



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Jenerik serbest rotalı hava sahasında kesikleştirme tekniği kullanılarak çakışmaların çözümlenme problemi için karma tamsayılı doğrusal programlama modeli

A mixed-integer linear programming model for conflict resolution using airspace discretization technique in a generic free route airspace

Yazar(lar) (Author(s)): Zekeriya KAPLAN¹, Cem ÇETEK², Tuğba SARAÇ³

ORCID¹: 0000-0001-8555-4579

ORCID²: 0000-0002-2162-511X

ORCID³: 0000-0002-8115-3206

To cite to this article: Kaplan Z., Çetek C. ve Saraç T., “Jenerik serbest rotalı hava sahasında kesikleştirme tekniği kullanılarak çakışmaların çözümlenme problemi için karma tamsayılı doğrusal programlama modeli”, *Journal of Polytechnic*, 27(4): 1427-1440, (2024).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Kaplan Z., Çetek C. ve Saraç T., “Jenerik serbest rotalı hava sahasında kesikleştirme tekniği kullanılarak çakışmaların çözümlenme problemi için karma tamsayılı doğrusal programlama modeli”, *Politeknik Dergisi*, 27(4): 1427-1440, (2024).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1293137

Jenerik Serbest Rotalı Hava Sahasında Kesikleştirme Tekniği Kullanılarak Çakışmaların Çözümleme Problemi için Karma Tamsayı Doğrusal Programlama Modeli

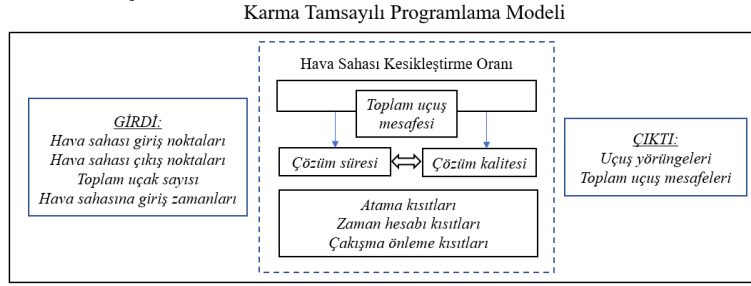
A Mixed-Integer Linear Programming Model for Conflict Resolution Using Airspace Discretization Technique in a Generic Free Route Airspace

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Yol safhası uçuşlarında hava trafik yönetimi / Air traffic management in en-route flights
- ❖ Serbest rotalı hava sahasında çakışma çözümleme / Conflict resolution in free-route airspace
- ❖ Jenerik hava sahası için kesikleştirme tekniği / Airspace discretization technique for generic airspace
- ❖ Karma tamsayı doğrusal programlama modeli / Mixed integer linear programming model
- ❖ Çözüm süresi ve çözüm kalitesi ödünleşmesi / Tradeoff between solution quality and solution time

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada jenerik bir hava sahasında kesikleştirme tekniği kullanılarak uçaklar arasındaki çakışmaları çözen bir matematiksel model önerilmiştir.



Şekil. Modelin akış şeması / Figure. Flow diagram of the model

Amaç (Aim)

Çalışmanın amacı uçaklar arasındaki potansiyel çakışmaları çözümüyle giriş ve çıkış noktaları arasındaki uçuş yörüngelerini belirlemek ve hava sahası kesikleştirme oranının artırılması durumunda elde edilen çözüm kalitesi ile çözüm süresi arasındaki ödünleşmeyi irdelemektir. / The aim of the study is to determine the flight trajectories between the entry and exit points by resolving the potential conflicts between the aircraft and to examine the trade-off between the solution quality and the resolution time obtained in case of increasing the airspace discretization.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Matematiksel model Python ortamında kodlanmıştır. Testler Gurobi çözücüsü kullanılarak yapılmıştır. / The mathematical model is coded in Python environment. Tests were performed using Gurobi solver.

Özgünlük (Originality)

Farklı model ve yöntemlerin performanslarının daha nesnel şekilde karşılaştırılabilmesi için jenerik hava sahası kesikleştirme yaklaşımı sunulmuştur. Ayrıca çözüm sürelerini azaltmak için bir çözüm yaklaşımı sunulmuştur. / A generic airspace discretization approach is presented in order to compare the performances of different models and methods more objectively. In addition, a solution approach is presented to reduce solution times.

Bulgular (Findings)

Belirli kesikleştirme oranından sonra çözüm süresinde önemli artışına karşın aynı oranda çözüm kalitesi iyileşmesi olmamıştır. / Despite the significant increase in solution time after a certain discretization rate, there was no improvement in solution quality at the same rate.

Sonuç (Conclusion)

Hava sahası kesikleştirme oranının artırılması belirli bir orandan sonra çözümlerde sınırlı iyileşmeleri sağlamaktadır. Önerilen yaklaşım ile çözüm sürelerinde azalma olmuştur. / Increasing the airspace discretization rate provides limited improvements in solutions after a certain rate. With the proposed approach, solution times is reduced.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Jenerik Serbest Rotalı Hava Sahasında Kesikleştirme Tekniği Kullanılarak Çakışmaların Çözümleme Problemi için Karma Tamsayı Doğrusal Programlama Modeli

Araştırma Makalesi / Research Article

Zekeriya KAPLAN^{1*}, Cem ÇETEK², Tuğba SARAÇ³

¹Sivil Havacılık Yüksek Okulu, Hava Trafik Kontrolü Bölümü, Samsun Üniversitesi, Türkiye

²Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Hava Trafik Kontrolü Bölümü, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Türkiye

³Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 05.05.2023 ; Kabul/Accepted : 17.07.2023 ; Erken Görünüm/Early View : 03.09.2023)

ÖZ

Bu çalışmada, jenerik serbest rotalı hava sahasında, uçaklar arasındaki çakışmaları belirlemek ve çözmek amacıyla bir karma tamsayı doğrusal programlama (MILP) modeli önerilmiştir. Model, toplam uçuş mesafesinin enküçüklenmesini hedeflemektedir. Önerilen çözüm yaklaşımında, hava sahası kesikleştirme tekniği kullanılarak emniyet ayırmaları kontrol edilmekte ve uçuş yörüngeleri belirlenmektedir. Hava sahasının kesikleştirilmesi aşamasında çok fazla düğüm tanımlanması, kaliteli çözümlere ulaşılması fırsatı yaratmasına rağmen problem karmaşıklığını ve dolayısıyla çözüm süresini de artırmaktadır. Bu nedenle, çalışmada ilgili hava sahası düşük, orta ve yüksek düğüm sayıları içerecek şekilde kesikleştirilmiş ve kesikleştirme oranının (hava sahasının içerdiği düğüm sayısının) çözüm süresi ve kalitesine etkisi incelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar, orta kesikleştirme oranı kullanıldığında, düşüğe kıyasla ciddi bir çözüm kalitesi artışının, kabul edilebilir bir çözüm süresi içinde sağlanabildiğini ancak yüksek orana geçildiğinde önemli bir çözüm süresi artışına karşın aynı oranda çözüm kalitesi iyileşmesi sağlayamadığını ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Karma tamsayı doğrusal programlama, Çakışma çözümleme, Serbest rotalı hava sahası, Hava sahası kesikleştirme, Hava trafik yönetimi.

A Mixed-Integer Linear Programming Model for Conflict Resolution Using Airspace Discretization Technique in a Generic Free Route Airspace

ABSTRACT

In this study, a mixed-integer linear programming (MILP) model is proposed to detect and resolve conflicts between aircraft in a generic free route airspace while minimizing the total flight distance. The proposed solution approach uses airspace partitioning technique to control safety separations and determine flight trajectories. However, defining too many nodes during the airspace partitioning phase allows for achieving high-quality solutions but also increases problem complexity and computation time. Therefore, the impact of the partitioning rate (number of nodes in the airspace) on the solution quality and time is investigated by partitioning the airspace into low, medium, and high node numbers. The experimental results indicate that a medium partitioning rate can achieve a significant improvement in solution quality within an acceptable computation time compared to a low rate, while a high partitioning rate results in a significant increase in computation time without providing an equivalent improvement in solution quality.

Keywords: Mixed-integer linear programming (MILP), Conflict resolution, Free route airspace, Airspace discretization, Air traffic management.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hava trafik yoğunluğu sürekli olarak artış göstermektedir ve daha emniyetli ulaşım sağlamak için hava trafiği yönetimine yönelik optimizasyon araçlarının kullanımı giderek daha gerekli hale gelmektedir. Bu bağlamda önemli ve temel bir hava ulaşımı problemi olan uçakların hava sahasında diğer uçaklarla çakışmayacak şekilde

nasıl bir rota ile uçacaklarının belirlenmesi giderek ilgi kazanmıştır. Bu problem, belirli bir hava sektöründeki uçaklar için tüm çakışma durumlarından kaçınılacak şekilde yeni bir eylem planı sağlamayı amaçlamaktadır. Çakışma durumu, iki veya daha fazla uçağın uçuş sırasında sürdürmesi gereken standart emniyet mesafelerini ihlal ettiği bir olayı ifade eder. Çakışmaların önlenmesi için, seviye değiştirme, hız değiştirme,

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : zekeriya.kaplan@samsun.edu.tr

vektör manevrası, rota değiştirme gibi yöntemler kullanılmaktadır.

Çalışmalarda uçakların hava sahasının her noktasına gidebilecekleri kabul edilebildiği gibi hava sahası kesikli hale getirilerek uçakların geçebileceği noktalar sınırlandırılmaktadır. Bu teknik, problemin karmaşıklığının ve çözüm süresinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Ancak yeterince düğüm tanımlanmaz ise çözüm kalitesinin düşmesi de kaçınılmazdır. Bu nedenle hava sahası kesikleştirme tekniği kullanıldığında, uygun bir kesikleştirme oranının belirlenmesi önemlidir.

Literatürde yol safhası operasyonlarını ve uçak arasındaki çakışma çözümlemesini dikkate alan çalışmalardan erişilebilenler incelenmiştir. Bu çalışmalarda problemin çözümü için çeşitli matematiksel modeller ve algoritmalar önerilmiştir. Çeçen ve Çetek [1], uçuş güzergahı operasyonlarında uçak çakışma çözümleriyle başa çıkmak için uzay kesikleştirme tekniği kullanarak bir karma tamsayılı doğrusal programlama modeli (MILP) sunmuşlardır. Model, giriş noktalarındaki ve hava hızı değerlerindeki toplam değişiklikleri en aza indirirken çakışmasız yörüngeler oluşturmayı amaçlamaktadır. Giriş noktası ve hava hızı atamalarının, hava sahasına girmeden önce 20 deniz mili (nm) bir mesafe içinde gerçekleştirildiği varsayılmaktadır. Problemin karmaşıklığı sebebiyle daha kısa sürede uygulanabilir çözümler elde etmek için çalışmada bir sezgisel algoritma geliştirmişlerdir.

Çeçen ve Çetek [2], serbest-rotalı hava sahasında uçaklar arasındaki çakışmayı çözümlenmek amacıyla iki aşamalı bir çözüm yaklaşımı benimsemişlerdir. İlk aşamada çakışmaları çözümlenerek uçakların hava sahasına giriş noktalarını yeniden atamışlardır. İkinci aşamada ise uçakların almış oldukları gecikmeleri karşılayacak vektör manevrasını belirlemişlerdir. İlk aşamada amaç toplam gecikmenin enküçüklenmesi iken ikinci aşamada amaç vektör manevrasındaki toplam yakıt tüketiminin enküçüklenmesidir. Çözüm yaklaşımı olarak matematiksel modelleme yanında genetik ve yasaklı arama metasezgisel algoritmalarını kullanmışlardır. Çeçen vd. [3], hava sahası sınırları içinde önceden tanımlanmış bir tampon bölgede irtifa veya baş açısı değiştirme manevralarını kullanarak uçaklar arasında çakışmaları çözümlenerek iki aşamalı bir model ve tavlama benzetimi algoritması önermişlerdir.

Pallottino vd. [4], uçak çakışma çözümü için trigonometrik fonksiyonları içeren geometrik bir yapıya dayanan iki farklı karma tamsayılı doğrusal programlama (MILP) modeli sunmuştur. İlk modelde çakışma çözümlenmek için uçaklar baş açısı değiştirme manevrası kullanırken ikincisinde hız değiştirme manevrasını kullanmaktadır. Modellerde toplam uçuş süresini enküçüklemeyi hedeflemiştir. Alonso-Ayuso vd. [5], bir önceki çalışmanın geometrik yapı modelini irtifa değiştirme manevrasını da ekleyerek geliştirmiştir. Toplam hız ve irtifa değişikliği manevra sayısı ile hız değişimi oranını enküçüklemeyi amaçlamışlardır. Ayrıca çakışma olmayan uçakları orijinal uçuş

konfigurasyonuna dönmeye zorlamışlardır. Herhangi iki uçak arasındaki çakışmayı tespit etmek ve çözümlenmek için iki farklı 0-1 doğrusal tamsayılı model önermişlerdir. İlk model de uçakların yalnızca irtifa değişikliği manevrası, ikinci modelde ise hem irtifa değişikliği hem de hız değişikliği manevraları ile uçaklar arasındaki çakışma çözümlenmiştir [6].

Alonso-Ayuso vd. [7], hız değişimi manevralarını kullanan ve uçağın hızlanma oranlarını hesaba katan bir karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama (MINLP) model geliştirmişlerdir. Bu modelde, çakışma çözümü sırasında uçağın hızlanma oranlarını enküçüklemeyi hedeflemiştir. Alonso-Ayuso vd. [8], çakışmaları çözümlenmek için uçakların baş açısı değişikliği manevrasına izin veren ve orijinal rotalarına dönemlerine zorlayan bir MINLP model önermişlerdir. Ayrıca, uçaklar arasındaki çakışmaları çözümlenmek için baş açısı değişikliği, irtifa değişikliği ve hız değişikliği manevralarından herhangi birinin uygulanabilmesi yaklaşımı ile trigonometrik fonksiyonlar içeren bir model geliştirmişlerdir. Hedef programlama kullanılarak birden fazla amacın ele alındığı çalışmada kısa sürede çözümler elde etmek için sıralı karma tamsayılı doğrusal optimizasyon metasezgisel yaklaşımını da önerilmiştir. Bu yaklaşım ile elde edilen çözümlerin kalitesini değerlendirmek için matematiksel modelin sonuçları ile kıyaslama yapılmıştır [9]. Metasezgisel çözüm yaklaşımı kullanılarak Hong vd. tarafından yapılan diğer bir çalışmada Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritması önerilmiştir. Hem baş açısı değişikliği hem de hız değişikliği manevralarını yapmalarına izin verilen çalışmada uçakların orijinal rotalarından sapma süreleri enküçüklenmiştir [10].

Christodoulou ve Costoulakis [11], hem baş açısı değişikliği hem de hız değişikliği manevralarını aynı anda kullanarak uçaklar arasındaki çakışmaları çözümlenerek bir MILP model geliştirmişlerdir. Küçük boyutlu problemler için çözüm elde etmişlerdir. Vela vd. [12], önceden tanımlanmış rotalar üzerinde hız kontrolü ve irtifa değişikliği yaparak uçaklar arasında çakışmaları çözümlenerek bir MILP model geliştirmişlerdir. Yakıt tüketimini enküçüklemeye amaçlayan model potansiyel çakışma noktalarını belirleyerek çözüm üretmektedir. Bu noktalarda kesişen rotaların geometrilerine ve uçakların hızlarına göre gerekli ayırma zamanları ayrı ayrı hesaplatılmıştır Vela vd. [13], tarafından yapılan bir diğer çalışmalarında ise çakışmaları çözümlenmek için baş açısı değişikliği ve hız değişikliği manevralarını kullanan bir MILP model geliştirilmiştir.

Cafieri ve Durand [14], çakışmaları önlemek için hız değişikliği manevrasını kullanan bir MINLP model önermişlerdir. Problemin karmaşıklığından dolayı yeni bir sezgisel yaklaşım geliştirmişlerdir. Cafieri ve Rey [15], bir önceki çalışmadan farklı bir MINLP modeli sunmuşlardır. En büyük çakışmasız uçak setini elde etmeyi ve hız değişikliği manevralarını kullanarak çözümlenerek çakışmaların sayısını en üst düzeye çıkarmayı amaçlamışlardır. Modelin performansını iyileştirmek için, olası çakışmaları belirlemek için bir ön işleme

algoritması uygulanmıştır. Ayrıca Cafieri ve Omhene [16], baş açısı değişikliği ve hız değişikliği manevralarını sırayla kullanan başka bir MINLP modeli sunmuştur. Sonuçlar bu iki manevranın birleştirilmesinin çakışma çözümlenmeye katkı sağladığını göstermiştir. Omer [17], yakıt tüketimini ve havadaki gecikmeyi enküçüklemek için baş açısı değişikliği ve hız değişikliği manevralarını kullanan üç tane MILP modeli sunmuştur. İlk modelde hava çakışmalarını çözmek için bir uzay kesikleştirme tekniği kullanılmaktadır. İkinci ve üçüncü modellerde ise sırasıyla zaman ufku kesikleştirme ve zaman ayırıştırma yaklaşımları kullanılmaktadır. Modeller, uçağın bir ilk manevra yapmasına izin vermektedir.

Erzberger ve Heere [18], çalışmalarında uçakların yatay çözünürlük yörüngelerini hesaplamak için yatış açısı üst sınırı olan bir algoritma sunmuşlardır. Algoritma çakışmayı önlemek için minimum ayırmayı sağlayacak şekilde belirli bir baş açısı ve düz uçuştan oluşan bir dizi manevra üretmektedir. Hem bireysel uçakların hem de çakışmanın meydana geldiği diğer uçakların çakışma çözüm manevraları uygulanır. Yatış açısı sınırlamasından dolayı gerekli emniyet ayırması sağlanamıyorsa dönüş sırasında ayırmayı maksimize eden manevra algoritma tarafından belirlenmektedir.

Yol safhası uçuşlarının yanı sıra terminal manevra sahası (TMA) içerisinde uçakların çakışmalarını belirleyen ve çakışma olmaksızın operasyonlarını emniyetli bir şekilde gerçekleştirmelerini sağlayan matematiksel modeller, sezgisel ve metasezgisel algoritmalar literatürde yer alan çalışmalar da sunulmuştur. TMA için yapılan çalışmalardan bazıları yalnızca iniş [19]–[23], bazıları yalnızca kalkış [24], [25] operasyonlarını ele alırken bazıları da hem iniş hem de kalkış [26]–[32] operasyonlarını ele almışlardır. Bunun yanında toplama noktası sistemi (PMS) bulunan TMA içerisinde uçakların çakışma olmaksızın uçmalarını sağlayan ve çizelgelemesini yapan çalışmalar da yapılmıştır [33]–[38].

Literatürde yapılan çalışmalarda çakışmaları kontrol etmek için kullanılan teknik, potansiyel çakışmaları çözümlenme manevrası, çakışmaların hangi alanda çözümlendiği ve problemi çözmek için kullanılan yaklaşım bilgileri Tablo 1’de özetlenmiştir. Çakışmaları kontrol etmek için hava sahası kesikleştirme tekniği ve geometrik yapıya dayalı kesikleştirme tekniği kullanılmıştır. Kullanılan bu teknik ile uçakların hava sahasına giriş ve hava sahasından çıkış noktaları arasındaki en kısa mesafeli yörüngelere göre uçaklar arasındaki potansiyel çakışmalar belirlenmiştir. Çakışmaları çözümlenmek için kullanılan yaklaşımlar irtifa değişikliği, baş açısı değişikliği ve hız değişikliği manevralarından oluşmaktadır. Ancak irtifa değişikliği manevrası problemin karmaşıklığının artırması sebebiyle daha az tercih edilen bir çakışma çözümlenme yöntemi olmuştur. İrtifa değişikliği durumunda uçağın yeni irtifasında diğer uçaklarla potansiyel çakışması meydana gelebilecektir. Bu sebeple Çeçen vd. [3] irtifa değişikliğinin hava sahası girişinde 20 nm derinliğindeki bir tampon bölgede gerçekleştiğini varsaymışlardır.

Hava sahası içerisinde irtifa değişikliği manevrasını gerçekleştiren çalışmalarda ise uçakların irtifa değişikliğinden sonra yeni bir çakışma olmaksızın eski irtifalarına döndükleri kabul edilmiştir. Problemin çözümü için kullanılan çözüm yaklaşımı çoğunlukla matematiksel modelleme olmuştur. Bunun yanında bazı metasezgisel ve sezgisel yaklaşımlar da sunulmuştur.

Çalışmalarda çoğunlukla geometrik yapıya dayalı olarak potansiyel çakışma noktaları belirlenmiştir. Hava sahası kesikleştirme tekniği kullanılan çalışmaların bazılarında [1] çakışmaların hava sahası girişinde belirli bir tampon bölgede çözümlendiği kabul edilmiştir. MINLP model sunulan çalışmalarda [14] hava sahası içerisinde hız değişikliği manevrası uygulanmıştır. Baş açısı değişikliği manevrasını kullanan çalışmada [17] uçaklar hız dayalı belirli bir vektör manevrası yapmaktadırlar.

Literatürdeki çalışmalarda potansiyel çakışmalar hava sahasının herhangi bir noktasında belirlendikten sonra ve bu noktaya göre gerekli çözüm manevrası uygulanmaktadır. Bu sebeple hava sahası kesikleştirme yapısı sürekli değişim göstermektedir. Yapılan bu çalışmada, serbest rotalı hava sahasının daha sistematik bir şekilde kesikleştirme yapısına sahip olduğu bir matematiksel model sunulmuştur. Ayrıca uçaklar arasındaki çakışmalar hava sahası içerisinde bu jenerik hava sahası kesikleştirme yaklaşımı ile çözümlenmişlerdir. Uçaklar oluşturulan kesikleştirme yapısı ile belirli noktalar arasında uçtukları için baş açısı değişikliklerinde belirli manevralara ihtiyaç kalmamaktadır. Bu da üretilen çözümlerin kontrolörler tarafından daha uygulanabilir olmasını sağlamaktadır. Literatürde verilen vektör manevralarında ise baş açısı değişikliklerinin anlık olarak takip edilmesi gerekmektedir. Ayrıca, çalışmada verilen model ile hava sahası kesikleştirme oranını değiştirmek ve uçakların kullanabilecekleri rotaları tanımlamak da mümkündür. Bu yönleri ile çalışmada sunulan matematiksel model literatürdeki çözüm yaklaşımlarından ayrılmaktadır.

Sonuç olarak, erişilebilen çalışmalar dikkate alındığında hava sahaslarındaki çakışma çözümü ve trafik akışının düzenlenmesi problemlerinin farklı amaç fonksiyonları için eniyilenmesinde hava sahasının kesikleştirme yaklaşımı sıklıkla kullanılmakla beraber bu yaklaşımın probleme özel olduğu ve uygulama detaylarının verilmediği görülmektedir. Geliştirilen çözümlerin hassasiyeti ile çözüm süreleri arasındaki ödünleşmenin daha sistematik şekilde yapılabilmesi ve farklı model ve yöntemlerinin performanslarının daha nesnel şekilde karşılaştırılabilmesi için jenerik bir hava sahası kesikleştirme yaklaşımına ihtiyaç bulunmaktadır.

Bu ihtiyaçlar doğrultusunda, bu çalışmada taktik öncesi zaman penceresinde jenerik serbest rotalı hava sahasındaki operasyonlar için uçaklar arasındaki çakışmaları belirleyen ve çözümlen bir MILP modeli önerilmiştir. Modelin amacı toplam uçuş mesafesinin enküçüklenmesidir. Uçaklar arasındaki gerekli emniyet ayırmaları sağlamak koşuluyla hava sahasına giriş ve hava sahasından çıkış noktaları arasındaki uçuş

yörüngeleri matematiksel model tarafından belirlenmektedir. Çalışmada emniyet ayırmalarını kontrol etmek ve uçuş yörüngelerini belirlemek için hava sahası kesikleştirme tekniği kullanılmıştır. Bu sayede hava sahasındaki belirli noktalarda emniyet ayırmalarını kontrol ederek uçakların irtifalarını ya da hızlarını değiştirme manevralarına gerek kalmadan yörüngelerini belirlemek mümkün olmuştur.

Çalışmanın amacı uçaklar arasındaki potansiyel çakışmaları çözümlenerek giriş ve çıkış noktaları

arasındaki uçuş yörüngelerini belirlemek ve hava sahası kesikleştirme oranının artırılması durumunda elde edilen çözüm kalitesi ile çözüm süresi arasındaki ödünleşmeyi irdelemektir. Hava sahası kesikleştirme oranının artırılması durumunda uçaklar arasındaki çakışmaları çözümlenmek için alternatif rota sayısında artış meydana gelecektir. Ayrıca, hava sahası kesikleştirme oranının ve uçak sayısının artması durumunda problemin en iyi çözümlerine kabul edilebilir sürelerde ulaşabilmek için bir çözüm yaklaşımı da önerilmiştir.

Çizelge 1. İlgili literatürün özeti (Summary of relevant literature)

Çalışma	Çakışma kontrolü tekniği	Çakışma çözüm manevrası	Çakışma çözüm alanı	Çözüm yaklaşımı
Çeçen ve Çetek [1]	Hava Sahası Kesikleştirme	Giriş noktası ataması Hız değişikliği	Hava sahası girişindeki tampon bölgede	Matematiksel Model (MILP) Sezgisel algoritma
Çeçen ve Çetek [2]	Hava Sahası Kesikleştirme	Giriş noktası ataması Baş açısı değişikliği	Hava sahası girişindeki tampon bölgede	Matematiksel Model (MILP- (MINLP) Genetik Algoritma Tabu Arama Algoritma
Çeçen vd. [3]	Hava Sahası Kesikleştirme	Baş açısı ve İrtifa değişikliği	Hava sahası girişindeki tampon bölgede	Matematiksel Model (MILP), Tavlama Benzetimi Algoritması
Pallottino vd. [4]	Geometrik yapıya dayalı	Baş açısı ve Hız değişikliği	Hava sahası içerisinde	Matematiksel Model (MILP)
Alonso-Ayuso vd. [5, 6]	Geometrik yapıya dayalı	İrtifa ve Hız değişikliği	Hava sahası içerisinde	Matematiksel Model (MILP)
Alonso-Ayuso vd. [7]	Geometrik yapıya dayalı	Hız değişikliği	Hava sahası içerisinde	Matematiksel Model (MINLP)
Alonso-Ayuso vd. [8]	Geometrik yapıya dayalı	Baş açısı değişikliği	Hava sahası içerisinde	Matematiksel Model (MINLP)
Alonso-Ayuso vd. [9]	Geometrik yapıya dayalı	Baş açısı, irtifa ve hız değişikliği	Hava sahası içerisinde	Matematiksel Model (MILP)
Hong vd. [10]	Geometrik yapıya dayalı	Baş açısı ve Hız değişikliği	Hava sahası içerisinde	Parçacık Sürü Optimizasyonu Alg.
Christodoulou ve Costoulakis [11]	Geometrik yapıya dayalı	Baş açısı ve Hız değişikliği	Hava sahası içerisinde	Matematiksel Model (MILP)
Vela vd. [12]	Tanımlanmış rotalar ile kesikleştirme	İrtifa değişikliği Hız değişikliği	Hava sahası içerisinde	Matematiksel Model (MILP)
Vela vd. [13]	Geometrik yapıya dayalı	Baş açısı ve Hız değişikliği	Hava sahası içerisinde	Matematiksel Model (MILP)
Cafieri ve Durand [14]	Hava Sahası Kesikleştirme	Hız değişikliği	Hava sahası içerisinde	Matematiksel Model (MINLP) ve Sezgisel
Cafieri ve Rey [15]	Hava Sahası Kesikleştirme	Hız değişikliği	Hava sahası içerisinde	Matematiksel Model (MINLP)
Cafieri ve Omheni [16]	Geometrik yapıya dayalı	Baş açısı ve Hız değişikliği	Hava sahası içerisinde	Matematiksel Model (MINLP)
Omer [17]	Hava Sahası Kesikleştirme	Baş açısı ve Hız değişikliği	Hava sahası içerisinde	Matematiksel Model (MILP)
Erzberger ve Heere [18]	Geometrik yapıya dayalı	Baş açısı değişikliği	Hava sahası içerisinde	Sezgisel algoritma

oluşmaktadır. Çakışmaların çözümlendiği uçuş yörüngelerini belirlemek için hava sahası kesikleştirme tekniği dikkate alınarak model oluşturulmuştur. Önerilen matematiksel modele ait kümeler, indisler, parametreler, karar değişkenleri, amaç fonksiyonu ve kısıtlar aşağıda verilmiştir:

Kümeler ve indisler (Sets and indices)

$U = \{1, 2, \dots, u\}$ uçak kümesi $i, j \in U$

$E = \{1, 2, 3\}$ hava sahası giriş noktası kümesi $ep_i \in E$

$O = \{4, 5, 6\}$ hava sahası çıkış noktası kümesi $op_i \in O$

$C = \{\text{Orta gövdeli, Geniş gövdeli}\}$ uçak kategori kümesi $c_i \in C$

$K = \{7, 8, \dots, k\}$ hava sahası nokta kümesi $m, n \in K$

Parametreler (Parameters)

ep_i : i . uçak hava sahasına giriş noktası

op_i : i . uçak hava sahasından çıkış noktası

et_i : i . uçak hava sahasına giriş zamanı

c_i : i . uçak kategorisi

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

v_i : i . uçağın hızı

sep : Hava sahasında uçaklar arasındaki emniyet ayırması mesafesi

B : Yeterince büyük pozitif bir sayı

Karar değişkenleri (Decision variables)

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

$x_{i,m,n}$: i . uçak m noktasından n noktasına gidecekse 1; d.d. 0

$y_{i,m}$: i . uçak m noktasından geçecekse 1; d.d. 0

$s_{i,j,m}$: i uçağı m noktasına j uçağından önce ulaşıyorsa 1; d.d. 0

Amaç fonksiyonu (Objective function)

Ele alınan problem için amaç fonksiyonu Eşitlik (1)'de verildiği gibi uçakların hava sahası içinde toplam uçuş mesafesinin enküçüklenmesidir.

$$\text{enk } z = \sum_{i,m,n} x_{i,m,n} d_{m,n} \quad (1)$$

Atama Kısıtları (Assignment constraints)

Uçakların hava sahasına giriş noktaları önceden bilinmektedir. Her bir i uçağının giriş noktasından sonra uğrayacakları nokta Eşitlik (2) ile atanmaktadır:

$$\sum_{\substack{m \neq n \\ m=ep_i}} \sum_{\substack{n \\ d_{m,n} \neq 0}} x_{i,m,n} = 1 \quad \forall i \quad (2)$$

Uçakların geçecekleri ara noktaların atamaları Eşitlik (3) ile yapılmaktadır:

$$\sum_{\substack{n \\ n \neq m \\ n \neq ep_i \\ d_{m,n} \neq 0}} x_{i,m,n} - \sum_{\substack{n \\ n \neq m \\ n \neq op_i \\ d_{n,m} \neq 0}} x_{i,n,m} = 0 \quad \forall i, m \quad (3)$$

$$m \neq ep_i$$

$$m \neq op_i$$

Uçakların hava sahasından çıkış noktaları önceden bilinmektedir. Her bir i uçağının çıkış noktasından hemen önce uğrayacakları nokta Eşitlik (4) ile atanmaktadır:

$$\sum_{m \neq n} \sum_{\substack{n \\ n=op_i \\ d_{m,n} \neq 0}} x_{i,m,n} = 1 \quad \forall i \quad (4)$$

Birbiri ile bağlantılı olmayan noktalara ($d_{m,n} = 0$) atama yapılması Eşitlik (5) ile engellenmektedir:

$$\sum_m \sum_{\substack{n \\ d_{m,n}=0}} x_{i,m,n} = 0 \quad \forall i \quad (5)$$

Uçaklar arasında emniyet ayırmasını sağlarken her bir noktadan geçen uçakları ayrı ayrı bilmek gerekmektedir. Uçakların geçtikleri noktalar Eşitlik (6) ile belirlenmektedir:

$$\sum_{m \neq n} x_{i,m,n} = y_{i,n} \quad \forall i, n \quad (6)$$

Zaman Hesabı Kısıtları (Time calculation constraints)

Uçaklar hava sahasına girdikten sonra ilk geçecekleri noktada bulunma zamanları Eşitlik (7) ve (8) ile belirlenirken diğer tüm noktalarda bulunma zamanları ise Eşitlik (9) ve (10) ile belirlenmektedir:

$$t_{i,n} \geq et_i + \frac{d_{m,n}}{v_i} - B(1 - x_{i,m,n}) \quad \forall i, n, m \quad (7)$$

$$m = ep_i$$

$$t_{i,n} \leq et_i + \frac{d_{m,n}}{v_i} + B(1 - x_{i,m,n}) \quad \forall i, n, m \quad (8)$$

$$m = ep_i$$

$$t_{i,n} \geq t_{i,m} + \frac{d_{m,n}}{v_i} - B(1 - x_{i,m,n}) \quad \forall i, m, n \quad (9)$$

$$m \neq n$$

$$m \neq ep_i$$

$$t_{i,n} \leq t_{i,m} + \frac{d_{m,n}}{v_i} + B(1 - x_{i,m,n}) \quad \forall i, m, n \quad (10)$$

$$m \neq n$$

$$m \neq ep_i$$

Uçaklar Arasında Çakışma Engelleme Kısıtları (Collision avoidance constraints between aircraft)

Hava sahası boyunca uçaklar arasındaki gerekli emniyet ayırmaları Eşitlik (11) ve (12) ile sağlanmaktadır:

$$t_{i,m} \geq t_{j,m} + \frac{sep}{v_i} - B(2 - y_{i,m} - y_{j,m}) \quad \forall i, j, m \quad (11)$$

$$i \neq j$$

$$m \neq ep_i$$

$$-Bs_{i,j,m}$$

$$t_{j,m} \geq t_{i,m} + \frac{sep}{v_j} - B(2 - y_{i,m} - y_{j,m}) \quad \forall i, j, m \quad (12)$$

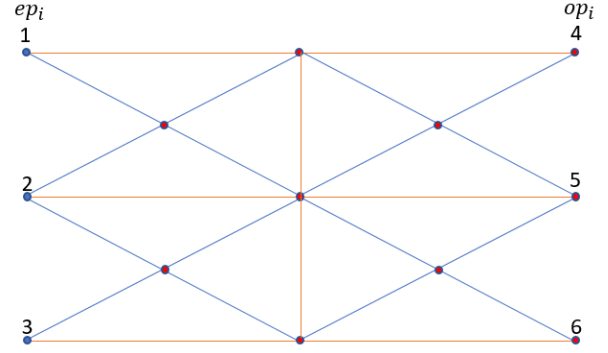
$$i \neq j$$

$$m \neq ep_i$$

$$-B(1 - s_{i,j,m})$$

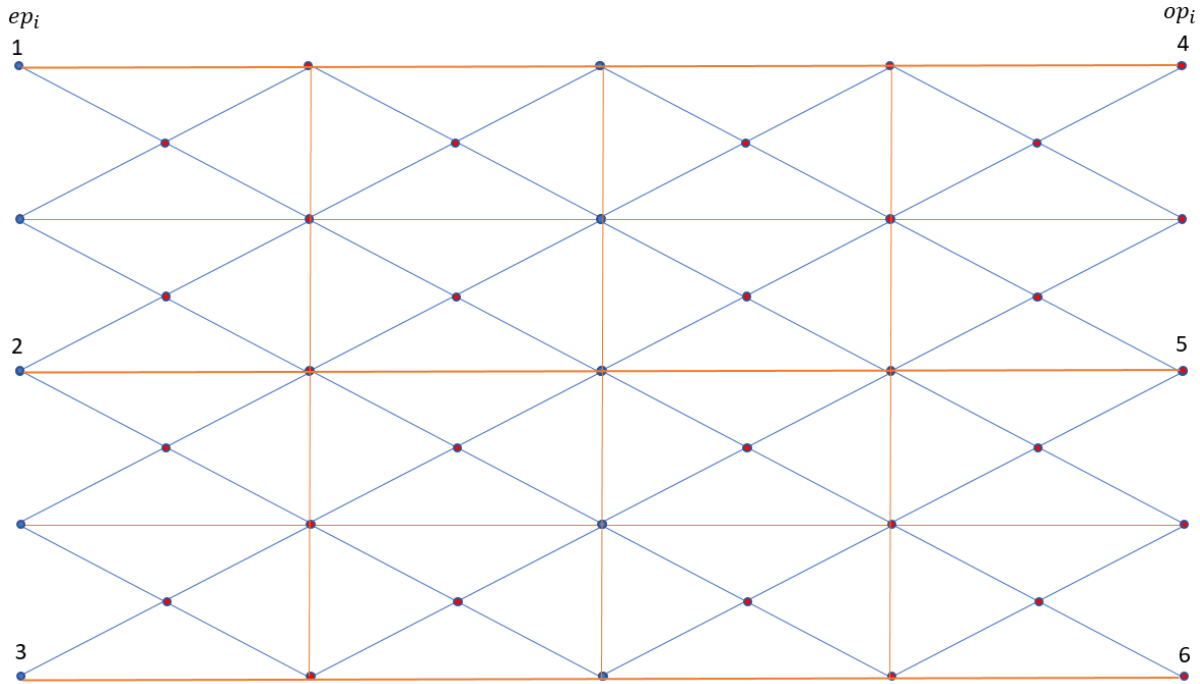
4. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

Çalışmada ele alınan 120 nm x120 nm boyutlarındaki hava sahası için üç farklı hava sahası kesikleştirme oranı uygulanmıştır. Şekil 1’de görüldüğü gibi kesikleştirme oranının düşük olması durumunda giriş ve çıkış noktaları arasında 7 tane potansiyel kesişme noktası bulunmaktadır. İki nokta arasında turuncu rota uzunlukları 60 nm iken, mavi rota uzunlukları 42,42 nm’dir. Kesikleştirme oranının biraz daha artırılması durumunda elde edilen hava sahası yapısı Şekil 3’de verilmiştir. Giriş ve çıkış noktaları da dahil toplam 41 noktadan oluşan bu hava sahası orta kesikleştirme oranına sahip hava sahası olarak isimlendirilmiştir. Bu durumda turuncu rotalar 30 nm uzunluğa sahipken mavi rotalar 21,21 nm uzunluğa sahiptir. Kesikleştirme oranının yüksek olması durumunda hava sahası toplam 85 noktadan oluşmaktadır (Şekil 4). Turuncu rota uzunluklarının 20, mavi rota uzunluklarının 14.14 nm mesafeye kadar düştüğü bu hava sahası yapısında giriş ve çıkış noktaları arasındaki alternatif rota sayısı da önemli ölçüde artmıştır.

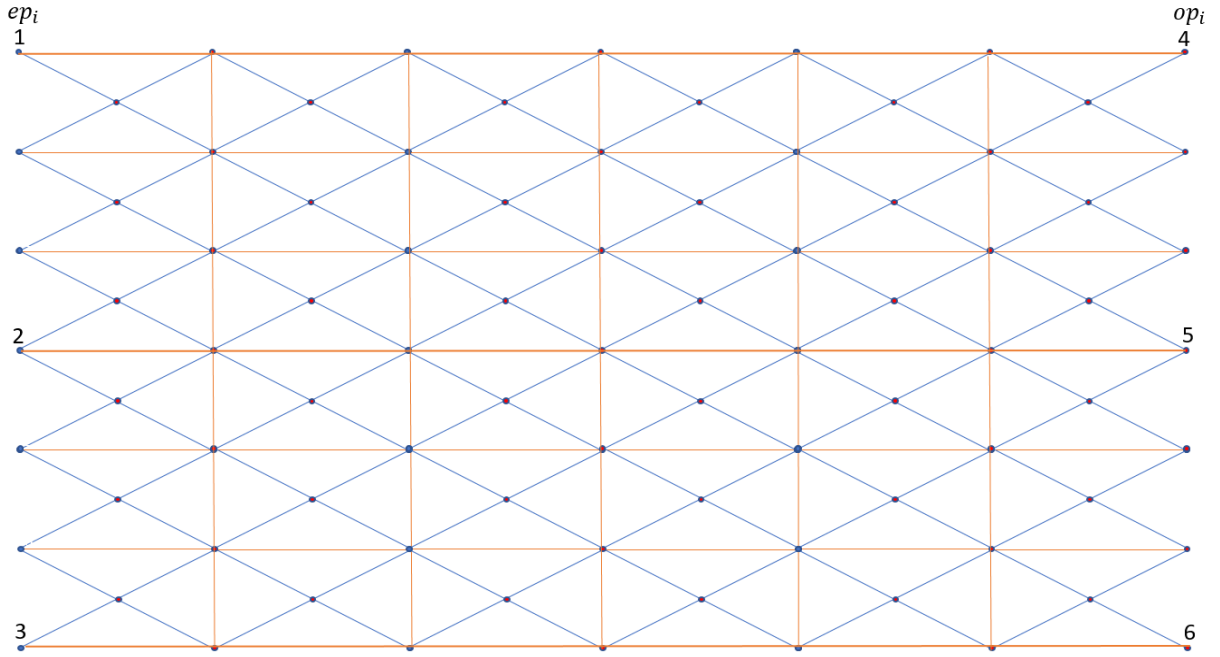


Şekil 2. Düşük kesikleştirme oranı ile hava sahası yapısı (Airspace structure with low discretization rate)

Çalışmada önerilen matematiksel modeli test etmek için beş farklı senaryo oluşturulmuştur. Bu senaryolar 10’dan 20’ye kadar farklı uçak yoğunluğu ile koşturulmuştur. Hava sahasına giriş ve çıkış noktalarını kullanacak olan uçaklar eşit oranda dağıtılmıştır. İlk iki senaryoda uçakların aynı noktadan hava sahasına giriş zamanları arasında fark minimum emniyet ayırması kadardır. Diğer senaryolarda uçakların geliş zaman aralıkları ortalaması 120 saniye olan üstel dağılım ile rassal olarak belirlenmiştir. Bu senaryolarda da aynı noktadan hava sahasına giren uçaklar arasında minimum emniyet ayırması kadar mesafe olması hesaba katılmıştır. Düşük, orta ve yüksek kesikleştirme oranına sahip hava sahası yapıları için senaryoların hepsi her bir uçak sayısı için ayrı ayrı koşturulmuştur. Ayrıca uçaklar arasındaki çakışmalar çözümlenmeden giriş ve çıkış noktaları arasındaki en kısa uçuş mesafeleri belirlenerek senaryoların referans amaç fonksiyonu değerleri belirlenmiştir. Böylece model toplamda 220 kez



Şekil 3. Orta kesikleştirme oranı ile hava sahası yapısı (Airspace structure with medium discretization rate)



Şekil 4. Yüksek kesikleştirme oranı ile hava sahası yapısı (Airspace structure with high discretization rate)

koşturulmuştur. Matematiksel model Python ortamında kodlanmıştır. Tüm testler Gurobi çözücüsü kullanılarak yapılmıştır.

Farklı uçak sayısı içeren test problemlerinin oluşturulan 5 farklı senaryo için çözülmesi ile elde edilen sonuçlar Tablo 2-6'da verilmiştir. Tablolarda referans senaryo ve hava sahasının düşük, orta ve yüksek kesikleştirme oranları için uçakların toplam mesafeleri nm cinsinden ayrı sütunlarda verilmiştir. Ayrıca her bir trafik yükü için çözüm süreleri de saniye cinsinden paylaşılmıştır. Hava sahası kesikleştirme oranı ve uçak sayısı arttıkça bazı testlerde kabul edilebilir sürelerde eniyi çözümlere ulaşılamamıştır. Operasyonların taktik öncesi çakışmalarını çözmekle ilgili olduğumuz için testlere kabul edilebilir süre sınırı olarak 600 saniye verilmiştir. Model bu süre içerisinde eniyi çözüme ulaşmış ise elde edilen eniyi çözüm ve çözüm süreleri tablolarda

paylaşılmıştır. Ancak bu sürede eniyi çözüme ulaşamadığında model durdurularak bu süre içinde elde edilen çözümün amaç fonksiyonu değeri ve 'Relative Gap' (rg) paylaşılmıştır. rg , eldeki çözüme karşı gelen amaç fonksiyonu değerinin, eniyi çözüm ya da eniyi alt sınırı karşı gelen amaç fonksiyonu değerlerinden en büyük olanına oranlanması ile elde edilmektedir.

Uçakların hava sahasına giriş zamanları arasında yalnızca emniyet ayırması kadar süre bulunan Senaryo-1 için elde edilen sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir. Uçaklar arka arkaya hava sahasına giriş yapmalarına rağmen 16 uçağa kadar referans senaryo ile aynı sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum uçaklar arasında az sayıda çakışma meydana geldiğinin ve bu çakışmaların alternatif rotalar ile çözümlendiğinde en kısa uçuş mesafelerinin elde edildiğini göstermektedir. 17 uçak ve sonrasında referans senaryoya göre daha fazla mesafe ile

Çizelge 2. Senaryo – 1 sonuçları (Scenario – 1 results)

Uçak sayısı	Referans senaryo	Düşük kesikleştirme		Orta kesikleştirme			Yüksek kesikleştirme		
		Toplam mesafe	Çözüm süresi	Toplam mesafe	Çözüm süresi	rg (%)	Toplam mesafe	Çözüm süresi	rg (%)
10	1398.7	1398.9	0.2	1398.7	1.5		1398.7	8.1	
11	1518.7	1518.9	0.2	1518.7	1.1		1518.7	5.2	
12	1638.7	1638.9	0.2	1638.7	2.6		1638.7	9.2	
13	1783.6	1783.7	0.3	1783.6	3.0		1783.6	9.9	
14	1928.4	1928.6	0.3	1928.4	2.9		1928.4	12.3	
15	2098.1	2098.3	0.4	2098.1	3.1		2098.1	14.0	
16	2267.8	2267.8	0.3	2267.8	3.8		2267.8	21.9	
17	2412.6	2472.9	1.2	2442.6	40.6		2424.3	213.9	
18	2557.4	2617.8	0.9	2587.4	57.8		2569.2	303.2	
19	2677.4	2762.6	5.8	2749.9	600	2.18	2705.7	600	1.05
20	2797.4	2907.5	4.6	2894.7	600	2.73	2917.4	600	3.83

uçuşlar gerçekleşmiştir. 17 ve 18 uçak sayısı için tüm kesikleştirme oranlarında kabul edilebilir sürelerde eniyi çözümler elde edilmiştir. Çözümler incelendiğinde kesikleştirme oranı arttıkça elde edilen çözüm kalitesinde artış meydana gelmektedir. Bu uçaklar arasındaki çakışmaların çözümlenerek daha kısa mesafelerde uçuşlarını gerçekleştirdiklerini göstermektedir. 19 uçak için 600 saniyede elde edilen çözüm değerleri incelendiğinde yüksek kesikleştirme oranında daha iyi çözüm değeri elde edilmiştir. Ancak 20 uçak için yüksek kesikleştirme oranında 600 saniyede elde edilen çözümde uçakların daha fazla mesafede uçtukları bir sonuç elde edilmiştir.

Uçakların yine arka arkaya hava sahasına giriş yaptığı Senaryo-2 için elde edilen sonuçlar incelendiğinde 10 uçaktan itibaren uçakların referans senaryoya göre daha fazla mesafede uçuşlarını tamamladıkları görülmüştür (Tablo 3). Düşük kesikleştirme oranı için tüm uçak sayılarında, orta kesikleştirme oranı için 15 uçağa kadar, yüksek kesikleştirme oranı için 14 uçağa kadar süre limiti içinde eniyi çözümlere ulaşılabilmiştir. Bu çözümler incelendiğinde kesikleştirme oranı arttıkça çözüm kalitesinin arttığı görülmektedir. Ancak düşük kesikleştirme oranından orta kesikleştirme oranına geçiş ile orta kesikleştirme oranından yüksek kesikleştirme oranına geçiş sonuçları kıyaslandığında ilk durumda toplam mesafede daha yüksek oranda iyileşmeler olmuştur. Örneğin, orta kesikleştirme oranı ile düşük kesikleştirme oranındaki eniyi çözümlerdeki toplam mesafeler kıyaslandığında orta kesikleştirme oranında uçuşlar 17,8 nm daha kısa mesafede gerçekleşmiştir. Yüksek kesikleştirme oranı ile orta kesikleştirme oranındaki eniyi çözümlerdeki toplam mesafeler kıyaslandığında ise yüksek kesikleştirme oranında uçuşlar 5,9 nm daha kısa mesafede gerçekleşmiştir. Bu durum hava sahası kesikleştirme oranının artırılması durumunda elde edilen çözüm kalitesi ile çözüm süresi arasındaki ödünleşmeyi irdelemek için önemli bir göstergedir. Kesikleştirme oranını yüksek tutmak çözümlerde sınırlı seviyede iyileşme elde edilmesi ile sonuçlanmıştır. Ayrıca belirli uçak sayısından sonra hem

süre limiti içinde eniyi çözümlere ulaşamamış hem de orta kesikleştirme oranına göre daha iyi çözümler elde edilememiştir. Örneğin, yüksek kesikleştirme oranı için 15 uçak ve sonrasına ait çözümler incelendiğinde düşük kesikleştirme oranına göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ancak orta kesikleştirme oranı ile karşılaştırıldığında tam tersi olmuştur.

Uçakların hava sahasına giriş zamanlarının üstel dağılımı kullanılarak belirlendiği Senaryo 3, Senaryo 4 ve Senaryo 5 için elde edilen çözümler sırasıyla Tablo 4, Tablo 5 ve Tablo 6'da verilmiştir. Senaryo 4'de hem düşük hem de orta kesikleştirme oranlarında tüm uçak seviyeleri için kabul edilebilir sürelerde çözümler elde edilmiştir. Senaryo 3 ve Senaryo 5'de orta kesikleştirme oranı için 600 saniyede elde edilen çözümlerin tamamının *rg* oranları oldukça düşüktür. Orta kesikleştirme oranında elde edilen çözümlerin tamamı düşük kesikleştirme oranından daha iyidir. Bu durumda uçaklar daha kısa mesafelerle uçuşlarını tamamlamışlardır. Yüksek kesikleştirme için elde edilen çözümleri incelediğimizde her üç senaryoda da 15 uçağa kadar elde edilen toplam mesafelerin orta kesikleştirme oranında elde edilenlere göre daha düşük oldukları görülmektedir. 16 uçak ve sonrası için 600 saniyede elde edilen çözümler için ise tam tersi durum geçerlidir.

Senaryo 3'de orta kesikleştirme oranında elde edilen çözümler ile düşük kesikleştirme oranında elde edilen çözümler karşılaştırıldığında orta kesikleştirme oranında 12,6 nm ile 110,1 nm arasında ortalama 62,3 nm daha kısa mesafede uçuşlar gerçekleşmiştir. Ancak yüksek kesikleştirme oranı ile orta kesikleştirme oranında elde edilen çözümler için karşılaştırma yapıldığında yüksek kesikleştirme oranında ortalama 5,3 nm mesafede daha kısa mesafede uçuşların gerçekleştiği görülmüştür. Sonuç olarak yüksek kesikleştirme oranında toplam mesafedeki iyileşme oranları sınırlı seviyede olmuştur. Senaryo 4 ve Senaryo 5 için çözümler incelendiğinde aynı durum geçerlidir. Orta kesikleştirme oranında düşük kesikleştirme oranına göre ortalama 33,7 nm ve 33,2 nm daha kısa mesafelerde uçuşlar gerçekleşirken yüksek kesikleştirme oranında orta kesikleştirme oranına göre 15

Çizelge 3. Senaryo – 2 sonuçları (Scenario – 2 results)

Uçak sayısı	Referans senaryo	Düşük kesikleştirme		Orta kesikleştirme			Yüksek kesikleştirme		
		Toplam mesafe	Çözüm süresi	Toplam mesafe	Çözüm süresi	<i>rg</i> (%)	Toplam mesafe	Çözüm süresi	<i>rg</i> (%)
10	1423.7	1458.9	0.2	1441.1	2.8		1435.3	106.0	
11	1568.6	1603.7	0.3	1586.0	2.7		1580.1	283.4	
12	1688.6	1723.7	0.2	1706.0	2.4		1700.1	21.7	
13	1833.5	1868.6	0.7	1850.8	2.9		1845.0	112.7	
14	1978.3	2013.5	0.6	1995.7	5.4		1989.8	20.6	
15	2098.3	2158.3	1.1	2140.5	431.6		2154.6	600	2.08
16	2243.2	2303.2	1.2	2285.3	600	1.09	2299.5	600	1.95
17	2388.0	2472.9	1.5	2430.2	600	1.02	2456.0	600	2.30
18	2557.8	2677.8	6.7	2672.3	600	3.64	3218.8	600	20.18
19	2702.6	2822.6	10.0	2744.7	600	0.45	3045.1	600	10.87
20	2872.3	2992.3	18.6	2914.4	600	0.85	2914.4	600	1.09

uçuğa kadar 5,9 nm ve 7,6 nm daha kısa mesafelerde uçuşlar gerçekleşmiştir. Sonuç olarak her iki senaryoda da orta kesikleştirme oranında elde edilen toplam mesafedeki iyileşme oranı belirli bir seviyeye çıkmıştır. Ancak yüksek kesikleştirme oranına geçildiğinde iyileşme sınırlı bir seviyede olmuştur.

Tüm senaryolar birlikte değerlendirildiğinde, hava sahası kesikleştirme oranı ve uçak sayısı arttıkça çözüm

sürelerinde artış meydana gelmiştir. Ancak kesikleştirme oranı arttıkça çözüm kalitesinin arttığı görülmüştür. Hava sahası kesikleştirme oranının artırılması durumunda elde edilen çözüm kalitesi irdelendiğinde, orta kesikleştirme oranı kullanıldığında, düşüğe kıyasla ciddi bir çözüm kalitesi artışının, kabul edilebilir bir çözüm süresi içinde sağlanabildiğini ancak yüksek orana geçildiğinde önemli bir çözüm süresi artışına karşın aynı oranda çözüm kalitesi iyileşmesi sağlayamadığını ortaya koymuştur.

Tablo 4. Senaryo – 3 sonuçları (Scenario – 3 results)

Uçak sayısı	Referans senaryo	Düşük kesikleştirme		Orta kesikleştirme			Yüksek kesikleştirme		
		Toplam mesafe	Çözüm süresi	Toplam mesafe	Çözüm süresi	rg (%)	Toplam mesafe	Çözüm süresi	rg (%)
10	1448.6	1473.5	0.3	1460.8	1.3		1456.7	69.6	
11	1593.5	1618.3	0.3	1605.7	2.6		1601.5	8.1	
12	1738.3	1798.3	1.8	1762.9	23.6		1758.1	600	0.67
13	1858.3	1918.3	2.2	1882.9	41.0		1878.1	600	0.62
14	1978.3	2048.6	2.7	2002.9	66.2		1998.1	600	0.59
15	2098.3	2193.5	6.4	2135.3	600	0.92	2126.4	600	0.94
16	2243.2	2363.2	13.2	2280.2	600	0.81	2304.3	600	2.66
17	2363.2	2497.8	32.1	2400.2	600	0.82	2411.2	600	2.00
18	2508.0	2642.6	25.8	2545.0	600	0.29	2536.0	600	1.12
19	2677.8	2812.3	26.5	2714.7	600	0.46	2742.3	600	2.36
20	2797.8	2957.2	197.4	2847.1	600	1.31	2869.2	600	2.50

Tablo 5. Senaryo – 4 sonuçları (Scenario – 4 results)

Uçak sayısı	Referans senaryo	Düşük kesikleştirme		Orta kesikleştirme			Yüksek kesikleştirme		
		Toplam mesafe	Çözüm süresi	Toplam mesafe	Çözüm süresi	rg (%)	Toplam mesafe	Çözüm süresi	rg (%)
10	1523.2	1558.3	0.5	1540.5	10.2		1534.6	167.0	
11	1668.0	1703.2	0.4	1685.3	4.6		1679.5	164.4	
12	1788.0	1823.2	1.0	1805.3	16.3		1799.5	122.1	
13	1932.9	1968.0	1.4	1950.2	2.9		1944.3	207.4	
14	2077.8	2112.9	1.0	2095.0	37.7		2105.7	600	1.34
15	2247.5	2282.6	2.1	2264.7	4.7		2258.8	402.4	
16	2392.3	2427.5	4.7	2409.5	41.6		2420.2	600	1.96
17	2537.2	2597.2	5.4	2554.4	30.3		2596.8	600	2.31
18	2657.2	2742.1	4.6	2674.4	9.3		2716.8	600	1.78
19	2802.1	2886.9	15.9	2819.2	160.4		2861.64	600	2.03
20	2971.8	3056.6	10.5	2988.9	5.6		3031.32	600	2.62

Tablo 6. Senaryo – 5 sonuçları (Scenario – 5 results)

Uçak sayısı	Referans senaryo	Düşük kesikleştirme		Orta kesikleştirme			Yüksek kesikleştirme		
		Toplam mesafe	Çözüm süresi	Toplam mesafe	Çözüm süresi	rg (%)	Toplam mesafe	Çözüm süresi	rg (%)
10	1398.7	1398.9	0.2	1398.7	0.9		1398.7	5.9	
11	1518.7	1543.7	0.5	1536.3	1.9		1530.4	15.4	
12	1638.7	1688.6	0.9	1668.7	27.2		1658.7	600	0.21
13	1783.6	1833.5	0.8	1813.6	45.7		1803.6	540.9	0.01
14	1928.4	1978.3	2.6	1958.4	49.2		1948.4	545.5	0.01
15	2098.1	2148.0	2.3	2128.1	171.1		2118.1	600	0.39
16	2267.8	2352.9	3.9	2315.3	952.3		2327.8	600	2.03
17	2412.6	2497.8	2.9	2460.2	368.0		2444.3	600	0.82
18	2557.4	2642.6	2.4	2605.0	437.2		2589.2	600	0.66
19	2677.4	2787.5	4.3	2725.0	600	0.46	2720.9	600	1.17
20	2797.4	2932.3	6.5	2862.6	600	1.23	3733.4	600	24.76

5. ÇÖZÜM SÜRESİNİN AZALTIKMASI İÇİN BİR ÇÖZÜM YAKLAŞIMI (A SOLUTION APPROACH TO REDUCE SOLUTION TIME)

Çalışmada yapılan test sonuçlarına göre hava sahası kesikleştirme oranı arttıkça çözüm sürelerinde artış meydana gelmiştir. Düşük kesikleştirme oranında tüm uçak sayılarında kabul edilebilir sürelerde çözümler elde edilebilmiştir. Orta kesikleştirme oranında testlerin çoğunda kabul edilebilir sürelerde çözümler elde edilmiştir. Ayrıca uçak sayısı arttıkça çözüm süresinde artış meydana gelmiştir. 600 saniyelik süre limiti ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde rg oranlarının düşük olduğu ve düşük kesikleştirme oranına göre yine toplam uçuş mesafesinin azaldığı görülmüştür.

Yüksek kesikleştirme oranına geçildiğinde ise çoğunlukta kabul edilebilir sürelerde çözümlere ulaşılamamıştır. Ayrıca 600 saniye içinde elde edilen çözümler incelendiğinde orta kesikleştirme oranına göre toplam mesafede iyileşme sağlanamadığı görülmüştür. Sonuç olarak hava sahası kesikleştirme oranının ve uçak sayısının artması durumunda problemlerin eniyi çözümlerine kabul edilebilir sürelerde ulaşmak zorlaşmıştır. Bu sebeple bu çalışmada çözüm süresini azaltabilmek için bir çözüm yaklaşımı önerilmiştir.

Uçaklar önceden bilinen hava sahasına giriş ve hava sahasından çıkış noktaları arasında olabildiğince en kısa mesafe ile uçuşlarını tamamlamak isterler. Çakışmaları çözümlenmek amacıyla kontrolörler tarafından verilen manevralar ile bazı sapmalar meydana gelse de bu

sapmalar başka çakışmaların ortaya çıkmaması için sınırlı olmaktadır. Bu sebeple giriş ve çıkış noktaları arasında uçakların belirli yörüngelerde uçmaları öngörülmür.

Çalışmada belirli giriş ve çıkış noktası çiftleri arasında uçakların kullanabilecekleri yörüngeleri belirtmek amacıyla yeni bir parametre tanımlanmıştır:

$a_{i,m,n}$: i uçağı m ve n noktaları arasındaki ayrıtı kullanabiliyorsa 1; d.d. 0

Bu parametre ile kesikleştirme tekniğı uygulanmış hava sahasında uçakların m ve n noktaları arasında kullanabilecekleri öngörülen ayrıtılar $a_{i,m,n} = 1$ olarak tanımlanmaktadır. Kullanacakları öngörülmemen ayrıtılar için $a_{i,m,n} = 0$ olarak tanımlanmaktadır. Uçakların kullanabilecekleri noktalar yerine ayrıtıların tanımlanmasının sebebi iki nokta arasındaki bazı ayrıtıların tek yönlü olarak kullanılmasının öngörülmesidir. Böylece problemin çözüm uzayında daralmaya giderek matematiksel modelin çözüm sürelerinde azalma meydana gelecektir. Uçakların kullanacakları rotaların ataması yapılırken belirlenen yörüngelerin dikkate alınması için $a_{i,m,n} = 1$ koşulu kısıtlara eklenmiştir.

Uçakların kullanabilecekleri yörüngelerin tanımlanması durumunda elde edilen çözümler ve çözüm sürelerindeki değişimleri gözlemlemek amacıyla Senaryo – 1 için 18, 19 ve 20 uçak ile uygulama yapılmıştır. Tablo 7’de verilen test sonuçlarına göre 18 uçak için eniyi çözüme ulaşma süresi 303,2 saniyeden 32,8 saniyeye düşmüştür.

Tablo 7. Senaryo – 1 için $a_{i,m,n}$ parametresinin olması durumunda elde edilen sonuçlar (Results for Scenario – 1 with $a_{i,m,n}$ parameter)

Uçak sayısı	Referans senaryo	$a_{i,m,n}$ Dahil değil			$a_{i,m,n}$ Dahil	
		Toplam mesafe	Çözüm süresi	rg (%)	Toplam mesafe	Çözüm süresi
18	2557.4	2569.2	303.2		2569.2	32.8
19	2677.4	2705.7	600	1.05	2705.7	30.5
20	2797.4	2917.4	600	3.83	2854.2	271.3

Tablo 8. Senaryo – 5 için $a_{i,m,n}$ parametresinin olması durumunda elde edilen sonuçlar (Results for Scenario – 5 with $a_{i,m,n}$ parameter)

Uçak sayısı	Referans senaryo	$a_{i,m,n}$ Dahil değil			$a_{i,m,n}$ Dahil	
		Toplam mesafe	Çözüm süresi	rg (%)	Toplam mesafe	Çözüm süresi
10	1398.7	1398.7	5.9		1398.7	1.4
11	1518.7	1530.4	15.4		1530.4	3.2
12	1638.7	1658.7	600	0.21	1658.7	132.9
13	1783.6	1803.6	540.9	0.01	1803.6	113.8
14	1928.4	1948.4	545.5	0.01	1948.4	121.6
15	2098.1	2118.1	600	0.39	2118.1	135.3
16	2267.8	2327.8	600	2.03	2311.2	249.7
17	2412.6	2444.3	600	0.82	2444.3	146.8
18	2557.4	2589.2	600	0.66	2589.2	136.5
19	2677.4	2720.9	600	1.17	2720.9	226.4
20	2797.4	3733.4	600	24.76	2857.4	531.6

19 uçak için 30,5 saniyede eniyi çözüme ulaşmak mümkün olmuştur. Bu çözüm değerinin $a_{i,m,n}$ parametresi olmadan 600 saniye süre sınırında elde edilen çözüm değeri ile aynı olduğu görülmektedir. Buradan eniyi çözüme ulaşıldığı ancak çözümü ispatlama sürecinin tamamlanmadığı anlaşılmaktadır. 20 uçak için bakıldığında $a_{i,m,n}$ parametresinin olması durumunda kabul edilebilir sürelerde eniyi çözüm değerine ulaşmak mümkün olmuştur. Sonuç olarak $a_{i,m,n}$ parametresinin olması durumunda çözüm sürelerinde azalma meydana gelmiş ve kabul edilebilir sürelerde eniyi çözümlere ulaşılmıştır.

Senaryo – 5 için de $a_{i,m,n}$ parametresinin olması durumu test edilerek çözümlerdeki ve çözüm sürelerindeki değişimler Tablo 8’de paylaşılmıştır. Sonuçlara göre 16 ve 20 uçak hariç diğerlerinde $a_{i,m,n}$ parametresi dahil iken ve değilken aynı çözümler elde edilmiştir. Ancak $a_{i,m,n}$ parametresi dahil iken hem elde edilen çözümün eniyi çözüm olduğu ispatlanmış hem de daha kısa sürelerde çözümlere ulaşılmıştır. 16 ve 20 uçakta ise $a_{i,m,n}$ parametresi dahil iken daha iyi çözümler çok daha kısa sürelerde elde edilmiştir.

Sonuç olarak önerilen yaklaşım ile tüm test problemleri için çözüm süresi avantajı sağlanmıştır. Çözüm süreleri ortalama %68,6 oranında azaltılmıştır. Ayrıca iki problemin amaç fonksiyonu değerlerinde iyileşme sağlanmıştır.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER (CONCLUSION and RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada, taktik öncesi zaman penceresinde jenerik serbest rotalı hava sahasındaki uçakların çakışmalarını belirleyen ve çözümlen bir matematiksel model önerilmiştir. Hava sahası kesikleştirme tekniği kullanılarak uçakların uçuş yörüngeleri belirlenirken toplam uçuş mesafesi enküçükmek amaçlanmıştır. Ele alınan hava sahasına düşük, orta ve yüksek olmak üzere üç farklı kesikleştirme oranı uygulanmıştır. Çalışmada uçaklar arasındaki potansiyel çakışmaları çözümlenerek uçuş yörüngelerini belirlemenin yanında hava sahası kesikleştirme oranının artırılması durumunda elde edilen çözüm kalitesi ile çözüm süresi arasındaki ödünleşme de irdelenmiştir.

Çalışmada önerilen matematiksel model, farklı kesikleştirme oranları için uyarlanabilir kabiliyettedir. Ayrıca daha fazla uçak kategorisi ve farklı uçuş hızları için de model uyarlanabilir. Model oluşturulan 5 farklı senaryo ve 10’dan 20’ye kadar farklı uçak sayıları ile test edilmiştir. Operasyonların taktik öncesi çakışmalarını çözümlenmek ile ilgilendiğimiz için testlere 600 saniyelik süre limiti verilmiştir. Model bu süre içerisinde eniyi çözüme ulaşmış ise elde edilen eniyi amaç fonksiyonu değeri ve çözüm süresi tablolarda paylaşılmıştır. Ancak bu sürede eniyi çözüme ulaşamadığında model durdurularak elde edilen çözüme karşı gelen amaç fonksiyonu değeri ve bu değer tahmini eniyi çözüme

karşı gelen amaç fonksiyonu değerine yüzde uzaklığı olan rg oranı paylaşılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre hava sahası kesikleştirme oranı ve uçak sayısı arttıkça çözüm sürelerinde artış meydana gelmiştir. Ancak kesikleştirme oranı arttıkça çözüm kalitesinin arttığı görülmüştür. Hava sahası kesikleştirme oranının artırılması durumunda elde edilen çözüm kalitesi irdelendiğinde orta kesikleştirme oranında elde edilen toplam mesafedeki iyileşme oranı önemli bir artış olmuştur. Ancak yüksek kesikleştirme oranına geçildiğinde iyileşme sınırlı bir seviyede olmuştur. Örneğin, Senaryo–2’de orta kesikleştirme oranı ile düşük kesikleştirme oranındaki eniyi çözümlerdeki toplam mesafeler kıyaslandığında orta kesikleştirme oranında uçuşlar 17,8 nm daha kısa mesafede gerçekleşmiştir. Yüksek kesikleştirme oranı ile orta kesikleştirme oranındaki eniyi çözümlerdeki toplam mesafeler kıyaslandığında ise yüksek kesikleştirme oranında uçuşlar 5,9 nm daha kısa mesafede gerçekleşmiştir. Senaryo 3’de orta kesikleştirme oranında elde edilen çözümler ile düşük kesikleştirme oranında elde edilen çözümler karşılaştırıldığında orta kesikleştirme oranında 12,6 nm ile 110,1 nm arasında ortalama 62,3 nm daha kısa mesafede uçuşlar gerçekleşmiştir. Ancak yüksek kesikleştirme oranı ile orta kesikleştirme oranında elde edilen çözümler için karşılaştırma yapıldığında yüksek kesikleştirme oranında ortalama 5,3 nm mesafede daha kısa mesafede uçuşların gerçekleştiği görülmüştür. Senaryo 4 ve Senaryo 5 için çözümler incelendiğinde orta kesikleştirme oranında düşük kesikleştirme oranına göre sırasıyla ortalama 33,7 nm ve 33,2 nm daha kısa mesafelerde uçuşlar gerçekleşirken yüksek kesikleştirme oranında orta kesikleştirme oranına göre 5,9 nm ve 7,6 nm daha kısa mesafelerde uçuşlar gerçekleşmiştir.

Yüksek kesikleştirme oranı için çözümlerde sınırlı seviyede iyileşme elde edilmesinin yanında belirli uçak sayısından sonra hem kabul edilebilir sürelerde eniyi çözümlere ulaşamamış hem de 600 saniyelik sürede orta kesikleştirme oranına göre daha iyi çözümler elde edilememiştir. Sonuç olarak hava sahası kesikleştirme oranının ve uçak sayısının artması durumunda problemin en iyi çözümlerine kabul edilebilir sürelerde ulaşmak zorlaşmıştır. Bu sebeple çalışmada bir çözüm yaklaşımı önerilmiştir. Bu yaklaşıma göre belirli giriş ve çıkış noktası çiftleri arasında uçakların kullanabilecekleri yörüngeleri belirtmek amacıyla bir parametre tanımlanmıştır ve kısıtlara koşul olarak eklenmiştir. Test sonuçlarına göre bu parametre dahil edildiğinde eniyi çözümlere daha kısa sürelerde ulaşmak mümkün olmuştur. Ancak çözümlerin çoğunluğunun bu parametre dahil değil iken 600 saniyede elde edilen çözümler ile aynı olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak hava sahası kesikleştirme oranının artırılması belirli bir orandan sonra çözümlerde sınırlı iyileşmeleri sağlamaktadır. Ayrıca çözüm sürelerinde de önemli ölçüde artış meydana gelmektedir. Bu sebeple çözüm kalitesi ve çözüm süresi arasındaki ödünleşme dikkate alınarak ideal olan hava sahası kesikleştirme oranı belirlenmelidir. Böylece kabul edilebilir sürelerde

eniye çözümlere ulaşılması mümkün olacaktır. Ancak, kesikleştirme oranı yüksek belirlendi ise, uçakların giriş ve çıkış noktaları arasında kullanabilecekleri yörüngeler tanımlanarak da çözüm sürelerinde iyileşmeler sağlanabilir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Zekeriya KAPLAN: Literatür taraması, matematiksel modelin oluşturulması, bilgisayar ortamına aktarılması ve test edilmesi, sonuçların yorumlanması, makalenin yazılması

Cem ÇETEK: Problemin tanımı, literatür taraması, test senaryolarının oluşturulması

Tuğba SARAÇ: Matematiksel modelin oluşturulması, sonuçların yorumlanması, çözüm yaklaşımı önerisi

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Cecen R.K., Cetek C., "Conflict-free en-route operations with horizontal resolution manoeuvres using a heuristic algorithm", *Aeronautical Journal*, 124(1275): 767-85, (2020).
- [2] Cecen R.K., Cetek C., "A Two-Step Approach for Airborne Delay Minimization Using Pretactical Conflict Resolution in Free-Route Airspace", *J Adv Transp*, (2019).
- [3] Cecen R.K., Saraç T., Cetek C., "Meta-heuristic algorithm for aircraft pre-tactical conflict resolution with altitude and heading angle change maneuvers", *TOP*, 29(3): 629-47, (2021).
- [4] Pallottino L., Feron E.M., Bicchi A., "Conflict Resolution Problems for Air Traffic Management Systems Solved with Mixed Integer Programming", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 3(1): 3-11, (2002).
- [5] Alonso-Ayuso A., Escudero L.F., Martín-Campo F.J., "Collision avoidance in air traffic management: A mixed-integer linear optimization approach", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(1): 47-57, (2011).
- [6] Alonso-Ayuso A., Escudero L.F., Olaso P., Pizarro C., "Conflict avoidance: 0-1 linear models for conflict detection & resolution", *TOP*, 21(3): 485-504, (2011).
- [7] Alonso-Ayuso A., Escudero L.F., Martín-Campo F.J., "A mixed 0-1 nonlinear optimization model and algorithmic approach for the collision avoidance in ATM: Velocity changes through a time horizon", *Comput Oper Res*, 39(12): 3136-46, (2012).
- [8] Alonso-Ayuso A., Escudero L.F., Martín-Campo F.J., "Exact and approximate solving of the aircraft collision resolution problem via turn changes", *Transportation Science*, 50(1): 263-74, (2014).
- [9] Alonso-Ayuso A., Escudero L.F., Martín-Campo F.J., "Multiobjective optimization for aircraft conflict resolution. A metaheuristic approach", *Eur J Oper Res*, 248(2): 691-702, (2016).
- [10] Hong Y., Choi B., Oh G., Lee K., Kim Y., "Nonlinear Conflict Resolution and Flow Management Using Particle Swarm Optimization", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(12): 3378-87, (2017).
- [11] Christodoulou M., Costoulakis C., "Nonlinear mixed integer programming for aircraft collision avoidance in free flight", *Proceedings of the Mediterranean Electrotechnical Conference – MELECON*, Dubrovnik, 1: 327-30, (2004).
- [12] Vela A., Solak S., Singhose W., Clarke J.P., "A mixed integer program for flight-level assignment and speed control for conflict resolution", *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, Shanghai, 5219-26, (2009).
- [13] Vela A.E., Solak S., Clarke J.P., Singhose W.E., Barnes E.R., Johnson E.L., "Near real-time fuel-optimal en route conflict resolution", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 11(4): 826-37, (2010).
- [14] Cafieri S., Durand N., "Aircraft deconfliction with speed regulation: New models from mixed-integer optimization", *Journal of Global Optimization*, 58(4): 613-29, (2014).
- [15] Cafieri S., Rey D., "Maximizing the number of conflict-free aircraft using mixed-integer nonlinear programming", *Comput Oper Res*, 80: 147-58, (2017).
- [16] Cafieri S., Omhenni R., "Mixed-integer nonlinear programming for aircraft conflict avoidance by sequentially applying velocity and heading angle changes", *Eur J Oper Res*, 260(1): 283-90, (2017).
- [17] Omer J., "A space-discretized mixed-integer linear model for air-conflict resolution with speed and heading maneuvers", *Comput Oper Res*, 58: 75-86, (2015).
- [18] Erzberger H., Heere K., "Algorithm and operational concept for resolving short-range conflicts", *Proc Inst Mech Eng G J Aerosp Eng*, 224(2): 225-43, (2010).
- [19] Kaplan Z., Çetek C., "Yapay Bağımsızlık Metasezgiseli ile Tek Pistli Havaalanlarında İniş Sıralamasının Eniyilenmesi", *J ESOGU Engin Arch Fac*, 28(3): 321-31, (2020).
- [20] Gui D., Le M., Huang Z., Zhang J., D'Ariano A., "Optimal aircraft arrival scheduling with continuous descent operations in busy terminal maneuvering areas", *J Air Transp Manag*, 107, (2023).
- [21] Vadlamani S., Hosseini S., "A novel heuristic approach for solving aircraft landing problem with single runway", *J Air Transp Manag*, 40: 144-8, (2014).

- [22] Kwasiborska A., “Sequencing landing aircraft process to minimize schedule length”, *Transportation Research Procedia*. Elsevier B.V., 111-6, (2017).
- [23] Lee H., Balakrishnan H., “A Study of Tradeoffs in Scheduling Terminal-Area Operations”, *Proceedings of the IEEE*, 96(12): 2081-95, (2008).
- [24] Balakrishnan H., Chandran B., “Efficient and Equitable Departure Scheduling in Real-Time: New Approaches to Old Problems”, *USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar*, Barcelona, (2007).
- [25] Rathinam S., Wood Z., Sridhar B., Jung Y., “A generalized dynamic programming approach for a departure scheduling problem”, *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, Chicago, (2009).
- [26] Hancerliogullari G., Rabadi G., Al-Salem A.H., Kharbeche M., “Greedy algorithms and metaheuristics for a multiple runway combined arrival-departure aircraft sequencing problem”, *J Air Transp Manag*, 32: 39-48, (2013).
- [27] Farhadi F., Ghoniem A., Al-Salem M., “Runway capacity management - An empirical study with application to Doha International Airport”, *Transp Res E Logist Transp Rev*, 68: 53-63, (2014).
- [28] Murça M.C.R., Müller C., “Control-based optimization approach for aircraft scheduling in a terminal area with alternative arrival routes”, *Transp Res E Logist Transp Rev*, 73: 96-113, (2015).
- [29] Samà M., D’Ariano A., Palagachev K., Gerdtts M., “Integration methods for aircraft scheduling and trajectory optimization at a busy terminal manoeuvring area”, *OR Spectrum*, 41(3): 641-81, (2019).
- [30] Samà M., D’Ariano A., D’Ariano P., Pacciarelli D., “Optimal aircraft scheduling and routing at a terminal control area during disturbances”, *Transp Res Part C Emerg Technol*, 47(P1): 61-85, (2014).
- [31] Samà M., D’Ariano A., D’Ariano P., Pacciarelli D., “Air traffic optimization models for aircraft delay and travel time minimization in terminal control areas”, *Public Transport*, 7(3): 321-37, (2015).
- [32] Kaplan Z., Çetek C., Saraç T., “A multi-objective nonlinear integer programming model for mixed runway operations within the TMAs”, *The Aeronautical Journal*, 1-31, (2023).
- [33] Dönmez K., Çetek C., Kaya O., “Air traffic management in parallel-point merge systems under wind uncertainties”, *J Air Transp Manag*, 104, (2022).
- [34] Dönmez K., Çetek C., Kaya O., “Aircraft Sequencing and Scheduling in Parallel-Point Merge Systems for Multiple Parallel Runways”, *Transportation Research Record*, 108-24, (2022).
- [35] Liang M., Delahaye D., Maréchal P., “Integrated sequencing and merging aircraft to parallel runways with automated conflict resolution and advanced avionics capabilities”, *Transp Res Part C Emerg Technol*, 85: 268-91, (2017).
- [36] Liang M., Delahaye D., Marechal P., “Conflict-free arrival and departure trajectory planning for parallel runway with advanced point-merge system”, *Transp Res Part C Emerg Technol*. 95: 207-27, (2018).
- [37] Cecen R.K., “Multi-objective TMA management optimization using the point merge system”, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 93(1): 15-24, (2021).
- [38] Cecen R.K., Cetek C., Kaya O., “Aircraft sequencing and scheduling in TMAs under wind direction uncertainties”, *The Aeronautical Journal*, 124(1282): 1896-912, (2020).
- [39] Çetek F.A., Kantar Y.M., Cavcar A., “A regression model for terminal airspace delays”, *The Aeronautical Journal*, 121(1239): 680-92, (2017).
- [40] EUROCONTROL, “User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA)”, France, (2013).