevcut araştırma boşluklarını tanımlamaktadır. Üçüncü bölümde, geliştirilen çözüm algoritmasının matematiksel temellerini, karar verme mekanizmalarını ve optimizasyon kısıtlarını içeren metodolojik çerçeveyi detaylandırmaktadır. Dördüncü bölümde, önerilen yöntemin geçerliliğini test etmek amacıyla gerçekleştirilen simülasyon senaryoları ve elde edilen sayısal sonuçlar analiz edilmektedir. Beşinci ve sonuç bölümünde ise elde edilen bulgular literatürle karşılaştırmalı olarak tartışılmakta ve gelecekteki araştırma olanakları değerlendirilmektedir.

## 2. Literatür Taraması

Çakışmaların önlenmesi için çeşitli manevralar uygulanmaktadır. Ancak bu tür çakışma önleyici manevraların ardından uçakların en uygun şekilde rotalarına döndürülmesi, literatürde yeterince çalışılmamış bir alan olarak öne çıkmaktadır. Birinci öncelik güvenlik olmakla birlikte, dönüş sürecinin de eniyilenmesi, verimlilik ve yakıt tüketimi açısından kritik bir problem oluşturmaktadır. Bu nedenle hava trafik kontrolörleri için önemli bir karar destek mekanizmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

İzleyen kısımda literatürdeki mevcut çalışmalar sırasıyla uçak çakışmaları ve çözümleme yaklaşımları, yakıt tüketimi ve emisyon analizleri, hava trafik

yönetimi ve uçak rotalarının optimizasyonu konularındaki araştırmalar olarak farklı paragraflarda özetlenmektedir (Jamal, Ashraf ve Jhanjhi, 2023).

Hava trafiği yönetimi, uçuş güvenliğini sağlamak ve hava sahasının verimli kullanımını desteklemek için kritik bir unsurdur (Federal Aviation Administration, 2021). Artan hava trafiği, özellikle yoğun havalimanları ve hava koridorlarında çakışma risklerini artırmaktadır. Bu riskleri en aza indirmek için hava trafik kontrol sistemleri, pilot destek sistemleri ve çakışma önleyici algoritmalar sürekli olarak geliştirilmektedir (Costea ve diğ., 2020;Hwang, Kim ve Tomlin, 2007; Dudoit, Rimša, Bogdevičius ve Skorupski, 2022). Ayrıca modern hava trafik yönetiminde, yalnızca çakışmaları önlemek değil aynı zamanda yakıt tüketimini ve çevresel etkileri en aza indirmek de önemli bir hedef haline gelmiştir. Çakışmalar genellikle üç temel gruba ayrılmaktadır: kesişen rotalardaki uçaklar, aynı yönde birbirine yaklaşan uçaklar ve zıt yönlü karşılaşmalar (SKYbrary, 2022). Gelişmiş gözetim sistemleri kullanılmasına rağmen, acil durumlar, ani hava değişimleri veya rotalarda yapılan beklenmedik değişiklikler çakışma riskini artırabilmektedir (FAA, 2021). Uçak çakışmalarının çözümüne yönelik çalışmalar incelendiğinde birçok farklı çözüm yöntemi önerildiği görülmektedir (Paielli ve Erzberger, 1997). Seyir aşamasında aynı hava sahasını paylaşan çok sayıda uçak bulunabilir. Bu nedenle, bu tür manevralar yapılırken uçuş operasyonlarının emniyetli bir şekilde yürütülebilmesi için uçaklar arasında yatay ve dikey düzlemde belirli bir emniyet mesafesinin bulunması gerekmektedir. (Zhang ve diğ., 2017). Bu mesafenin altına düşülmesi durumunda çakışma (conflict) meydana gelmektedir. Örneğin bu mesafe Türk hava sahasında saha kontrol ünitelerince aynı kategorideki uçaklar arasında yatayda 5 deniz mili (NM-nautical mile), dikeyde ise FL410'a kadar 1000ft (feet-uzunluk birimi) olarak uygulanmaktadır (Özdemir,2024;International Civil Aviation Organization, 2022).Çakışma önleyici manevralar, genellikle Hava Trafik Kontrolörleri tarafından verilen talimatlarla uygulanır. Amaç, uçuş güvenliğini koruyarak uçakların güvenli bir mesafede kalmasını sağlamaktır. Liteatürde yer alan eniyileme yöntemleri, doğrusal (LP), karma tam sayılı doğrusal (MILP), ve karma tam sayılı doğrusal olmayan programlama (MINLP) gibi teknikleri içermektedir. Çeçen (2021a;), uçak çakışma saptama ve çözümleme problemini ele alarak karma tam sayılı doğrusal programlama (MILP) modeli kullanmıştır. Bir başka çalışmada, hava sahasında uçakların potansiyel çakışma bölgeleri tespit edilmekte ve en uygun çakışma önleme stratejileri belirlenmektedir (Lehouillier ve diğ., 2017). Benzer bir çalışmada ise Alonso-Ayuso, Escudero ve Martín-Campo (2016), uçak çakışmalarının önlenmesi için karma tam sayılı doğrusal olmayan programlama (MINLP) modelini önermektedir. Bu model, çakışmaların önlenmesi ile birlikte uçuş rotalarından mümkün olduğunca az sapılmasını ve operasyonel verimliliğin korunmasını amaçlamaktadır. Omer (2015b) karma tam sayılı iki doğrusal modeli (MILP) karşılaştırarak hız, yön ve irtifa değişiklikleri ile en uygun kaçınma stratejilerini analiz etmiştir. Cai ve Zhang (2019b), uçakların hız ve irtifa değişiklikleriyle çakışmaların önenebileceği bir karma tam sayılı doğrusal

olmayan model önermiştir, aynı zamanda gereksiz yön ve hız değişikliklerinden kaçınılmasını sağlamayı amaçlamıştır. Uçuş başı değişikliği, özel olarak, çakışma önleyici stratejiler arasında en hızlı uygulanabilen ve yakıt tüketimi açısından en verimli yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir (Srivastava, Tomlin ve Erzberger, 2022). Özellikle aynı irtifada seyreden ve rotaları kesişen uçaklar arasında etkili sonuçlar doğurmaktadır. Bu manevra sayesinde uçaklar, belirli bir açıyla sağa veya sola yönlendirilerek potansiyel çakışma noktalarından uzaklaştırılır (Kopardekar, Bilimoria ve Sridhar, 2009b).

Uçuş başı değişikliği, irtifa veya hız değişikliklerine kıyasla operasyonel açıdan da bazı önemli üstünlükler sunmaktadır. Özellikle yakıt tüketimi açısından değerlendirildiğinde bu manevra motor gücünde veya uçuş dinamiklerinde büyük değişiklikler gerektirmediği için daha verimli kabul edilmektedir (Khadilkar ve Balakrishnan, 2011a; Zhao ve Liu, 2020; Zhang ve Yu, 2024). Yön değişikliği, uçakların dengede kalmasını sağlarken yakıt tüketimini enküçükleyebilir. Buna ek olarak, genellikle daha hızlı uygulanabilir olup hava sahasındaki diğer uçuşları minimum düzeyde etkileyecek operasyonel düzeni korumada daha etkilidirler (Srivastava ve diğ., 2022).

Hava trafik yönetiminde çakışma önleyici manevraların uçuş rotalarında sapmalara yol açması sonrası uçakların planlanan güzergâhlarına dönmeleri için ek yönlendirmeler gerekmektedir. Bu süreç iyi planlanmadığında gereksiz yakıt tüketimi, uçuş süresinde uzamalar ve hava sahasında düzensizlikler meydana gelebilir.(Dias ve Rey (2024; Zhu, Xu, Qu ve Su, 2022). Sistem yalnızca çakışma riski taşıyan durumlara müdahale etmekte, gereksiz manevraların önüne geçilmektedir. Bu nedenle hava trafik kontrolörleri için önemli bir karar destek mekanizmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Çakışma sonrası yörünge kurtarma üzerine yoğunlaşan nadir çalışmalardan biri olup uçakların çakışma sonrası minimum yakıt tüketimiyle rotalarına dönüşlerini optimize eden bir model geliştirmiştir. Bu çalışma, literatürdeki boşluğa katkıda bulunarak hava trafik kontrol süreçlerinde yakıt tüketimini azaltırken operasyonel verimliliği artıran bir çözüm sunulmaktadır. Ayrıca Liu ve Xiao (2023), çoklu uçak çakışmalarının çözümü sonrasında her bir uçağın orijinal rotasına dönüşünü en kısa mesafe ve en az sapmayla gerçekleştirmek üzere karma tamsayı doğrusal programlama (MILP) temelli bir model önermiştir. Bu çalışmada uçaklar için hem çakışmadan kaçınma manevrası hem de sonrasında güvenli ve verimli dönüş rotaları aynı sistem içinde optimize edilmektedir.

Özetle, havacılık literatüründeki çalışmaların büyük bir bölümü uçak çakışmalarının saptanması ve bu çakışmaların emniyet mesafeleri korunarak çözümlenmesi aşamasına yoğunlaşmıştır. Ancak çakışma sonrası yörünge kurtarma ve uçağın orijinal rotasına en düşük maliyetle döndürülmesi süreci literatürde yeterince kapsanmamış kritik bir boşluk olarak bulunmaktadır. Mevcut çalışmaların çoğu manevranın emniyetine odaklanırken, manevra sonrası rotaya dönüşün yakıt verimliliği üzerindeki etkisi ikincil planda kalmıştır. Bu çalışma, söz konusu boşluğu doldurmak amacıyla, sadece çakışma

önleyici manevrayı değil, manevra bitiminden itibaren en uygun dönüş rotasını da eniyileyen sezgisel bir karar destek sistemi önermektedir. Bu sayede, hava trafik kontrolörlerine hem emniyet hem de çevresel sürdürülebilirlik odaklı, operasyonel olarak uygulanabilir bir çözüm stratejisi sunulması hedeflenmektedir.

### 3. Yöntem

Bu çalışma; literatür taraması, matematiksel model, sezgisel yaklaşım, kullanıcı dostu karar destek sistemi ve simülasyon analizleri aşamalarından oluşmaktadır.

Geliştirilen karar modeli, katedilen toplam uçuş mesafesini enküçükleyerek yakıt tüketimini de iyileştirmektedir. Emniyet mesafeleri ve güvenlik kısıtları içermektedir.

Matematiksel modeller problem türüne bağlı olarak büyük veri setleri için çözülemeyebilmekte ya da çözüm süresi çok uzun olabilmektedir. Bu çalışma kapsamında önerilen çözümün gerçek hayatta karşılığının olabilmesi, katedilen mesafenin saniyeler içinde çok uzun olabildiği hava sahasında, ancak kontrolöre “anlılık” bilgi ve öneri verebilmekle mümkün olabilir. Bu nedenle hem sezgisel bir algoritmaya hem de kullanıcı dostu bir karar destek sistemine olan ihtiyaç kaçınılmazdır. Bir başka deyişle sezgisel algoritma çalışmakta ancak hızlı ve etkin kullanılabilmesi için sonuçları kullanıcı dostu arayüzlerle kontrolöre sunulmaktadır. Sezgisel algoritmanın doğruluğu ve uygulanabilirliği hali hazırda simülasyon çalışmaları ile desteklenmiş ve uygun istatistiksel ölçütler aracılığıyla da test edilmiştir. Simülasyon çalışmaları Havacılık Fakültesi olan bir üniversitede yer alan ESCAPE uçuş simülatörü yardımı ile gerçekleştirilmiştir. İzleyen kısımda bu işlemler açıklanmaktadır.

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

#### 3.1. Geliştirilen Matematiksel Model

Geliştirilen matematiksel modelin oluşturulmasında Dias ve Rey (2024) tarafından önerilen çalışmadaki bazı temel geometrik ve kinematik ilişkilerden yararlanılmıştır. Özellikle iki uçağın görelî hareketine bağlı olarak en yakın yaklaşma zamanının belirlenmesi ve bu anda güvenlik yarıçapının ihlal edilip edilmediğinin analitik olarak test edilmesi yaklaşımı, çakışma tespiti açısından referans alınmıştır. Bununla birlikte, önerilen model literatürdeki yaklaşımlardan önemli ölçüde ayrılmaktadır. Dias ve Rey (2024) çakışma ile, daha çok statik bir durum tespiti ve sonrasında sınırlı bir yörünge kurtarma problemini ele alırken, bu çalışmada çakışma tespiti dinamik bir süreç olarak modellenmiş ve yalnızca çakışmanın önlenmesi değil, çakışma sonrası uçakların orijinal rotalarına ne zaman ve hangi açıyla güvenli ve verimli biçimde

dönebilecekleri de karar sürecine eklenmiştir. Bu yönüyle önerilen model, çakışma anı ile sınırlı kalmamakta; zaman boyutunu içeren dönüş anını ve dönüş açısını sürekli karar değişkenleri olarak ele alan bir yapı sunmaktadır. Ayrıca, amaç fonksiyonu doğrudan toplam katedilen mesafeyi enküçükleyecek şekilde tanımlanmış olup bu yaklaşım çakışma çözümünü operasyonel verimlilik ve yakıt tüketimi perspektifiyle birlikte ele almaktadır.

Önerilen matematiksel modelin kümeleri, indisleri, parametreleri, karar değişkenleri, kısıtları ve amaç fonksiyonu aşağıda verilmektedir.

Kümeler:

$I$  : Uçaklar kümesi

$T$  : Karar verilen zaman dilimleri

İndisler:

$i, j \in I$  : Uçaklar

$t \in T$  : Zaman dilimi

Parametreler:

$x^0_i, y^0_i$  : i. uçağın başlangıç koordinatları

$v_i$  : i. uçağın sabit hızı (NM/dk)

$\theta_i$  : i. uçağın sapma açısı ile birlikte x eksenine yaptığı toplam açı

$x^s_i, y^s_i$  : i. uçağın varış noktaları

$d$  : güvenlik yarıçapı,  $d = 5$  NM

$M$  : Yeterince büyük pozitif bir sabit sayı

Karar Değişkenleri:

$z_{it}$  : i. uçak t. anında rotasına güvenli bir şekilde dönmeye başlıyorsa 1; dd. 0

$\alpha_{it}$  : i. uçağın t. anda yapacağı rotaya dönüş açısı

$mesafe_{it}$  : i. uçağın başlangıç noktasından varış noktasına kadar katettiği toplam mesafe

$dist_{ijt}$  : t. anda i. ve j. uçakları arasındaki mesafe

$x_i(t)$  : i. uçağın t. anındaki x koordinatı

$y_i(t)$  : i. uçağın t. anındaki y koordinatı

Kısıtlar:

i. uçağın başlangıç noktasından varış noktasına kadar katettiği toplam mesafe (1) ile bulunmaktadır:

$$mesafe_{it} = v_i * t + \sqrt{(x_i^s - x_i(t))^2 + (y_i^s - y_i(t))^2} \quad \forall i \in I, t \in T \quad (1)$$

Her i uçağı rotasına dönmelidir.

$$\sum_{t \in T} z_{it} = 1 \quad \forall i \in I \quad (2)$$

i ve j uçaklarının t anında aralarındaki mesafe (3) ile bulunmaktadır.

$$dist_{ijt}(t) = \sqrt{(x_i(t) - x_j(t))^2 + (y_i(t) - y_j(t))^2} \quad \forall i, j \in I, t \in T, i \neq j \quad (3)$$

Emniyet çemberinin boyutu; uçağın rakımı, hızı ve istikametine bağlıdır. Uçakların hızları, çarpışma riski durumunda reaksiyon sürelerini etkiler. Daha yüksek hızda seyreden uçaklar için, güvenli mesafe daha büyük olmalıdır, çünkü uçaklar arasındaki mesafe daha hızlı kapanır. Bu durumda, hava trafik kontrol otoriteleri tarafından belirlenen minimum ayırma mesafeleri kullanılabilir. Bu ayırma mesafesi genellikle yatayda 5 deniz mili (NM) ve dikeyde 1.000 feet olarak standarttır. Ancak bazı durumlarda hava sahası yoğunluğuna ve uçak türlerine göre değişebilir (Özdemir, 2024). Emniyet çemberi kısıtı (4) ile sağlanmaktadır.

$$dist_{ijt}(t) \geq d - M*(1 - z_{it}) \quad \forall i, j \in I, t \in T, i \neq j \quad (4)$$

i. uçağın t. anda yapacağı rotaya dönüş açısı (5) ile bulunmaktadır:

$$\alpha_{it} = \tan^{-1} \frac{y_i(t) - y_j(t)}{x_i(t) - x_j(t)} \quad \forall i, j \in I, t \in T, i \neq j \quad (5)$$

i. uçağının t anına bağlı konum denklemleri (6) ve (7)'de verilmektedir.

$$x_i(t) = x_i^0 + v_i * t * \cos(\theta_i) \quad \forall i \in I, t \in T \quad (6)$$

$$y_i(t) = y_i^0 + v_i * t * \sin(\theta_i) \quad \forall i \in I, t \in T \quad (7)$$

Amaç Fonksiyonu:

Amaç katedilecek toplam mesafeyi en küçükleyerek uçakların en kısa sürede ve en düşük maliyetle rotalarına dönmelerini sağlamaktır (8).

$$\text{Enk } \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} mesafe_{it} * z_{it} \quad (8)$$

### 3.2. Sezgisel Yaklaşımın İhtiyaç ve Gerekli Matematiksel İlişkiler

Matematiksel modelin doğrusal olmayan yapısı nedeniyle çözümü çok güçtür, ayrıca çözüm elde edilse bile uçak sayısının artmasıyla, hava sahasında saniyeler içinde çok büyük mesafeler katedebilen uçakları kontrol eden kontrolörler için karara destek verebilecek hızı yakalamak mümkün olmayacaktır.

Önerilen model doğrusal olmayan problem çözümlerinde kullanılabilen çeşitli çözümlerle denenmiştir. Ancak modelde yer alan sürekli dönüş açıları, zamana bağlı konum denklemleri ve tüm uçak çiftleri arasında tanımlanan güvenlik

kısıtlarının eş zamanlı olarak ele alınması, geliştirilen modelde hem karma tamsayı değişkenler, hem trigonometrik fonksiyonlar hem de karekök ve mesafe hesabı için kullanılan çember denklemlerine yer verilmesini gerektirmektedir. Bu durum uçak sayısı arttıkça problem boyutunun ve karmaşıklığının çok hızlı biçimde büyümesine neden olmaktadır. Öte yandan elde edilen çözümün hava trafik kontrolörüne “anlılık” komut ile ve kontrolörün anlayacağı şekilde bir arayüzle verilebilmesi en önemli ihtiyaçtır. Bu nedenlerle geliştirilen sezgisel yaklaşım büyük boyutlu problemler olduğunda hız üstünlüğüne sahip olup saniyelerin önemli olduğu hava yolu trafiğinde hızlı, güvenli ve uygulanabilir bir yaklaşım sunmamaktadır.

Bu nedenle, tüm uçak çiftlerinin mevcut koordinatlarını ve hızlarını dikkate alarak olası çakışma riskini gözeterek ve önleyici manevra kararını verdikten sonra rotaya geri dönecek zamanı ve manevrayı belirleyen sezgisel bir yaklaşım geliştirilmiştir. Tablo 1’de sezgisel yaklaşımın sözde kodu verilmektedir.

Tablo 1  
Sezgisel Algoritmanın Sözde Kodu

1.	prosedür UCUS_SIMULASYONU(girdiler)
2.	her bir uçak için:
3.	x, y, V, başlangıç açısı, sapma açısı, hedef x, hedef y değerlerini al
4.	toplam açı $\leftarrow$ başlangıç açısı + sapma açısı
5.	$V_x \leftarrow V * \cos(\text{toplam açı})$
6.	$V_y \leftarrow V * \sin(\text{toplam açı})$
7.	uçak verisini kaydet
8.	bitir
9.	her uçak çifti (i, j) için:
10.	göreceli konum ve hız farklarını hesapla
11.	$t_{ij}^{\min} \leftarrow$ en yaklaşma zamanı
12.	if $t_{ij}^{\min} > 0$ ve mesafe( $t_{ij}^{\min}$ ) < d ise:
13.	çakışma riski var $\rightarrow$ grafik üzerinde göster
14.	else:
15.	çakışma riski yok
16.	end if
17.	bitir
18.	her sapma yapan uçak için:
19.	dakika = 1’den 60’a kadar döngü:
20.	o andaki konumu hesapla
21.	hedefe doğru dönüş açısını hesapla
22.	yeni $V_x$ ve $V_y$ bileşenlerini hesapla
23.	dönüş güvenli mi kontrol et:
24.	if diğer uçaklarla çakışma varsa:
25.	devam et
26.	else:
27.	dönüş zamanı ve açısı kaydedilir
28.	döngüden çık
29.	end if
30.	döngü bitir
31.	bitir
32.	her dönen uçak için:
33.	dönüş sonrası yeni rotayı çiz
34.	sapma ve dönüş mesafelerini ayrı ayrı hesapla
35.	toplam uçuş mesafesi ve süresini hesapla
36.	bitir
37.	sonuçları yazdır (metin kutusu ve tablo)
38.	grafik üzerinde tüm rotaları ve çakışmaları göster
39.	prosedür sonu

Bu yaklaşımda her uçağın kalkış ve varış noktası arasındaki başlangıç yönü, sistem tarafından koordinatları kullanılarak otomatik olarak belirlenmektedir. Eğer uçuş rotaları boyunca herhangi iki uçak arasındaki mesafe 5 deniz milinin altına düşerse sistem bunu potansiyel bir çakışma olarak algılamakta ve uçaklardan biri için belirlediği sapma açısı (çarpışmayı önlemek için verilen uçuş başı değiştirme açısı) ile alternatif bir rota oluşturmaktadır. Her 5 saniyede bir bu yeni rotadaki güvenlik durumu da kontrol edilerek çakışmanın ortadan kalkıp kalkmadığı değerlendirilmektedir. Bu süreçte çeşitli matematiksel ilişkilerin sağlanması gerekmektedir.

Çakışma analizi,  $t^{min}_{ij}$ ,  $g_{ij}$  göstergelerine ve aşağıda (9)-(13) ile gösterilen denklemlere dayanmaktadır. Bu göstergeler, iki uçağın birbirine göre en yakın olacağı zamanı ve aralarındaki mesafenin, yukarıda sözü edilen güvenlik limiti olan 5 deniz milini aşıp aşmayacağını (çakışma riskini) belirlemek için kullanılmaktadır.

Önerilen modelin küme, indis, parametre ve karar değişkenleri aşağıda verilmiştir (Dias ve Rey, 2024):

Kümeler:

$A$ : Uçaklar Kümesi

$T$ : Zaman adımları kümesi

$P = \{(i,j) \mid i \in A, j \in A, i < j\}$ : Uçak çiftleri kümesi

İndisler:

$i, j \in A$ : Uçak indisleri,  $(i, j) \in P$

$t \in T$ : Zaman indisi

Parametreler:

$d$ : Minimum emniyet ayrımı (NM cinsinden, ör. 5 NM)

$x_i^0, y_i^0$ :  $i$  uçağının başlangıç koordinatları

$v_i$ :  $i$  uçağının sabit hızı

Karar Değişkenleri:

$x_i(t), y_i(t)$ :  $i$  uçağının  $t$  anındaki

$\alpha_i(t)$ :  $i$  uçağının  $t$  anındaki uçuş başı açısı

Kısıtlar

Güvenlik yarıçapı kısıtı (9)'da gösterilmektedir.

$$\|p_{ij}(t)\| \geq d \Leftrightarrow \sqrt{(x_i(t) - x_j(t))^2 + (y_i(t) - y_j(t))^2} \geq d, \quad \forall t \geq 0 \quad (9)$$

1) Öncelikle hesaplama kolaylığı sağlamak için güvenlik yarıçapı kısıtının karesi alınır.

$$f_{ij}(t) = ((v^x_{ij})^2 + (v^y_{ij})^2) t^2 + (2v^x_{ij}\hat{x}_{ij} + 2v^y_{ij}\hat{y}_{ij}) t + \hat{x}_{ij}^2 + \hat{y}_{ij}^2 - d^2 \geq 0 \quad (10)$$

$$\forall_{(i,j) \in P}, \forall t \geq 0$$

2) (10)'un türevini sıfıra eşitleyen nokta bulunur,  $t_{ij} > 0$  durumunda çakışma ihtimali oluşmaktadır.

$$f'_{ij}(t) = 0 \Rightarrow t^{min}_{ij} = -\frac{v^x_{ij}\hat{x}_{ij} + v^y_{ij}\hat{y}_{ij}}{(v^x_{ij})^2 + (v^y_{ij})^2} \quad \forall_{(i,j) \in P} \quad (11)$$

3) Bulunan nokta (10) numaralı denkleme yerleştirilerek iki uçak arasındaki mesafe ile güvenlik yarıçapı arasındaki fark bulunur. Bulunan değer pozitif ise güvenlik yarıçapının aşılması için ne kadar mesafe katedileceği, negatif ise çakışma riskinin halihazırda bulunduğu anlaşılacaktır.

$$g_{ij}(v^x_{ij}, v^y_{ij}) = f_{ij}(t^{min}_{ij}) = (v^y_{ij})^2(\hat{x}_{ij}^2 - d^2) + (v^x_{ij})^2(\hat{y}_{ij}^2 - d^2) - \quad (12)$$

$$(2\hat{x}_{ij}\hat{y}_{ij}v^x_{ij}v^y_{ij}) \quad \forall_{(i,j) \in P}$$

İkinci ve üçüncü adım denklemlerini kapsayan kısıt:

$$\|p_{ij}(t)\| \geq d, \forall t \geq 0 \Leftrightarrow g_{ij}(v^x_{ij}, v^y_{ij}) \geq 0, \quad t^{min}_{ij} \leq 0 \quad \forall_{(i,j) \in P} \quad (13)$$

İki kısıt da aynı anda sağlanırsa çakışma olduğu anlamına gelmektedir.

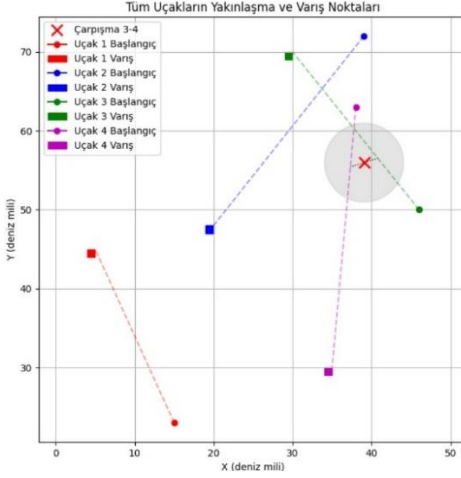
(9)-(13) ile gösterilen denklemler sayesinde sistem yalnızca çakışma riski taşıyan durumlara müdahale etmekte, gereksiz manevraların önüne geçilmektedir. Ayrıca, her uçak için oluşturulan alternatif rotaların üzerinde yapılan bu dinamik kontrol sayesinde, uçakların orijinal rotalarına ne zaman ve hangi açıyla güvenli şekilde dönebilecekleri de belirlenebilmektedir. Dönüş kararı alındığında, o ana kadarki uçuş mesafesi, dönüş açısı ve toplam süresi sistem tarafından hem görsel hem yazılı olarak kullanıcıya sunulmaktadır.

Bu kapsamda, eğer sistem belirli bir anda çakışmanın çözüldüğünü ve belirlediği bir t anında (sn) geriye dönüş yapıldığında yeni bir çakışmanın oluşmayacağını tespit ederse, uçak o anda orijinal rotasına döner (dönme komutunu alır). Bu dönüş sırasında gerçekleşen açı, zaman ve konum bilgileri hem görsel hem de metinsel olarak kontrolöre sunulur. Böylece sistem, dinamik bir kontrol yapısıyla uçuş güvenliğini sağlamayı hedeflerken, toplam seyahat süresini de enküçükleyecek şekilde sezgisel olarak yönlendirme yapmaktadır.

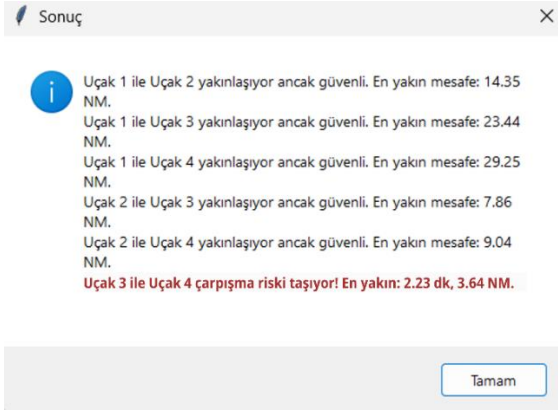
### 3.3. Geliştirilen Kullanıcı Dostu Arayüz

Bu çalışma kapsamında geliştirilen yaklaşımın gerçek hayatta karşılığı ancak hava sahasındaki trafik kontrolörünün çakışmayı önleyici manevrayı yapmış uçağın hangi açıyla ve hangi saniyede rotasına geri dönmesi gerektiği önerisini hızlı bir şekilde alabilmesi ve hava sahasındaki uçaklara anlık komut verebilmesi ile mümkündür (Pant ve diğ., 2025). Bu nedenle 3.2.'de geliştirilen sezgisel yaklaşım, burada görsellerle açıklanacak olan bir arayüz yardımı ile daha etkin kullanılabilir duruma getirilmiştir. Python 3.12.3 programlama dili kullanılarak geliştirilen, grafikler ve kullanıcıya sunulan metinlerle desteklenen arayüz, basitçe şu şekilde çalışmaktadır: Her bir uçak için; kalkış konumu, hedef konumu (destinasyon koordinatları), seyir hızı, sapma açısı (varsa) ve sapma zamanı gibi temel verileri alacak şekilde yapılandırılmıştır. Bu verilerin alınmasının ardından sistem, uçakların başlangıç ve hedef koordinatlarına bağlı olarak rotasını değerlendirerek çakışma riski analizini gerçekleştirmektedir. "Çözümle" butonunun çalıştırılmasıyla, geliştirilen sezgisel algoritma devreye girerek tüm uçakların birbiri ile aralarındaki mesafe kontrollerini yapmaktadır. 5 deniz mili altına inilen durumlar sistem tarafından potansiyel çakışma olarak algılanmaktadır. Sistem, her 5 saniyede bir bu yeni rotanın güvenliğini de kontrol ederek, çakışmanın ortadan kalktığı anı belirlemenin yanısıra, diğer uçaklarla yeni çakışma ihtimali olup olmadığını da analiz eder. Çakışmanın çözüldüğü ve dönüşün yeni bir çakışma riski yaratmadığı anlaşıldığında, uçak orijinal rotasına sistem tarafından belirlenen ve yakıt tüketimini de enazlayacak zamanda geri dönmeye başlar. Bu dönüş zamanı, açısı ve konumu kullanıcıya hem yazılı olarak hem de grafiksel şekilde bildirilmektedir.

Şekil 1, 2, 3 ve 4'te, önerilen yaklaşım görsellerle açıklanmaktadır. Her bir uçağın: başlangıç ve hedef noktaları, orijinal rotası, sapma sonrası izlediği alternatif rotası, güvenlik çemberleri (5 deniz mili yarıçaplı), en yakın geçiş noktaları ve gerçekleşen çakışmalar ile çözüm manevraları farklı renk ve semboller kullanılarak açık şekilde görselleştirilmektedir.



Şekil 1. Arayüzün Verdiği Sonuç Ekranı

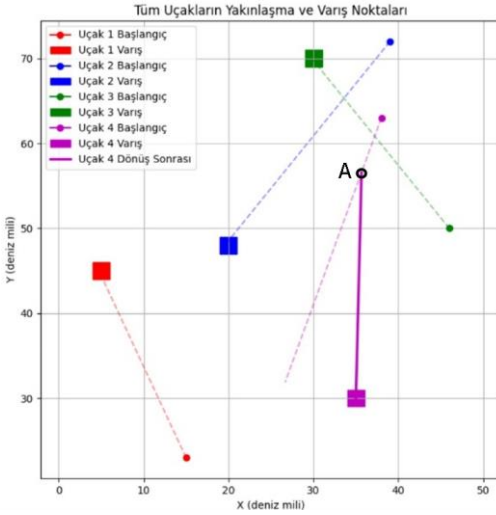


Şekil 2. İki Uçağın Çakıştığı Örnek

Şekil 1'deki görselde farklı renklerle gösterilen dört uçağa ait başlangıç ve varış noktaları ile orijinal rotaları gösterilmektedir. Ortadaki gri çember, 5 deniz mili yarıçapında bir güvenlik bölgesini temsil etmektedir. Renkli çizgilerin bir ucunda yer alan kutucuklar varış noktaları iken diğer uçlarında yer alan küçük noktalar ise uçakların kalkış noktalarıdır. Görüldüğü üzere bu senaryo için, müdahale edilmezse, mor ve yeşil renkli rotaya sahip uçaklar gri çemberin içinden ve 5 NM'den daha yakın bir mesafede geçiş yaparak potansiyel çakışma tehlikesi yaratmaktadır.

Şekil 2' de yer alan bilgi kutusunda ise Şekil 1'deki duruma karşılık olarak sistemin değerlendirme sonuçları görülmektedir. Örnek olarak: "Uçak 3 ile Uçak 4 çarpışma riski taşıyor! En yakın: 2.23 dk; 3.64 NM." uyarısı, Uçak 3 ile Uçak 4'ün aralarındaki mesafe 5 deniz milini aştığı için çarpışma riski taşıdığını sözlü olarak belirtir. Diğer uçak çiftleri arasında mesafe 5 deniz milinin üzerinde olduğundan sistem tarafından "güvenli durum" olarak değerlendirilmiştir.

Şekil 3'te, uçuş başı değişikliği sonrası çarpışmayı ortadan kaldıran, yeni rotası mor kesikli çizgilerle gösterilmiş uçağın asıl varış noktası mor kutucuk olduğu için A noktasından itibaren orijinal varış noktasına doğru geri dönüş komutu verilmiştir. Nitekim Şekil 1' e bakıldığında ilgili uçağın orijinal rotasında mor kesikli çizgi aşağıya doğru daha dik bir konumda iken, Şekil 3'te çarpışma önleyici manevra ile "daha sola çarpık" bir istikamete yönlendiği ve rotaya geri dönme komutu almaz ise mor kutucuk olan varış noktasından uzaklaşacağı görülmektedir. Bu nedenle sezgisel algoritma tarafından belirlenen ve yakıt tüketimini enazlayan ve A noktasında bulunduğu bir anda (saniyede) kesiksiz mor çizgi boyunca ilerleyerek varış noktasına geri dönmüştür.



Şekil 3. Sezgisel Çözüm

**Sonuç** ✕

Uçak 1 ile Uçak 2 yaklaşıyor ancak güvenli. En yakın mesafe: 14.24 NM.  
 Uçak 1 ile Uçak 3 yaklaşıyor ancak güvenli. En yakın mesafe: 23.38 NM.  
 Uçak 1 ile Uçak 4 yaklaşıyor ancak güvenli. En yakın mesafe: 24.52 NM.  
 Uçak 2 ile Uçak 3 yaklaşıyor ancak güvenli. En yakın mesafe: 7.93 NM.  
 Uçak 2 ile Uçak 4 yaklaşıyor ancak güvenli. En yakın mesafe: 8.98 NM.  
 Uçak 3 ile Uçak 4 yaklaşıyor ancak güvenli. En yakın mesafe: 5.37 NM.

Uçak 4, 2 dakika sonra 18.6° açıyla rotaya güvenle dönebilir.

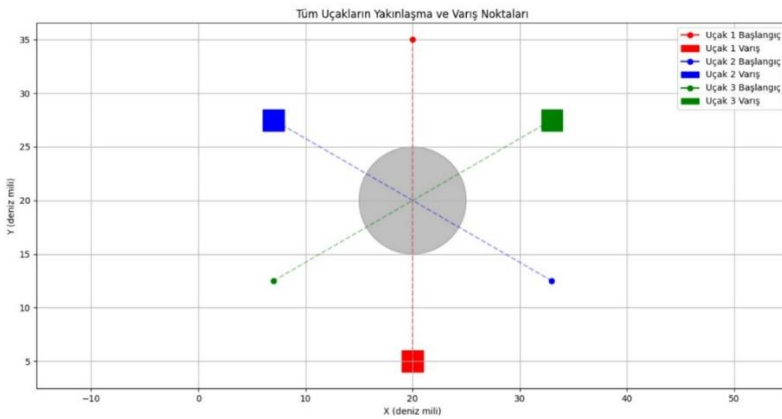
--- Uçuş Özeti ---  
 Uçak 4 toplamda 33.42 NM yol aldı, toplam süre: 9.78 dk (sapma: 6.83 NM, 2 dk; dönüş: 26.59 NM, 7.78 dk).

Tamam

Şekil 4. Sezgisel Çözüm için Sonuç Ekranı

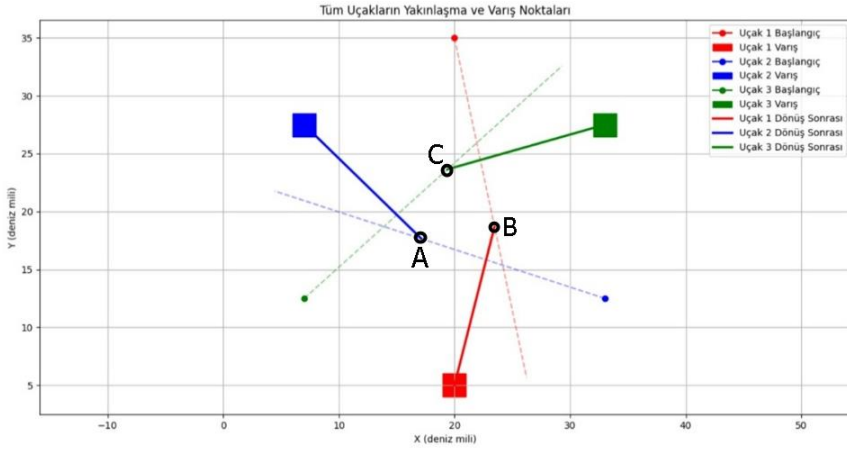
Bu sürece ait bilgi kutusunda dönüşe dair detaylı çıktılar Şekil 4'teki gibi görülmektedir.

Bu ifade, yalnızca çakışmadan kaçınmanın sağlandığını değil aynı zamanda toplam uçuş süresi ve mesafesinin güncellendiğini de göstermektedir. Sistem önce güvenliğe ikinci önemli faktör olarak da verimliliğe katkı sağlamaktadır.



Şekil 5. Üç Uçak için Merkezde Çakışma Senaryosu

İkinci örnek olarak Şekil 5’de verilen görselde üç uçağın çakışma merkezine doğru simetrik biçimde yaklaştığı bir durum görülmektedir. Gri alan yine güvenlik çemberini temsil ederken, önceki örneğe benzer şekilde kırmızı, mavi ve yeşil uçaklar ilgili renkte kutucuklara varmayı hedeflemektedirler. Ancak kaçınılmaz olarak gri alanda karşılaşacakları ve çakışma riski olduğu görülmektedir.



Şekil 6. Sapma Açısı Sonrası Sezgisel Algoritma ile Rotaya Geri Dönüş

Şekil 6’da ise geliştirilen sezgisel algoritma çalıştırdıktan sonra üç uçağın da çakışmadan kaçınacak şekilde yeni rotalar izlediği görülmektedir. Sapma ve ardından gelen dönüş manevraları, renkli çizgilerle gösterilmiştir. Mavi, yeşil ve kırmızı renkli kesikli çizgilerle gösterilen ve uçuş başı değişiklikleri sonrası izlenen rotalarda ilerlerken, kesiksiz (düz) çizgilerin başladığı A, B ve C noktalarında uçuş başı değişiklikleri yaparak ilgili renklerdeki kutucuklara doğru istikamette orijinal rotalarına yönelerek çakışmadan kaçınabilmişlerdir. Örnek olarak mavi uçak, kesikli mavi çizgi boyunca ilerlemeye devam ederse şekle göre sağdan sola doğru devam etmekte ancak mavi kutucuk olan varış noktasından uzaklaşmaktadır. Fakat sistem tarafından, varış noktasına, en az yakıt tüketimi ve yeni bir çakışma riski olmadan gidebileceği en erken dönüş anı olan A noktasında rotaya dönmeye başlamıştır. Böylece her bir uçak, yeni rotasıyla çakışma riskinden uzaklaştırılmış, ardından orijinal rotaya uygun şekilde yönlendirilmiştir. Bu görsel, sistemin çakışma anında ve sonrasında doğru kararlar alabildiğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak geliştirilen bu arayüz, hava trafik kontrol uygulamaları, karar destek sistemleri ve akademik araştırmalar için güçlü, geliştirilebilir ve esnek bir araç niteliği taşıyabilir.

### **3.4. Daha Etkin Çözümler için Metasezgisel Algoritmaların Kullanılması ve Genetik Algoritma Tabanlı Rotaya Geri Dönüş Sistemi Geliştirilmesi**

Bu çalışmada, önce matematiksel model geliştirilmiş ardından bir sezgisel algoritma ile desteklenmiştir. Ancak daha etkin sonuçlar elde etmek için Genetik Algoritma tabanlı bir metasezgisel algoritma da geliştirilmiştir. Sezgisel Algoritma sonuçları da karşılaştırma yapabilmek için çalışma kapsamında bırakılmıştır.

Metasezgisel algoritmalar matematiksel modellerin makul sürede çözülemeyecek karmaşıklıkta (genellikle NP-zor) olması durumunda en iyi çözüm yerine en iyiye yakın çözümün araştırıldığı ve sıkça başvurulan yöntemlerdendir (Borjigin ve Austin, 2024). Hem çok daha kısa sürelerde çözüm verebilmeleri hem de en iyi çözümü de kimi durumlarda yakalayabilmeleri yönüyle tercih edilmektedirler (Özdemir, 2024). Benzer şekilde, yakıt verimliliğine odaklanan hız ve irtifa değişikliği kombinasyonları da literatürde incelenmiştir (Cai ve Zhang, 2019). Bu çalışma kapsamında önce bir sezgisel algoritma geliştirilmiş ancak geliştirilmesi amacıyla yaklaşımın Genetik Algoritma ile de kodlanarak daha etkin çalışması hedeflenmiştir. Genetik algoritma, genetik bilimi ve evrim teorisinden esinlenerek ortaya çıkmış eniyileme amaçlı olarak kullanılan yinelemeli bir rassal arama algoritmasıdır (Tian, Liu, Ma ve Poznyak, 2018). Genetik algoritmalar, doğal seçim prensiplerine dayalı popülasyon tabanlı arama yöntemleri olup, özellikle doğrusal olmayan ve büyük çözüm uzaylarına sahip problemlerde klasik optimizasyon tekniklerine göre daha uygun ve hızlı çözümler sunabilmektedir (Deng ve diğ., 2022; Goldberg, 1989; Haupt ve Haupt, 2004). Uçak çakışmalarının çözümünde; sapma açıları, yön değiştirme zamanları gibi birçok sürekli karar değişkeni dikkate alınmakta ve bu durum problemi oldukça karmaşık hale getirmektedir. Özdemir (2024) benzer biçimde genetik algoritma kullanarak hava araçları için çakışmadan kaçınma stratejileri üretmiş ve bu yöntemin yüksek çözüm kalitesi sunduğu gösterilmiştir.

Çalışmamızda da her birey, uçakların sapma kararlarını temsil edecek şekilde tanımlanmış; uygunluk fonksiyonu ise toplam uçuş mesafesi ve çakışma durumu dikkate alınarak yapılandırılmıştır. Genetik algoritma, çözüm uzayını sistematik biçimde tarayarak çakışmaları önleyen ve güvenli rotaları sağlayan etkili çözümler üretmek üzere tasarlanmıştır. Genetik Algoritma ile ilgili çalışmalarımız sürmekle birlikte aşağıda gelinen nokta açıklanmaktadır:

Genetik Algoritma tasarımında her birey (kromozom), sistemdeki her bir uçağın yalnızca rotaya dönüş zamanı karar parametresini içerecek şekilde

yapılandırılmıştır. Kromozom, uçak sayısı kadar gen içermektedir. Örnek olarak 4 adet uçak için bir kromozom Tablo 2'deki gibi temsil edilmektedir.

Tablo 2

Dört Uçak için Kromozom Yapısı

Uçaklar	U1	U2	U3	U4
Rotaya Dönüş Zamanı (Sn)	20	70	12	65

Bu yapı, genetik algoritmanın çaprazlama ve mutasyon gibi temel işlemlerinin kolaylıkla uygulanmasına olanak tanırken her bireyin simülasyon ortamında uygulanabilir bir uçuş senaryosunu temsil etmesini sağlar. Uygunluk fonksiyonu ise toplam uçuş mesafesini en küçükleyecek şekilde tasarlanmıştır. Bu mesafenin ve performansın doğru şekilde hesaplanabilmesi için her bir uçağın başlangıç konumu, hedef noktası, sapma süresi boyunca izlediği rota ve rotaya dönüş parametrelerinin sistem tarafından hassas biçimde değerlendirilmesi gerekmektedir.

#### 4. Sonuçların Değerlendirilmesi ve ESCAPE Simülatörü ile Karşılaştırılması

ESCAPE simülatörü, Havacılık Fakültesi olan bir üniversitede bilimsel amaçlı kullanılan bir simülatördür. Sonuçlara geçmeden önce bu simülatörden kısaca bahsetmek gerekirse, insan kontrolörlerin sanal olarak yaratılmış bir hava sahasında tecrübelerine ve bazı teknik parametrelere dayanarak anlık verdiği çakışma önleyici kararların sonrasında rotaya dönme kararlarının ve çeşitli performans verilerinin (yakıt tüketimi, uçuş mesafesi vb.) kaydedildiği ve analiz edilebildiği bir simülasyon ortamıdır (Bowe ve Santiago, 2012). Yüksek işlemcili ve hafızalı bilgisayarlardan oluşan bir work station içerirler ve eş zamanlı birkaç kontrolör ve hava sahasında yer alan birkaç uçağın pilotunu da temsil eden birer bilgisayar sistemde yer alır. Değerlendirme ve karşılaştırma süreci, aynı noktada çakışma riski bulunan üç farklı uçağın, çakışmayı önleyici manevralarla farklı zamanlarda ve farklı sapma (kurtarma) açılarıyla yönlendirilerek güvenli şekilde seyirlerini sürdürdükleri bir senaryo üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu senaryo kapsamında, uçakların ilk çakışma tespitinden itibaren ne zaman sapma manevrasına başladıkları (kurtarma açısı anı) ve bu sapma manevralarının hangi açıyla yapıldığı (kurtarma açısı) değerlendirilmeye alınmıştır. Ek olarak, uçakların orijinal rotalarına ne zaman ve hangi açıyla döndükleri (rotaya dönüş anı ve rotaya dönüş açısı) de dikkate alınmıştır. Bu dört temel parametreye ek olarak, her bir uçuş için toplam uçuş süresi ve katedilen toplam mesafe hesaplanarak karşılaştırma yapılmıştır.

İlk aşamada, ESCAPE uçuş simülatörü kullanılarak insan kontrolörünün bilgi ve tecrübesine dayalı kararlarla yönlendirdiği uçuş verileri elde edilmiştir. İkinci aşamada ise, aynı başlangıç koşulları altında, geliştirilen sezgisel algoritma ile en uygun kurtarma ve dönüş stratejileri belirlenmiştir. Geliştirilen karar destek sistemi ile kontrolöre kıyasla daha verimli çözümler elde edilip edilemediği analiz edilmiştir. Son aşamada ise daha iyi sonuçlar elde etme potansiyeli doğrultusunda metasezgisel bir yaklaşım olan genetik algoritma geliştirilmiş ve sonuçlar kıyaslanmıştır.

Aşağıdaki tablolar, her iki yaklaşım için uçak bazlı parametreleri ve performans çıktılarını içermektedir.

Tablo 3

## ESCAPE Uçuş Simülatörü Sonuçları

Uçak Numarası	Rotaya Dönüş Anı (sn)	Rotaya Dönüş Açısı (°)	Toplam Uçuş Süresi (Sn)	Katedilen Toplam Mesafe (NM)
1	693	13	1585	202,24
2	708	14	1585	202,24
3	720	14	1585	202,24
				606,72

Örnek olarak Uçak 1, 693. saniyede 13 derecelik açıyla rotasına geri dönmeye başlamıştır ve 202,24 NM yol katetmiştir.

Tablo 4

## Önerilen Sezgisel Yaklaşımla Elde Edilen Sonuçlar

Uçak Numarası	Rotaya Dönüş Anı (sn)	Rotaya Dönüş Açısı (°)	Toplam Uçuş Süresi (Sn)	Katedilen Toplam Mesafe (NM)
1	680	12	1580	201,48
2	702	13	1583	201,89
3	700	13	1581	201,27
				604,63

Önerilen sezgisel algoritma ile ise aynı çakışma önleyici manevraların önerildiği senaryoda uçakların yörüngelerine daha erken (%0,234) ve az farklı açılarla döndürülerek, katedilen toplam mesafenin daha kısa (%0,344) olabildiği görülmektedir.

Tablo 5

## Metasezgisel Algoritma ile Elde Edilen Sonuçlar

Uçak Numarası	Rotaya Dönüş Anı (sn)	Rotaya Dönüş Açısı (°)	Toplam Uçuş Süresi (Sn)	Katedilen Toplam Mesafe (NM)
1	329	3,9	1579	201,45
2	89	15,9	1573	200,69
3	201	9,8	1581	201,27
				603,41

Önerilen metasezgisel algoritma ile ise aynı çakışma önleyici manevraların önerildiği senaryoda uçakların yörüngelerine daha erken (%0,463) ve az farklı açılarla döndürülerek, katedilen toplam mesafenin daha kısa (%0,545) olabildiği görülmektedir.

Tablo 6

## Simülasyon, Sezgisel ve Metasezgisel Algoritmaların Performans Karşılaştırması- Elde Edilen Sonuçlar

Uçak Numarası	Simülasyon		Sezgisel Algoritma		Metasezgisel Algoritma	
	Toplam Uçuş Süresi (sn)	Katedilen Toplam Mesafe (NM)	Toplam Uçuş Süresi (sn)	Katedilen Toplam Mesafe (NM)	Toplam Uçuş Süresi (sn)	Katedilen Toplam Mesafe (NM)
1	1585	202,24	1580	201,48	1579	201,45
2	1585	202,24	1583	201,89	1573	200,69
3	1585	202,24	1581	201,27	1581	201,27
Toplam		606,72		604,63		603,41

Tablo 6’da simülasyon, sezgisel algoritma ve metasezgisel algoritma yaklaşımları kullanılarak elde edilen toplam uçuş süresi ve kat edilen toplam mesafe değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Görüldüğü üzere gerçek simülasyon verileri ile aynı veriler kullanılarak önerilen yaklaşımla manevra sonrası dönüş kararları verildiğinde; sezgisel algoritma için 2 ile 5 sn arasında değişen sürelerde, metasezgisel algoritma ile ise 4 ile 12 sn. arasında değişen sürelerde daha çabuk rotaya geri döndürme kararı alınmaktadır. Bu durum hava sahasında aynı anda yüzlerce uçağın olduğu ve bir uçağın bir saniyede aldığı mesafe düşünüldüğünde önemli bir yakıt tasarrufunu yine güvenli bir uçuş sahasında kalarak kazanmak demektir. Tablo 7 ise sezgisel algoritmalar için çözüm sürelerini vermektedir.

Tablo 7

## Sezgisel ve Metasezgisel Algoritmaların Çözüm Süreleri

Uçak sayısı	Matematiksel Model	Sezgisel Algoritma (ort. sn)	Metasezgisel Algoritma (ort. sn)
3	Çözüm bulunamamıştır.	2	7
4	Çözüm bulunamamıştır.	3	8

Problemin farklı özelliklerde doğrusal olmayan denklemler ve tamsayı değişkenler içeren bir yapıya sahip olması nedeniyle geliştirilen matematiksel model doğrusal olmayan modeller için bilinen çeşitli çözücülerle (GAMS BARON vb.) çözülememiştir. İlgili senaryo boyutu için metasezgisel algoritma kullanılırken popülasyon büyüklüğü 60, nesil sayısı 100, çaprazlama oranı 0.9 ve mutasyon oranı 0.08 şeklinde seçilmiştir. Çözüm süreleri her iki problem grubu için sezgisel algoritma için 1-3 saniye arasında değişirken, Metasezgisel Algoritma için 5-9 saniye arasında değişen değerler almıştır. 10’ar test için sezgisel algoritmanın çözüm süresi sırasıyla 2 ve 3 uçak için; ortalama 2-3 saniye, metasezgisel algoritmanın çözüm süresi ortalama 7-8 saniye olarak elde edilmiş olup Tablo 7’de verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, metasezgisel algoritmanın hem toplam uçuş süresi hem de kat edilen toplam mesafe açısından daha düşük değerleri üreterek diğer yaklaşımlara kıyasla daha verimli çözümler sağladığı görülmektedir. Gerçek simülasyon verilerinden 3 uçak boyutunda veriler alınabilmiş, ancak sezgisel ve metasezgisel algoritmalar 4 uçak için de çalıştırılmıştır. Havayolu trafiğinde segment kavramı ile hava sahası alt parçalara bölünebilmekte ve her segmentte çakışma problemi kendi içinde çözülebilmektedir. Bu nedenle bir segmente denk gelecek uçak sayısı tüm hava sahası gözetildiğinde sınırlı sayıda beklenmekte olup hava sahasından sorumlu

olan kontrolörlerin de kendi sorumluluk alanları (segmentleri) ayrıdır. Ancak önerilen yaklaşım, daha çok sayıda uçağı dikkate alarak birden fazla segmenti de çözebilme özelliğine sahiptir.

Sonuç olarak geliştirilen sistem, insan kontrolörüne yardımcı olabilecek şekilde uçuş güvenliği ve verimliliğini birlikte ele alan bir karar destek sistemi sunmaktadır. Bu yönüyle hava trafik kontrol uygulamaları için esnek, ölçeklenebilir ve pratik bir araç olma potansiyeli taşımaktadır.

## 5. Sonuçlar

Bu çalışma, çakışma önleyici manevralar sonrasında uçakların kendi planlı rotalarına yakıt tüketimini en aza indirecek şekilde güvenli biçimde geri dönüşünü sağlayan yenilikçi bir karar destek sistemi sunmaktadır. Geliştirilen sistem, hem teorik düzlemde bir matematiksel model hem de pratik düzlemde sezgisel ve metasezgisel algoritmalarla desteklenmiş bir bilgi sistemi içermektedir. Çalışmanın temel amacı, hava trafik kontrolörlerinin çakışma sonrası yönlendirme kararlarını eniyileyerek hem uçuş emniyetini artırmak hem de operasyonel ve çevresel maliyetleri azaltmaktır.

Bu kapsamda geliştirilen matematiksel model, çakışma riski taşıyan uçaklar için dönüş zamanı ve dönüş açısını belirlemeye yönelik olarak mesafe, hız, yön ve güvenlik çemberi gibi parametreleri dikkate alan doğrusal olmayan bir yapıdadır. Bu yapı sebebiyle optimal çözümler elde edilememiş ve modelin çözümünün büyük veri setlerinde yüksek işlem gücü gerektirmesi nedeniyle çözüm sürecini hızlandıracak sezgisel bir algoritma tasarlanmıştır. Bu algoritma, çakışma durumunu tespit edip önleyici manevra önerisinden sonra uygun olan en erken zamanda uçakların güvenli biçimde rotaya dönmelerini sağlayacak şekilde yapılandırılmıştır.

Söz konusu sezgisel algoritma, Python programlama dili ile geliştirilmiş ve kullanıcı dostu bir arayüzle entegre edilerek sistemin görsel, metinsel ve sayısal çıktılarıyla desteklenmesi sağlanmıştır. Sistem, her uçak için potansiyel çakışmaları her 5 saniyede bir analiz ederek yalnızca kısıtların sağlandığı durumlarda müdahalede bulunmakta ve böylece gereksiz manevraların önüne geçmektedir. Bu yönüyle sistem, operasyonel karar süreçlerini sadeleştirmekte ve kontrolörün yükünü azaltmaktadır.

Çalışmanın en dikkat çekici yönlerinden biri, geliştirilen yaklaşımların performansının ESCAPE uçuş simülatörü sonuçları ile kıyaslanmasıdır. ESCAPE simülatöründe insan kontrolörleri tarafından verilen kararlar, sezgisel ve metasezgisel algoritmaların sunduğu önerilerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler, sezgisel algoritmanın uçakları rotalarına ortalama %0,23 daha erken ve %0,34 daha kısa mesafeyle, metasezgisel algoritmanın ise uçakları rotalarına ortalama %0,55 daha erken ve %0,46 daha kısa mesafeyle yönlendirdiğini ortaya koymuştur. Bu da yalnızca zaman ve mesafe açısından değil, yakıt tüketimi ve

karbon emisyonu açısından da anlamlı bir iyileşme sağlayabileceği öngörülmektedir. Örneğin, kontrolör kararıyla yönlendirilen Uçak 1'in 202,24 NM mesafe kat ettiği senaryoda, sezgisel algoritma tarafından önerilen çözümde bu değer 201,48 NM'ye düşmüştür. Ayrıca metasezgisel algoritmanın önerdiği Uçak 2'nin yalnızca 89. saniyede 15,9° ile dönüş kararı alması, sistemin ne denli erken ve etkili kararlar verebildiğini göstermektedir. Her ne kadar bu iyileştirmeler görece küçük görünse de hava sahasında aynı anda bulunan çok sayıda uçak dikkate alındığında toplam etki oldukça anlamlı olmaktadır.

Bu çalışmanın literatürdeki benzerlerinden farkı, yalnızca çakışmayı önleme değil, çakışma sonrası süreci yakıt tüketimi perspektifiyle eniyileme yaklaşımıyla ele almasıdır. Literatürde çakışma önleme üzerine yapılan çalışmalar yaygınken çakışma sonrası rotaya dönüş ve bu sürecin çevresel ve operasyonel etkileri genellikle göz ardı edilmektedir.

Literatürdeki yaygın gözlemler ve operasyonel veriler, pilotların ve hava trafik kontrolörlerinin çakışma önleme süreçlerinde yatay manevraları (vektörleme ve hız değişikliği), dikey manevralara (irtifa değişikliği) tercih ettiğini göstermektedir. Yatay düzlemdeki modelleme, yakıt tasarrufu ve emniyet mesafelerinin korunması açısından daha yüksek derecede özgürlük sunarken, operasyonel karmaşıklığı da azaltmaktadır. Bu çalışmada kullanılan 2 boyutlu yaklaşım, uçağın rotaya dönüş sürecini güvenilir bir şekilde temsil etmekte ve yakıt optimizasyonu sürecini net bir şekilde analiz etmemize olanak tanımaktadır.

Çalışmanın bir diğer katkısı, havacılık sektöründe sürdürülebilirlik hedeflerine destek sunmasıdır. Uçuş süresi ve mesafesinde sağlanan her birimlik tasarruf, karbon emisyonunun azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Bu doğrultuda sistem, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları arasında yer alan "Erişilebilir ve Temiz Enerji" hedefine de hizmet eden önemli bir çözüm önerisi olarak değerlendirilebilir.

Gelecekteki çalışmalarda, önerilen bu modelin 3 boyutlu hava sahası yapıları için genişletilmesi ve irtifa değişikliklerinin yakıt optimizasyonu sürecine entegre edilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, farklı çevresel etkilerin belirsizlikleri ve çoklu uçak çatışma senaryolarının bu üç boyutlu model üzerindeki etkileri, sistemin operasyonel dayanıklılığını daha da ileriye taşıyacak araştırma konuları olarak öne çıkmaktadır.

## **Teşekkür**

Bu çalışma ESOGU BAP (FLO-2025-3530) kapsamında desteklenmiştir.

## Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Elifnur AKTÜRK, literatür araştırması, matematiksel modelin kurulması, geliştirilmesi ve çözdürülmesi, sezgisel ve metasezgisel algoritmanın geliştirilmesi, kodlanması, bilgi sistemi tasarımı, makalenin yazımı; Beyza ALDANMAZ, literatür araştırması, matematiksel modelin kurulması, geliştirilmesi ve çözdürülmesi, sezgisel ve metasezgisel algoritmanın geliştirilmesi, kodlanması, bilgi sistemi tasarımı, makalenin yazımı; Şevin TUĞCU, literatür araştırması, matematiksel modelin kurulması, geliştirilmesi ve çözdürülmesi, sezgisel ve metasezgisel algoritmanın geliştirilmesi, kodlanması, bilgi sistemi tasarımı, makalenin yazımı, Müjgan SAĞIR problemin belirlenmesi, literatür araştırması, matematiksel modelin kurulması, geliştirilmesi ve çözdürülmesi, bilgi sistemi tasarımı, sezgisel ve metasezgisel algoritmanın geliştirilmesi ve makalenin yazımı konularında katkı sağlamışlardır.

## Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

## Kaynaklar

- 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: <https://doi.org/10.1007/s11750-015-0373-0>
- Borjigin, S., ve Austin, M. (2024). Multi-domain semantic model and real-time planning approach to safe and efficient airport taxiway operations. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. Doi: <https://doi.org/10.1109/TITS.2024.3354242>
- Bowe, A. R., ve Santiago, C. H. (2012). *A fuel-efficient conflict resolution maneuver for air traffic control*. NASA. Erişim adresi : <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20130010956/downloads/20130010956.pdf>
- Cai, J., ve Zhang, N. (2019). Mixed integer nonlinear programming for aircraft conflict avoidance by applying velocity and altitude changes. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(10), 8893–8903. Doi: <https://doi.org/10.1007/s13369-019-03911-w>
- Cai, Y., ve Zhang, Y. (2019). Fuel-efficient conflict resolution with speed and altitude changes. *Journal of Aerospace Information Systems*, 16(6), 235–248. Doi: <https://doi.org/10.2514/1.1010738>
- Çeçen, R. K. (2021a). A mixed integer linear programming approach for aircraft conflict detection and resolution problem. *Uluslararası Mühendislik*

*Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 13(2), 350-358. Doi: <https://doi.org/10.29137/umagd.736065>

Costea, M.-L., Nae, C., Apostolescu, N., Costache, F., Andrei, I.-C., Stroe, G.-L., ve Semenescu, A. (2020). Automatic aircraft collisions algorithm development for civil aircraft. In *2020 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)* (pp. 98-103). Doi: <https://doi.org/10.1109/ACIT49673.2020.9208865>

Deng, W., Zhang, L., Zhou, X., Zhou, Y., Sun, Y., Zhu, W., Chen, H., Deng, W., Chen, H., ve Zhao, H. (2022). Multi-strategy particle swarm and ant colony hybrid optimization for airport taxiway planning problem. *Information Sciences*. Erişim adresi : <https://www.sciencedirect.com/>

Dias, F., ve Rey, D. (2024). Aircraft conflict resolution with trajectory recovery using mixed-integer programming. *Journal of Global Optimization*, 90(4), 1031-1067. <https://doi.org/10.1007/s10898-024-01393-1>

Dönmez, K., Aydoğan, E., Çetek, C., ve Maraş, E. E. (2023). The impact of taxiway system development stages on runway capacity and delay under demand volatility. *Aerospace*, 10(1), 6. Doi: <https://doi.org/10.3390/aerospace10010006>

Dudoit, A., Rimša, V., Bogdevičius, M., ve Skorupski, J. (2022). Effectiveness of conflict resolution methods in air traffic management. *Aerospace*, 9(2), 112. Doi: <https://doi.org/10.3390/aerospace9020112>

Federal Aviation Administration. (2021). *Aeronautical Information Manual*. Erişim adresi : [https://www.faa.gov/air\\_traffic/publications/atpubs/aim.html/](https://www.faa.gov/air_traffic/publications/atpubs/aim.html/)

Goldberg, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Reading, MA: Addison-Wesley.

Haupt, R. L. ve Haupt, S. E. (2004). *Practical genetic algorithms*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

Hwang, I., Kim, J., ve Tomlin, C. (2007). Protocol-based conflict resolution for air traffic control. *Air Traffic Control Quarterly*, 15(1), 1-34. Doi: <https://doi.org/10.2514/ATCQ.15.1.1>

International Civil Aviation Organization. (2022). *Procedures for Air Navigation Services: Air Traffic Management (Doc 4444)*. International Civil Aviation Organization. Erişim adresi : <https://www.icao.int/>

Jamal, M., Ashraf, H., ve Jhanjhi, N. Z. (2023). Machine learning-based aircraft conflict prediction: A systematic literature review. *Preprints*. Doi: <https://doi.org/10.20944/preprints202312.1600.v1>

- Jiang, X., ve Hao, P. (2024). Hub airport end-around taxiway construction planning development: A review. *Applied Sciences*, 14(8), 3500. Doi: <https://doi.org/10.3390/app14083500>
- Khadilkar, H., ve Balakrishnan, H. (2011a). Estimating the impact of air traffic flow management initiatives on fuel consumption and emissions. In *AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*. Erişim adresi : <https://arc.aiaa.org/>
- Kopardekar, P., Bilimoria, K., ve Sridhar, B. (2009b). Initial concepts for airspace configuration and traffic flow management under NextGen. In *AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*. Erişim adresi : <https://arc.aiaa.org/>
- Lehouillier, T., Nasri, M. I., Soumis, F., Desaulniers, G., ve Omer, J. (2017). Solving the air conflict resolution problem under uncertainty using an iterative biobjective mixed integer programming approach. *Transportation Science*, 51(4), 1242–1258. Doi: <https://doi.org/10.1287/trsc.2016.0714>
- Li, J., Zhang, H., Gong, M., Liang, Z., Liu, W., Tong, Z., Yi, L., Morris, R., Pasareanu, C., ve Koenig, S. (2019). Scheduling and airport taxiway path planning under uncertainty. In *AIAA Aviation 2019 Forum*, 2930. Doi: <https://doi.org/10.2514/6.2019-2930>
- Liu, X., ve Xiao, G. (2023). Multi-aircraft flight conflict resolution and trajectory recovery scheme based on mixed integer linear programming and geometric rules. *Transportation Research Record*, 2677(2), 411–423. Doi: <https://doi.org/10.1177/03611981221128811>
- Omer, J. (2015a). A space-discretized mixed-integer linear model for air-conflict resolution with speed and heading maneuvers. *Computers & Operations Research*, 58, 75–86. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.12.012>
- Omer, J. (2015b). Comparison of mixed-integer linear models for fuel-optimal air conflict resolution with recovery. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(6), 3126–3137. Doi: <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2434942>
- Özdemir, M. (2024). *Hava trafik kontrolde ayırma yöntemlerinin uçak emisyonları üzerindeki etkisinin optimizasyonu* (Yüksek lisans tezi). Eskişehir Teknik Üniversitesi.
- Paielli, R. A., ve Erzberger, H. (1997). Conflict probability estimation for free flight. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 20(3), 588–596. Doi: <https://doi.org/10.2514/2.4081>
- Pant, K. A., Lin, L.-Y., Sribunma, W., Brunswicker, S., Goppert, J. M., ve Hwang, I. (2025). *SAFE-TAXI: A hierarchical multi-UAS safe auto-taxiing framework with runtime safety assurance and conflict resolution*. arXiv. Erişim adresi : <https://arxiv.org/abs/2501.12779>

- Reynolds, T. (2014). Fuel efficiency in modern air transport. *Journal of Air Transport Management*, 37, 1-9. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2014.02.002>
- SKYbrary. (2022). *Aircraft conflict types*. Erişim adresi : <https://skybrary.aero/articles/aircraft-conflict-types>
- Srivastava, A., Tomlin, C., ve Erzberger, H. (2022). Efficient heading change strategies for aircraft conflict resolution. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 45(3), 456-468. Doi: <https://doi.org/10.2514/1.G006541>
- Sun, F., Chen, Y., Xu, X., Mu, Y., ve Wang, Z. (2022). Velocity obstacle-based conflict resolution and recovery method. *The Aeronautical Journal*, 126(1295), 345-364. Doi: <https://doi.org/10.1017/aer.2021.67>
- Tian, J., Liu, J., Ma, W. ve Poznyak, A. (2018). Multi-objective genetic algorithm for aircraft conflict resolution problem. *International Journal of Systems Science*, 49(14), 2883-2899. Doi: <https://doi.org/10.1080/00207721.2018.1524108>
- Zhang, J., ve Yu, P. (2024). Research on airport runway-taxiway system controlling optimization based on scheduling algorithm. In *Proceedings of SPIE 13251, Seventh International Conference on Traffic Engineering and Transportation System (ICTETS 2024)*, 1325135. Doi: <https://doi.org/10.1117/12.3039849>
- Zhang, M., Yu, J., Zhang, Y., Wang, S., ve Yu, H. (2017). Flight conflict resolution during low-altitude rescue operation based on ensemble conflict models. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(4). Doi: <https://doi.org/10.1177/1687814017696655>
- Zhang, T., Ding, M., Wang, B., ve Chen, Q. (2016). Conflict-free time-based trajectory planning for aircraft taxi automation with refined taxiway modeling. *Journal of Advanced Transportation*, 50(7), 1344-1360. Doi: <https://doi.org/10.1002/atr.1324>
- Zhao, N., Li, N., Sun, Y., ve Zhang, L. (2021). Research on aircraft surface taxi path planning and conflict detection and resolution. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, 9951206. <https://doi.org/10.1155/2021/9951206>
- Zhao, P., ve Liu, Y. (2020). Efficient multiple aircraft conflict resolution using A algorithm and indexing method. In *AIAA Aviation 2020 Forum\**. Doi: <https://doi.org/10.2514/6.2020-2918>
- Zhu, X., Xu, C., Qu, J., ve Su, T. (2022). Design and simulation-based evaluation of taxiway operation scheme for multi-runway airport maneuvering area. *Journal of System Simulation*, 34(11), 2448-2457. Doi: <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0789>