

YAPAY BAĞIŞIKLIK METASEZGİSELİ İLE TEK PİSTLİ HAVAALANLARINDA İNİŞ SIRALAMASININ ENİYİLENMESİ

Zekeriya KAPLAN^{1*}, Cem ÇETEK²

¹ Eskişehir Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Hava Trafik Kontrol Bölümü, Eskişehir, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-8555-4579>

² Eskişehir Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Hava Trafik Kontrol Bölümü, Eskişehir, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-2162-511X>

Anahtar Kelimeler	Öz
Uçak iniş sıralaması Sınırlı sayıda yer değiştirme Karma tamsayı model Yapay bağışıklık sistemi Klonal seçim algoritması	<i>İniş uçaklarının sıralanması problemi, tahmini operasyon zamanlarının bulunduğu bir uçak kümesi için belirli kısıtlar altında gerekli emniyet ayırmalarının sağlanarak sıralamanın yapılmasıdır. Bu çalışmada tek piste iniş yapmayı planlayan uçakların sıralanması problemi ele alınmıştır. Uçakların ilk gelen ilk hizmet alır (FCFS) prensibi ile belirlenen sıralamalarına göre sınırlı sayıda yer değiştirmelerine (CPS) izin verilmiştir. Amaç fonksiyonu olarak operasyonların tamamlanma zamanının enküçüklenmesi alınmıştır. Problemin çözümü için Yapay Bağışıklık Sistemi (YBS) algoritmalarından olan Klonal Seçim Algoritması (KSA) kullanılmıştır. YBS anormallik tespiti, bilgisayar ve ağ güvenliği, çizelgeleme, eniyileme, sınıflandırma, veri madenciliği gibi birçok alanda kullanılan ve doğal bağışıklık sisteminden esinlenerek oluşturulan bir tekniktir. Farklı sayıda ve kategoride uçaklardan oluşan senaryolar için algoritma test edilmiştir. Algoritma ile elde edilen çözümler ve bir matematiksel model çözücüsü (GAMS/CPLEX) ile elde edilen çözümler kıyaslanmıştır ve çözüm süreleri de paylaşılmıştır.</i>

OPTIMIZATION OF ARRIVAL SEQUENCING AT SINGLE RUNWAY AIRPORTS USING ARTIFICIAL IMMUNE METAHEURISTIC

Keywords	Abstract
Aircraft arrival sequencing Constraint position shifting Mixed integer model Artificial immune system Clonal selection algorithm	<i>The aircraft arrival sequencing problem is to make sequencing with the required safe separations for a given set of aircraft with estimated operation times under certain constraints. In this study, the problem of sequencing aircrafts planning to land on a single runway is discussed. Aircraft are allowed to perform pre-defined number of constrained position shifting (CPS) in their landing sequence determined by first come first served (FCFS) principle. The objective function is to minimize the completion time of operations (makespan). The Clonal Selection Algorithm (KSA), one of the Artificial Immune System (AIS) algorithms, was used to solve the problem. Artificial immune system is a technique used in many areas such as anomaly detection, computer and network security, scheduling, optimization, classification, data mining and is inspired by natural immune system. The algorithm has been tested for scenarios with different numbers and categories of aircraft. The solutions obtained with the algorithm and obtained with a mathematical model solver (GAMS/CPLEX) are compared and solution times are shared.</i>
Araştırma Makalesi	Research Article
Başvuru Tarihi : 16.04.2020	Submission Date : 16.04.2020
Kabul Tarihi : 03.12.2020	Accepted Date : 03.12.2020

1. Giriş

Hava taşımacılığı sürdürülebilir ekonomik ve sosyal kalkınmanın yönlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Dünya genelinde hava trafiğinde 1970'lerin ortasından itibaren görülen bu sürekli artış her 15 yılda iki katına çıkmaktadır (ICAO, 2016a). Ancak talepteki bu hızlı artışa karşın havaalanlarının hizmet verebildiği saatlik kapasiteleri sınırlıdır. Uçuş talebinin

bu hizmet kapasitesine yaklaşması durumunda havalimanlarında ciddi tıkanıklıklar ve gecikmeler yaşanmaktadır. Uçuş operasyonları sırasında gerek havada gerekse yerde yaşanan bu gecikmeler verilen hizmetlerin aksamasından kaynaklı daha fazla zaman ve yakıt tüketimine neden olmaktadır. Havalimanlarında meydana gelen tıkanıklık artışları uzun vadede mevcut havalimanlarına yeni pistlerin yapılması ya da yeni

* Sorumlu yazar; e-posta : zekeriyakaplan@eskisehir.edu.tr

havalimanlarının kurulması gerekliliğini doğurmaktadır. Yeni havalimanlarının kurulması ya da yeni pistlerin eklenmesi maliyeti yüksek planlamalardır. Kısa vadede artan trafik yoğunluğunda daha fazla operasyona hizmet verebilmek adına operasyonel iyileştirmelere ihtiyaç duyulmaktadır. Uçakların sıralamasının dikkatli yapılması durumunda uçaklar arasındaki uzun ayırma sürelerinin azalmasına ve yeni operasyonların yapılmasına fırsat sağlanabilmektedir. Böylelikle uçakların operasyonlarındaki gecikmelerde de azalma meydana gelmektedir.

Çalışmanın amacı operasyonların toplam tamamlanma zamanının enküçüklenmesi için tek piste iniş yapmayı planlayan uçakların sıralanması problemi çözümlerinin Klonal Seçim Algoritması (KSA) kullanılarak makul sürede elde edilebilmesidir. İniş uçaklarının sıralanması problemine sınırlı sayıda yer değiştirme prensibi (CPS) de dâhil edilmiştir. CPS, bir uçağın hedeflenen operasyon zamanı dikkate alınarak ilk gelen ilk hizmet alır (FCFS) prensibi ile belirlenmiş başlangıç sıralamasından en büyük belirli sayıda yer değiştirmesine izin verilmesidir. Örneğin, FCFS sıralamasına göre 7. sırada olan bir uçak en fazla bir yer değiştirmeye izin verilmesi durumunda yeni sıralamada 6, 7 ve 8. sıralardan birisine atabilmektedir. Ele alınan problem için matematiksel model oluşturulurken Desai ve Prakash (2016) çalışmasındaki matematiksel modelden esinlenilmiştir. Çalışmalarında birden fazla çakışma noktası olan rota yapısı kullanmışlar ve CPS prensibini ayrı bir kısıt ile vermişlerdir. Bu çalışmada farklı olarak rotaların birleştiği ara çakışma noktaları kaldırılmış ve son yaklaşma hattı fiksinde (FAF) birleştirilmiştir. Bunun sebebi artık terminal hava sahalarında bu tür yapılandırılmış yollardan ziyade FAF'a direk rotalarla uygun bir geliş sıralaması yapılması öncelikle hedeflenmektedir. Bu anlamda incelediğimiz yol yapıları farklıdır ancak oluşturulan matematiksel model bu çalışmadan esinlenilmiş ve problemimize uyarlanmıştır. Ayrıca CPS prensibi atama kısıtlarına koşul yazılması ile sağlanmıştır. Farklı sayıda ve kategoride uçaklardan oluşan senaryolar için matematiksel model ve algoritma ile elde edilen çözümler ve çözüm süreleri paylaşılmıştır. Küçük boyutlu problemler için matematiksel model ile eniyi çözüm değerlerine ulaşılmıştır. Algoritmanın da kısa sürelerde bu en iyi çözümleri elde edebildiği gözlemlenmiştir. Sonrasında problem boyutu büyüdükçe matematiksel model ile arzu edilen süreler içerisinde eniyi çözümlere ulaşmanın mümkün olmadığı gösterilmiştir. Bu durumda çözüm süresi için 600 saniyelik sınırlama konulmuş ve bu sürede elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Ancak algoritma ile problem boyutu büyüdüğünde yine kısa sürelerde çözümler elde edilebilmiştir. Uçak sayısının 40'a ulaşması durumunda algoritma, GAMS'in 600 saniyelik sürede verdiği çözümlerden daha iyi çözümleri yine kısa sürelerde vermiştir. Böylece çalışmada; CPS prensibi içeren uçakların sıralanması probleminin çözümü için

uygulanan KSA algoritmasının performansı farklı boyutlardaki problemler için GAMS/CPLEX çözümleri ile karşılaştırılarak sunulmuştur. KSA'nin daha başarılı olduğu çözüm kalitesi ve çözüm süreleri bakımından gösterilmiştir.

Çalışmanın devamında öncelikle Bölüm 2'de literatürde yapılmış çalışmalardan bahsedilmiştir. Bölüm 3'te uçakların iniş sıralanması problemi açıklanarak problemin matematiksel modeli sunulmuştur. Bölüm 4'te doğal bağışıklık sisteminden ve bu sistemden esinlenilerek ortaya çıkan yapay bağışıklık teorisi kısaca tanıtarak yapay bağışıklık sistemi algoritmalarından olan CLONALG algoritmasının genel yapısı hakkında bilgi verilmiştir. Bunların yanı sıra Klonlama sayısının hesaplanması ve hipermutasyon aşamasındaki mutasyon yöntemleri hakkında bilgilendirme yapılmıştır. Bölüm 5'de algoritmanın tanımlanan probleme nasıl uygulandığı anlatılmıştır. Bölüm 6'da algoritmanın farklı senaryolar için koşturulması ile elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Bölüm 7'de bu çalışma ve gelecek çalışmalar hakkında tartışma yapılmış ve görüşler bildirilmiştir.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Literatürde iniş uçaklarının sıralanması problemi için metasezgisel ve sezgisel algoritmaların kullanıldığı çeşitli çalışmalar mevcuttur. Zuniga, Delahaye ve Piera (2011) farklı rotalardan gelen iniş uçakları için gerekli emniyet ayırmaları sağlanarak uçaklar arasında meydana gelecek çakışma sayılarının enküçüklenmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Uçakların mevcut yörüngelerinden sapma oranlarını enküçükleyerek eniyi yörüngeyi elde etmek amacıyla Genetik Algoritma (GA) kullanılmıştır. Hu ve Paolo (2008) iniş uçaklarının sıralanması için GA performansını iyileştirmek amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Permütasyon gösterimi yerine 0-1 ikili gösterimin kullanılması durumunda elde edilen sonuçlardaki iyileşmeleri göstermişlerdir. Lee ve Balakrishnan (2008); Vadlamani ve Hosseini (2014); Briskorn ve Stolletz (2014); Lieder, Briskorn ve Stolletz (2015); Beasley, Krishnamoorthy, Sharaiha ve Abramson (2000) çalışmalarında iniş uçaklarının sıralanması gecikmelerden kaynaklanan toplam maliyetin enküçüklenmesi amacıyla ele alınmıştır. İlk iki çalışmada tek pist için sırasıyla CPS içeren sezgisel algoritma ile Uyarlanabilir Geniş Komşuluk Arama Ayırıştırması (ALNS) algoritması uygulanmıştır. Sonraki iki çalışmada birden fazla pist için Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (MIP) ve sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Bu dört çalışmada uçakların belirli zaman diliminde operasyonlarını gerçekleştirmelerine izin verilmiştir. Son çalışmada öncelikli olarak tek pist için sonrasında da birden fazla pist için MIP model ve sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Farklı pist ve uçak sayısının yer aldığı test problemlerinde 4 tane pist ve 50 uçağa kadar uygulama yapılmıştır. Hu ve Chen (2005) de

çalışmalarında CPS kısıdına yer vererek Uzaklaşan Ufuk Kontrolü (RHC) algoritmasını uygulayarak iniş uçaklarının toplam gecikmesini en küçüklemişlerdir. Hong, Choi, Lee, Lee ve Kim (2017); Kwasiborska (2017) toplam operasyon süresini en küçükleme amacıyla iniş uçaklarının sıralanması üzerine bir çalışma yapmışlardır. İlk çalışmada FCFS ilkesine göre sıralamanın belirlendiği bir algoritma ile CPS kısıdına göre sıralamanın belirlendiği bir algoritma geliştirilmiştir. İkinci çalışmada uçakların sıralanması en uzun işlem süresi (LPT), en kısa işlem süresi (SPT), son giren ilk çıkar (LIFO) ve ilk giren ilk çıkar (FIFO) ilkesine sahip algoritmalar uygulanmış ve geliştirilen bir sezgisel algoritma ile sonuçlar kıyaslanmıştır. Jia, Cao, Guo, Qiao ve Zhang (2008) tarafından yapılan çalışmada iniş uçaklarının sıralanması problemi için KSA ve RHC algoritmasını içeren melez bir algoritma önerilmiştir. Uçakların operasyonlarını gerçekleştirebilecekleri belirli bir zaman dilimi verilmiştir. Amaç fonksiyonu olarak uçakların hedeflenen iniş zamanından erken ya da geç operasyonlarını gerçekleştirmeleri durumuna göre ortaya çıkan toplam ceza maliyetini en küçükleme alınmıştır. Toplam 20 iniş uçağı içeren problem için KSA-RHC algoritması sonuçları sadece KSA ve GA algoritma sonuçları ile GA-RHC algoritma sonuçları ile kıyaslanmıştır. GA ve GA-RHC algoritmalarında ilk olarak uçaklar sıralanmış sonrasında FCFS prensibine göre iniş zamanları belirlenmiştir. KSA, KSA-RHC algoritmalarında aynı sonuçlar elde edilmiştir. Chen, Weiszter ve Stewart (2015) yer operasyonlarından kaynaklanan egzoz emisyonları en küçükleme amacıyla uçaklar için en uygun hız profillerini araştıran adaptif bağımsızlık algoritması geliştirmişlerdir. KSA ayrıca görüntü tanıma gibi makine öğrenmesinde (De Castro ve Von Zuben, 2002), endüstriyel problemler uygulamalarında (Engin ve Döyen, 2004), tesis yerleşim probleminde (Ulutaş ve İşlier, 2009), hücreli imalat sisteminde hücre oluşum probleminde (Ulutaş, 2019), atölye çizelgeleme probleminde (Atay, 2012) uygulanmıştır.

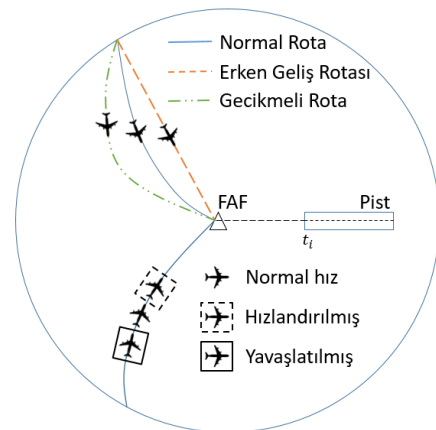
Yapılan bu çalışmada tek piste sahip bir havaalanına iniş yapacak uçakların sıralanması problemi ele alınmıştır. Uçakların ilk sıralamalarından sınırlı sayıda yer değiştirmelerine izin veren (CPS) kısıdı kullanılarak hava trafik kontrolörünün iş yükü artışı da sınırlandırılmaktadır. CPS ilkesinin de dâhil edildiği KSA algoritması ile bu problem için çözümler elde edilmiştir. KSA, doğal bağımsızlık sisteminden esinlenen, çeşitliliği koruma ve hafızasında bilgileri saklayabilme özellikleri ile karmaşık eniyileme problemlerini çözüme uygun bir zekâ algoritmasıdır. Çalışmada bu algoritmanın tercih edilmesinin sebebi bu özellikleri barındırmasının yanında çalışmada ele alınan ve daha önce bu algoritmanın uygulanmadığı CPS prensibi içeren uçakların sıralanması probleminin çözümündeki başarısını ortaya koymaktır. Jia ve diğ., (2008) yaptıkları çalışmada 20 uçak için algoritma test etmişlerdir. Ayrıca GA ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmalar

yapmışlardır. Yapılan bu çalışmada 40 uçağı kadar ve farklı sayıdaki uçak setleri için algoritmanın performansı ortaya konulmuştur. Çalışmada üç farklı uçak ağırlık kategorisine de yer verilmiştir. Farklı kategoriler arasındaki kuyruk türbülansı için asgari emniyetli ayırma zamanları dikkate alınarak verilen uçak kümesi için operasyonların tamamlanma süresi en küçükleme çalışılmıştır.

3. Problemin Tanımı ve Matematiksel Model

Uçaklar iniş yapmak istedikleri havalimanına ulaşmak için seyir uçuşlarını tamamladıktan sonra, bir ya da daha fazla havalimanını çevreleyen ve Terminal Manevra Sahası (TMA) olarak adlandırılan yaklaşma kontrol alanına girmektedirler. Sonrasında geliş rotalarını kullanarak iniş yapmak istedikleri piste kontrolörlerin talimatları doğrultusunda ulaşmaktadırlar. Bunun için öncelikle son yaklaşma hattı fiksine (FAF) ulaşmakta ve sonrasında son yaklaşma hattını takip etmektedirler. Bu hat boyunca uçaklar piste ulaşmak için son yaklaşma ve alçalmalarını yapmaktadırlar. Bu sebeple son yaklaşma hattı boyunca uçakların sıralamalarında değişiklik yapılmamaktadır. Buradan anlaşılacağı üzere uçakların operasyon sıralamaları FAF'a ulaşmadan önce belirlenmelidir. Bir uçağın operasyon zamanı, pist başında operasyonuna başlama zamanına karşılık gelmektedir (t_i). Sıralamalar ile birlikte uçaklara operasyon zamanları atanmaktadır.

Belirlenen sıralamaya göre bir uçağın hedeflenen operasyon zamanından önce ya da sonra piste ulaşması gerektiği durumlarda normal geliş rotasından saptırılarak erken ya da geç gelmesi sağlanmaktadır. Seyir uçuşunda bir uçağın gecikmesi arzu edildiğinde normal geliş rotasından saptırılan ve tekrar oturtan bir vektör manevrası Çeçen ve Çetek (2019) tarafından önerilmiştir. Aynı şekilde normal geliş rotası üzerinde hızlandırılarak ya da yavaşlatılarak belirlenen sıralamaya göre gerekli emniyet ayırmalarını sağlayacak şekilde piste ulaşmaları sağlanmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Tek Pist İçin TMA Yapısı ve İniş Uçağının Hız ve Rota Geometrilere

Uçakların sıralanması problemi, belirli bir zaman dilimi için verilen ve tahmini operasyon zamanlarının bulunduğu uçak kümesinin gerekli emniyet ayırmalarının sağlanarak amaç fonksiyonuna bağlı olarak piste inişlerinin en iyi şekilde sıralanmasıdır. Pist, işleri yapması gereken bir tesis olarak düşünülebilir. Bu durumda sıralama problemi n tane işin yapıldığı sıra bağımlı ayar sürelerine sahip tek makine çizelgeleme problemine benzerlik göstermektedir ve NP-Zor tipinde bir problemdir. Bu sebeple polinom zamanda eniyi çözümlere ulaşmak garanti edilememektedir. Metasezgisel algoritmalar ile hızlı ve kaliteli çözümler elde edilebilmektedir.

Belirlenen zaman dilimi için kaç adet uçağın operasyon gerçekleştireceği uçuş öncesi yapılan uçuş planları göz önüne alınarak tahmin edilebilmektedir. Çalışmada $A = \{1, \dots, n\}$ uçak kümesini temsil etmektedir. Uçuş planlarında ayrıca uçakların tahmini varış zamanı (ETA) olarak adlandırılan hedeflenen operasyon zamanları da yer almaktadır. Mevcut hava trafik kontrol süreçlerinde ETA zamanları dikkate alınarak uçakların FCFS prensibine göre sıralamaları yapılmaktadır. Ancak bu sıralamalarda, farklı kategoriler arasındaki türbülans ayırma zamanlarının farklılık göstermesinden dolayı uzun ayırma zamanlarına ihtiyaç duyulabilmektedir. Çalışmada uçakların FCFS sıralamalarından sınırlı sayıda sapmalarına izin verilerek operasyonların toplam tamamlanma zamanlarını enküçükleme amacıyla gerekli emniyet ayırmaları sağlanarak yeni operasyon zamanları atanmıştır. Atanan operasyon zamanları ve yeni sıralamalarına göre uçakların aynı rotaları üzerinde yavaşlatıldıkları ya da hızlandırıldıkları varsayılmıştır. Atanan operasyon zamanı uçakların pist başında operasyonlarına başladıkları zamana karşılık gelmektedir. Farklı kategorideki uçakların iniş operasyonu gerçekleştirmeleri sırasında ardışık uçaklar arasında olması gereken türbülans ayırmaları Tablo 1'de verildiği gibidir (Balakrishnan ve Chandran, 2010). Uçakların kuyruk türbülans kategorileri en büyük kalkış ağırlıklarına göre hafif, orta kategori ve ağır kategori olarak sınıflandırılmaktadırlar. Hafif kategoridekiler 7000 kg veya altındaki ağırlığa sahip uçak tipleridir. Orta kategoridekiler 7000 kg'dan ağır 136 bin kg'dan hafif ağırlığa sahip uçak tipleri iken ağır kategoridekiler 136 bin kg veya üzeri ağırlığa sahip olan uçak tipleridir (ICAO, 2016b). Tabloda da görüldüğü üzere farklı kategoriler arasında farklı ayırma zamanlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Tablo 1
Kuyruk Türbülans Ayırma Zamanları (saniye)

Öndeki Uçak	Arkadaki Uçak		
	Hafif	Orta	Ağır
Hafif	82	69	60
Orta	131	69	60
Ağır	196	157	96

Dikkatli yapılan sıralamalar yeni operasyonlara fırsat verirken, uçaklar arasındaki uzun ayırma zamanlarının azalmasını sağlamaktadır. Ağır ya da orta kategori uçakların arkasından hafif kategori uçakların gelmesi durumunda kuyruk türbülans ayırma zamanları oldukça artmaktadır. Tam tersi durumda ise azalma meydana gelmektedir. Hafif kategori uçağın arkasından ağır kategori uçağın gelmesi durumunda gerekli ayırma zamanı pist işgal süresine karşılık gelmektedir. Pist işgal süresi pist uzunluğuna ve hızlı çıkış taksi yollarının konumlarına göre farklılık gösterebilmektedir. Çalışmada Balakrishnan ve Chandran (2010) tarafından verilen ayırma zamanları referans olarak alınmıştır.

Tanımlanan problem için oluşturulan matematiksel modele ait; indis, parametre ve karar değişkenleri şu şekildedir:

İndisler:

i, j : uçak, ($i, j \in A$)

k : sıra, $k \in A$

Parametreler:

n : uçak sayısı

cps : uçağın en büyük değiştirebileceği sıra sayısı

c_i : i . uçağın kategorisi

$fcfs_i$: i . uçağın başlangıç sıralaması

$sep_{i,j}$: ardışık i, j uçakları arasındaki emniyet ayırması

Karar Değişkenleri:

t_i : i . uçağın atanan operasyon zamanı

t_{enb} : son uçağın atanan operasyon zamanı

$x_{i,k} = \begin{cases} 1, & i. \text{ uçak } k. \text{ sıraya atanmışsa} \\ 0, & \text{diğer durum} \end{cases}$

Matematiksel modeli oluşturan kısıtlar şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$t_i \geq -M \cdot (1 - x_{i,k}) \quad \forall i, k \quad k = 1 \quad (1)$$

$$t_j \geq t_i + sep_{i,j} - M \cdot (2 - x_{i,k-1} - x_{j,k}) \quad \forall i, j, k \quad i \neq j, k > 1 \quad (2)$$

$$\sum_i x_{ik} = 1 \quad \forall k \quad fcfs_i - cps \leq k \leq fcfs_i + cps \quad (3)$$

$$\sum_k x_{ik} = 1 \quad \forall i \quad (4)$$

$$t_{enb} \geq t_i \quad \forall i \quad (5)$$

$$t_i \geq 0 \quad \forall i \quad (6)$$

Kısıtları altında,

$$enk z = t_{enb} \quad (7)$$

Kısıt (1)'de ilk sıraya atanan uçağın operasyon zamanı belirlenmektedir. Kısıt (2)'de diğer sıralara atanan uçaklar arasındaki emniyet ayırmaları sağlanırken uçakların operasyon zamanları da hesaplatılmaktadır. Her bir sıraya bir uçağın, her bir uçağın da bir sıraya atanmasını sağlayan atama kısıtları (3) ve (4)'de verilmiştir. Kısıt (3)'de bir uçağın ETA zamanlarına göre belirlenen ilk sıralamasından belirlenen en büyük sayı kadar sıralamasını değiştirmesi yazılan koşul ile sağlanmıştır. Son uçağın operasyon zamanı kısıt (5) ile hesaplatılmaktadır. Kısıt (6)'da ise atanan operasyon zamanı karar değişkeninin işaret kısıdı verilmiştir. Amaç verilen uçak kümesi için operasyonların toplam tamamlanma zamanının enküçüklenmesidir (Denklem (7)).

4. Yapay Bağışıklık Sistemi

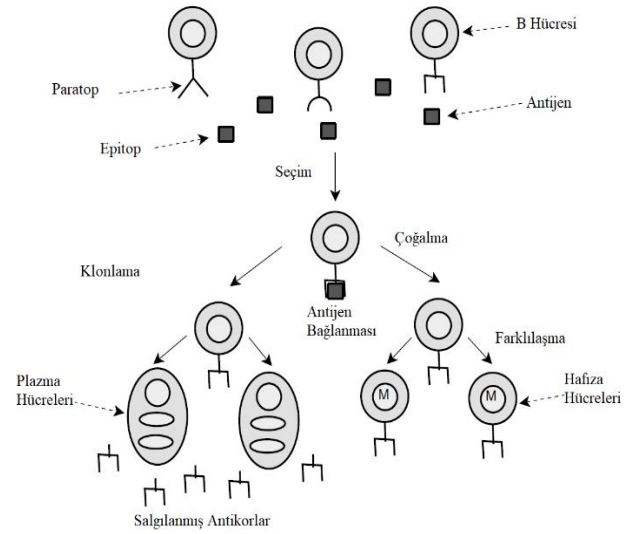
YBS, doğal bağışıklık sisteminden esinlenilerek ortaya çıkmış bir sistemdir. Bu sebeple algoritmayı daha kolay anlayabilmek adına öncelikli olarak doğal bağışıklık sisteminden bahsetmek daha doğru olacaktır.

4.1. Doğal Bağışıklık Sistemi ve Klonal Seçim Teorisi

Doğal bağışıklık sisteminin amacı organizmaları yabancı mikroorganizmalardan, hücrelerden ya da moleküllerden uzak tutmaktır. Bağışıklık sistemi vücuda giren yabancı (patojen) hücreleri tanıma, onlarla savaşma ve yok etme yeteneğine sahiptir. Hücrelerin yüzeyinde yer alan ve antijen olarak isimlendirilen enzim ya da toksin gibi maddeler bağışıklık sistemi tarafından tanınmakta ve antikorlar ile bir tepki oluşturmaktadır. Sonrasında antijen ile yüksek benzerlik gösteren antikorlar klonlanarak sayısı artmakta ve patojen ile daha kolay başa çıkmaktadır (Talbi, 2009).

Doğal bağışıklık sisteminin modellenmesi için M. Burnet tarafından önerilen klonal seçim teorisi klonlama ve afinite olgunlaşması kavramlarına dayanmaktadır. Şekil 2'de görüldüğü gibi vücut herhangi bir antijene maruz kaldığı zaman B lenfositleri tarafından üretilen antikorlar ile bir tepki oluşturmaktadır. B hücreleri belirli tipteki antijeni tanıyabilecek antikor yapısına sahiptirler. Antijen ve antikor arasındaki bağlanma antikor üzerindeki paratopun antijen üzerindeki epitop ile ne kadar iyi eşleştiğine bağlıdır. Bu eşleşmenin yüksek olması bağlanmanın ne kadar kuvvetli olacağını göstermektedir. En iyi benzerlik değerine sahip antijen ve antikorlar birbirine bağlandıktan sonra B hücreleri tarafından klonlama işlemi gerçekleşir. Klonlanmış hücrelerin bazıları antikor salgılayan plazma hücreleri olarak farklılaşırken bazıları da hafıza hücreleri olarak saklanmaktadır. Genetik çeşitliliği artırmak adına

klonlanmış hücreler hipermutasyona uğratılmaktadırlar. (Talbi, 2009).



Şekil 2. Bağışıklık Sistemindeki Klonal Seçim Mekanizması (Talbi, 2009)

4.2. Klonal Seçim Algoritması (CLONALG)

Yapay bağışıklık sistemi algoritmalarından bir tanesi Klonal Seçim Algoritması (CLONALG)'dir (De Castro ve Von Zuben, 2002). Klonal seçim teorisine dayanan bu algoritmanın seçim teorisindeki karşılıklarını vermek gerekirse; vücuda giren ve problem teşkil eden patojen üzerindeki antijenler eniyileme probleminin kendisine karşılık gelmektedir. Antijenlere karşı B lenfositleri tarafından üretilen antikorlar ise ele alınan problemin çözümü olarak karşılık bulmaktadır. Antijenler ve antikorlar arasındaki benzerlik değeri elde edilen çözüm için amaç fonksiyonu değerine karşılık gelmektedir. Çözümler benzerlik değerleri ile doğru orantılı olarak klonlama işlemine tabi tutulacaklardır.

Klonlanmış hücreler hipermutasyona uğrayarak bir olgunlaşma sürecine girerler. Bu süreçte antijene karşı antikorlar mutasyona uğrayarak benzerlik oranlarını artırmaya çalışırlar. Hipermutasyon sürecinde benzerlik değeri yüksek olan antikorlar daha az mutasyon oranına sahipken, benzerlik değeri düşük olan antikorlar daha yüksek mutasyon oranına sahiptirler. Olgunlaşma sürecinde ise hipermutasyona uğramış antikorlar benzerlik değerleri göz önünde bulundurularak bir seçime uğrarlar. Eniyi benzerlik değerine sahip antikorlardan belirli bir oran ile seçim yapılır. Seçim sonrasında geriye kalan ve benzerlik oranı düşük olan antikorlar yeni antikorlar ile yer değiştirirler. Bu aşama seçim teorisinde reseptör düzenleme olarak tanımlanmaktadır. Yeni antikorların dahil olması da bağışıklık sisteminde hücresel çeşitliliği, eniyileme problemlerinde çözüm çeşitliliğini artırmaktadır.

4.3.1. Klonlama Büyüklüğünün Belirlenmesi

Klonlama büyüklüğünün belirlenmesi çözümlerin benzerlik değerleri dikkate alınarak yapılmaktadır. Benzerlik değeri daha iyi olan çözümler daha çok sayıda klonlanırken, benzerlik değeri düşük olan çözümler daha az sayıda klonlanmaktadır. Yani yüksek benzerlik oranı daha çok sayıda klonlama büyüklüğü anlamına gelmektedir. Antikorların klonlanma sayıları Denklem (8)'de verilen eşitlik ile hesaplanmaktadır (Talbi, 2009).

$$N_c = \sum_{i=1}^n \text{round} \frac{\beta \cdot N}{i} \quad (8)$$

N_c , toplam klonlanma sayısını; n , klonlamaya uğrayacak antikor sayısını; β , klonlama çarpım faktörünü; N , popülasyon büyüklüğünü göstermektedir. Örneğin; $\beta = 1$, $N = 100$ olması durumunda en yüksek benzerlik değerine sahip olan ilk antikor 100 defa klonlanırken, ikinci en yüksek benzerlik değerine sahip olan antikor 50 defa klonlanmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında çarpım faktörü değerinin elde edilen çözümlerde eniyi amaç fonksiyonu değeri üzerindeki etkisi ortaya koyulmuştur (Atay, 2012). Klonlama çarpanının değişmesi durumunda benzerlik değerlerine de bağlı olarak antikorların klonlanma sayısında değişim meydana gelmektedir. Bu da bir sonraki hipermutasyon aşamasında antikorlarda meydana gelecek çeşitlik sayısını da etkilemektedir.

4.3.2. Hipermutasyon

Klonlama süreci tamamlandıktan sonra antikorların geliştirilebilmesi için hipermutasyon işlemi gerçekleştirilir. Hipermutasyonda farklı antikorlar farklı mutasyon oranlarına sahip olacaklardır. Mutasyon oranları belirlenirken yine benzerlik değerleri dikkate alınmaktadır. Klonlama sürecindeki mantığın tersi olarak benzerlik değeri yüksek olan antikor daha düşük mutasyon oranına sahip olurken, benzerlik değeri düşük olan antikor daha yüksek mutasyon oranına sahip olacaktır (Talbi, 2009). Genetik algoritmada mutasyon oranı düşük seviyelerde iken KSA'da mutasyon oranları daha yüksek seviyelerdedir (Engin & Döyen, 2004).

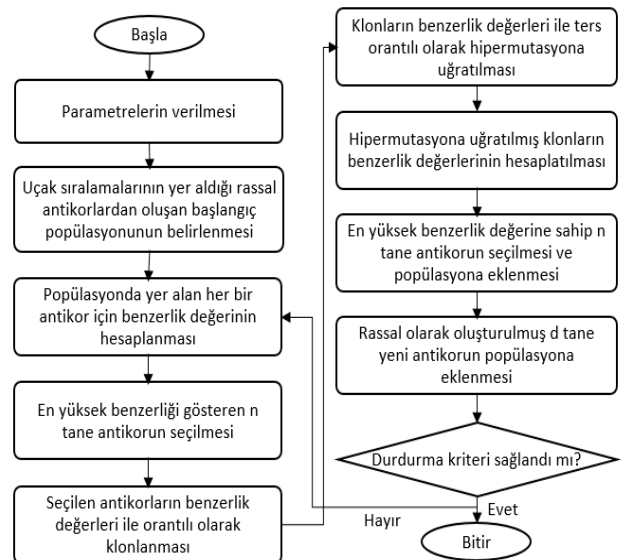
Antikorların mutasyona uğratılması için farklı teknikler bulunmaktadır. Bu teknikler; iki farklı gen bölgesinin yer değiştirmesi, antikorun ters çevrilip iki farklı gen bölgesinin yer değiştirmesi, genlerin ikili olarak yer değiştirmesi, ilk üç genin ters çevrilmesi, rassal belirlenen yerden itibaren ilk dört ters çevrilmesi vb. olarak sıralanabilirler (Atay, 2012).

5. Yöntem

Çalışmada ele alınan problem için uygulanan algoritmanın genel akış şeması Şekil 3'de verilmiştir (Talbi, 2009). Bu adımları daha ayrıntılı bir şekilde

açıklayacak olursak; öncelikli olarak probleme özgü olarak parametreler belirlenmelidir. Çalışmada ele alınan problem için bu parametrelerin başında uçak sayısı gelmektedir. Belirlenen zaman diliminde kaç adet uçağın operasyon gerçekleştireceği önceden tahmin edilebilmektedir. Ayrıca uçakların sınırlı sayıda yer değiştirmesi (CPS) prensibine göre en fazla ne kadar sıralamalarında değişiklik yapılabileceği de önceden algoritmaya tanıtılması gereken parametreler arasında yer almaktadır. Başlangıç popülasyonu büyüklüğü, artırma sayısı, seçim oranı (%) ve klonlama çarpım faktörü (β) de algoritmanın koşutlanması için belirlenmesi gereken parametrelerdir.

Başlangıç popülasyonu, rassal olarak oluşturulmuş popülasyon büyüklüğü kadar antikordan oluşmaktadır. Oluşturulan antikorlar verilen uçak kümesi için bir sıralamayı temsil etmektedirler. Her bir antikordaki sıralamalar için operasyonların toplam tamamlanma zamanı yani benzerlik değerleri hesaplanmaktadır. Hesaplama sırasında CPS için belirlenen sınırdan daha fazla sayıda sıralamasından sapan uçaklar sapma miktarları ile doğru orantılı olarak cezalandırılmaktadırlar. Ceza katsayısı 1000 olarak alınmıştır. Bu değer sapma miktarı ile çarpılarak cezalandırma yapılmaktadır. Benzerlik değerleri hesaplandıktan sonra antikorlar artan sıra ile sıralanmaktadır. Popülasyon büyüklüğü seçim oranı ile çarpılıp bir tamsayıya yuvarlanarak en iyi n tane antikorun seçimi yapılmaktadır. Seçilen en iyi antikorlardan yeni bir küme oluşturularak klonlama aşamasına geçilir ve benzerlik değerleri ile doğru orantılı olarak klonlamalar gerçekleşir (Denklem (8)). Benzerlik oranı yüksek olan yani çalışmada tamamlanma zamanı düşük olan antikorlar daha yüksek klonlanma sayısına sahip olacaklardır.



Şekil 3. CLONALG Algoritmasının Akış Şeması (Talbi, 2009)

Klonlama işlemi tamamlandıktan sonra antikolar hipermutasyona uğratılacaklardır. Bunun için öncelikli olarak benzerlik değerleri ile ters orantılı olarak mutasyon oranları belirlenecektir. Ele alınan problem için en küçük tamamlanma zamanına sahip olan antikorum mutasyon oranı daha yüksek tamamlanma zamanına sahip antikorum mutasyon oranından düşük olacaktır. Mutasyon oranları belirlenirken birbirinden farklı olan amaç fonksiyonu değerleri ile bu değerlerin toplamı oranlanmıştır. Toplam tamamlanma zamanının en küçüklenmesi hedeflendiği için küçük amaç fonksiyonu değerine sahip olan antikorum yüksek benzerlik oranına sahiptir. Bu sebeple her bir amaç fonksiyonunun, amaç fonksiyonları toplamına oranlanması arzu edildiği şekilde benzerlik oranı yüksek olanın mutasyon oranının düşük olmasını sağlayacaktır. Belirlenen mutasyon oranları kümülatif olarak toplanarak olasılık aralıkları belirlenmiştir.

Toplam klon sayısı kadar döngü oluşturulmuştur. Her bir döngüde üretilen rassal sayısının olasılık aralığına denk gelmesi durumunda mutasyon gerçekleştirilmiştir. Çalışmada mutasyon operatörü olarak ikili yer değiştirme seçilmiştir. İkili yer değiştirmede, rasgele seçilen iki farklı bölgede yer alan genlerin birbiriyle yer değiştirilmesi gerçekleştirilir. Şekil 4'de verilen örnekte koyu olarak yazılan 1. ve 3. bölgedeki genler yer değiştirilmiştir.

Orijinal antikorum	1	2	3	4	5
Değiştirilen antikorum	3	2	1	4	5

Şekil 4. Antikorumun İki Farklı Gen Bölgesinin Değiştirilmesi

Hipermutasyon aşamasından sonra klonlar yeniden hesaplanmış benzerlik değerlerine göre sıralanarak belirlenen oranda n tanesi seçilmektedir. Seçilen bu klonlar yeni popülasyonun antikorumlarını oluşturmaktadırlar. Benzerlik değeri kötü olan klonların yerine popülasyon büyüklüğünü tamamlayacak şekilde d tane yeni rassal antikorum eklenmektedir. Çalışmada popülasyona yeni antikorumlar oluşturulurken uçakların FCFS sıralamalarından sınırlı sayıda yer değiştirmesi prensibi göz önünde bulundurulmaktadır. Rassal olarak oluşturulmuş ancak CPS prensibinin göz önünde bulundurulduğu antikorumlardan oluşan kümeden yine rassal olarak d tane seçilerek yeni popülasyona eklenmektedir. Popülasyona yeni eklenecek antikorumların böyle oluşturulmasının sebebi, ilerleyen arıştırmalarda, çeşitliliği sağlamak adına eklenen bu antikorumların da en iyi çözüme ulaşmada katkıda bulunmalarına fırsat sağlamaktır. Aksi takdirde CPS sınırını aşan uçakların bulunduğu antikorumlar mevcut olacaktır. Bu antikorumların benzerlik değerleri CPS sınırını aşan uçakların yüksek ceza katsayısı ile cezalandırılması sonucu yüksek çıkacaktır. Seçim

aşamasına gelindiğinde benzerlik değerleri kötü olduğu için elenecekler ve bu sebeple algoritmadaki amaç fonksiyonunun gelişimine katkıda bulunamayacaklardır.

Verilen tüm bu algoritma adımları arzu edilen durdurma kriteri sağlanana kadar devam etmektedir. Durdurma kriteri arıştırma sayısı olabileceği gibi matematiksel model ile elde edilen eniyi çözümden daha iyisinin elde edilememesi de olabilmektedir. Çalışmada durdurma kriteri, küçük boyutlu senaryolar için eniyi çözüm değerinin elde edilmesi, diğer senaryolar için belirli arıştırma sayısı boyunca elde edilen eniyi çözümün tekrarlanmasıdır.

Bu çalışmada, araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

6. Bulgular

Bölüm 2'de tanımlanmış olan problem için önerilen CLONALG algoritması Monte Carlo simülasyonu ile oluşturulmuş farklı senaryolar için test edilmiştir. Senaryolarda hafif, orta ve ağır kategori uçak dağılım oranları sırasıyla %20, %50 ve %30 olarak alınmıştır. Tüm senaryolar için GAMS/CPLEX çözücü ve CLONALG algoritması ile sonuçlar elde edilmiştir. Her bir senaryoda CPS için uçakların FCFS sıralamalarından en fazla 1,2 veya 3 sıra yer değiştirmelerine izin verilmiştir. Uçak sayısının az olduğu senaryolar için GAMS/CPLEX çözücü ile arzu edilen sürede eniyi çözümler elde edilebilirken uçak sayısının artması durumunda çözüm sürelerinde yüksek oranda artış meydana gelmektedir. Bölüm 3'de bahsedildiği gibi uçakların operasyon sıralamalarının FAF'a gelmeden önce belirlenmiş olması gerekmektedir. Planlama ufkunu belirlemek adına, 50 deniz mili (nm) yarıçapında TMA yapısını düşünürsek bir uçağın ortalama 230 knot hızla uçuşması durumunda yaklaşık 13 dakikalık bir süre gerekmektedir. Son yaklaşma hattı boyunca harcaacağı zamanı göz önünde bulunduracak olursak 10 dakika içerisinde sıralama belirlenmelidir. Bu durumda çözüm süresi için 600 saniye sınırlandırma yapılmıştır. CLONALG algoritması eniyi çözüm değerinin bilindiği senaryolar için 1 kez oluşturulurken diğer senaryolar için 3 kez oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlardan en küçük olanı, üç sonucun ortalaması ve ortalama çözüm süresi paylaşılmıştır. Algoritma parametre değerleri Tablo 2'de paylaşılmıştır. Durdurma kriteri olarak eniyi çözüm değerinin bilindiği senaryolar için eniyi sonucun elde edilmesi, diğer senaryolar için belirli arıştırma sayısı boyunca elde edilen eniyi çözümün tekrar etmesi alınmıştır. Bu arıştırma sayısı maksimum 1500 olarak belirlenmiştir. Tüm test hesaplamaları 2.7 GHz, Intel Core i7 işlemcili ve 8 GB RAM kapasitesi olan bir bilgisayar ile yapılmıştır.

Tablo 2

CLONALG Algoritması Parametre Değerleri

Popülasyon büyüklüğü (N)	Klonlama çarpanı (β)	Seçim oranı (%)	Deneme sayısı
100	1	70	3

Algoritmanın test edilmesi amacıyla 10, 15, 20, 30 ve 40 uçağın yer aldığı 23 farklı senaryo oluşturulmuştur. 10 uçak için 3 farklı senaryo oluşturulurken diğer uçak sayıları için 5'er senaryo oluşturulmuştur. Her bir senaryo 1, 2 ve 3 CPS için test edilmiştir. Senaryolarda operasyonların FCFS sıralamasına göre tamamlanma zamanları ve 1, 2 ve 3 CPS için tamamlanma zamanları verilmiştir.

10 ve 15 uçaktan oluşan senaryolar için k-CPS yani bir uçağın ilk sıralamasından en fazla k sayısı kadar yere değiştirmesine izin verilmesi durumunda GAMS/CPLEX çözücü (z_g) ve CLONALG algoritması (z_a) ile elde

edilen sonuçlar Tablo 3'de paylaşılmıştır. Uçak sayısının az olduğu 8 farklı senaryo için matematiksel model ile elde edilen eniyi çözümler metasezgisel algoritma ile de elde edilebilmiştir. CPS prensibinde uçakların daha fazla sayıda yer değiştirmelerine olanak sağladıkça operasyonların toplam tamamlama zamanları FCFS zamanına göre giderek azalmaktadır. 10 uçak için tüm testlerde hem GAMS/CPLEX çözücü (t_g) hem de CLONALG algoritması (t_a) ile çok kısa sürelerde eniyi çözümlere ulaşılmıştır. 15 uçağın olduğu senaryolarda GAMS/CPLEX çözüm süresinin özellikle 3-CPS için çok uzun sürmeye başladığı görülmüştür. Bu çözüm sürelerinin tamamı arzu edilen 600 saniyelik sürenin üzerinde yer almaktadır. Ayrıca çözüm sürelerinin neredeyse tamamı operasyonların tamamlanma zamanından daha uzun sürmektedir. CLONALG algoritması ile eniyi çözümlere ulaşma sürelerine baktığımızda 1-CPS ve 2-CPS için 10 saniyenin altında, 3-CPS için de neredeyse tamamında 30 saniyenin altında sürmüştür.

Tablo 3

Uçak Sayısı 10 ve 15 için Test Sonuçları ve Çözüm Süreleri

Sn,	Uçak Sayısı	1-CPS					2-CPS				3-CPS			
		FCFS	z_g	t_g (s)	z_a	t_a (s)	z_g	t_g (s)	z_a	t_a (s)	z_g	t_g (s)	z_a	t_a (s)
1	10	741	741	1,0	741	1,0	679	2,1	679	1,4	679	10,3	679	1,6
2	10	832	757	1,0	757	0,8	757	2,2	757	0,8	757	9,6	757	0,9
3	10	982	858	0,5	858	0,9	793	2,2	793	0,9	770	7,7	770	1,4
4	15	1489	1353	1,5	1353	7,1	1262	65,1	1262	7,2	1210	967,2	1210	18,4
5	15	1315	1292	2,2	1292	1,8	1214	125,2	1214	2,9	1191	2089,8	1191	21,8
6	15	1464	1305	1,9	1305	2,2	1230	64,6	1230	6,8	1168	1948,1	1168	26,6
7	15	1340	1138	1,5	1138	3,2	1138	57,7	1138	3,4	1115	1475,7	1115	191,2
8	15	1422	1279	2,0	1279	5,3	1233	160,0	1233	3,6	1142	1289,6	1142	12,7

Tablo 4

20 Uçak için Test Sonuçları ve Çözüm Süreleri

Sn,	1-CPS					2-CPS				3-CPS				
	FCFS	z_g	t_g (s)	z_a	t_a (s)	z_g	t_g (s)	z_a	t_a (s)	z_g	rg(%)	$z_{a,min}$	$z_{a,ort}$	\bar{t}_a (s)
1	1919	1694	9,2	1694	12,0	1619	2746	1619	11,7	1619	70,1	1619	1619	23,3
2	1876	1732	8,2	1732	3,8	1592	4443	1592	35,2	1540	73,3	1540	1540	15,5
3	1857	1695	7,4	1695	18,0	1643	3614	1643	24,8	1620	83,5	1620	1632	32,1
4	1942	1795	9,1	1795	6,0	1707	2987	1707	11,4	1652	69,5	1652	1666,5	36,1
5	2009	1873	6,4	1873	27,4	1681	1816	1681	68,0	1645	72,5	1645	1665,5	74,5

Tablo 5

Uçak Sayısı 30 ve 40 için Test Sonuçları ve Çözüm Süreleri

Sn,	1-CPS						2-CPS						3-CPS					
	FCFS	z_g	rg(%)	$z_{a,min}$	$z_{a,ort}$	$\bar{t}_a(s)$	z_g	rg(%)	$z_{a,min}$	$z_{a,ort}$	$\bar{t}_a(s)$	z_g	$z_{a,min}$	$z_{a,ort}$	$\bar{t}_a(s)$			
1	2719	2606	33,27	2606	2606	55,2	2557	93,90	2469	2495	52,4	2469	2469	2469	24,8			
2	2996	2694	23,68	2717	2717	50,6	2570	92,22	2570	2570	21,1	2518	2518	2544	64,9			
3	3038	2794	30,19	2794	2794	12,7	2690	95,20	2667	2667	40,7	2560	2589	2622,7	96,9			
4	2781	2657	36,49	2657	2657	12,4	2628	92,39	2628	2628	27,1	2579	2579	2579	52,6			
5	2751	2565	24,19	2565	2582,3	39,2	2536	97,28	2536	2536	72,5	2484	2484	2484	39,7			
6	3653	3445	89,70	3445	3445	61,3	3416	99,93	3445	3455,7	77,6	3494	3344	3386,3	86,9			
7	3729	3596	92,63	3596	3607,7	75,3	3440	96,25	3463	3474,7	86,5	3463	3417	3459,3	105,2			
8	3705	3644	93,80	3644	3644	74,9	3449	100,00	3449	3466,3	108,1	3449	3377	3401	104,9			
9	3713	3498	89,45	3498	3498	50,0	3426	100,00	3452	3467,3	86,5	3348	3325	3340,3	88,7			
10	3877	3587	90,24	3587	3595,7	93,7	3480	100,00	3480	3509	70,2	3503	3405	3422,3	85,1			

Uçak sayısının 20'ye çıkarılması durumunda matematiksel model ile 2-CPS için de arzu edilen sürede eniyi çözümlere ulaşamadığı görülmüştür (Tablo 4). 20 uçak ve 3-CPS için bir günlük zaman diliminde dahi eniyi çözüme ulaşamadığı test edilmiştir. Bu sebeple 20 uçağa 3-CPS uygulandığı testler için 600 saniyelik süre sınırı verilmesi durumunda elde edilen çözüm değeri (z_g) ve elde edilen en iyi çözümün en iyi alt sınır değerine uzaklığı olan "Relative Gap" (rg) bilgisi paylaşılmıştır. Elde ettiğimiz çözümlerin kalitesi eniyi çözüme olan uzaklık olarak ölçülebilir. Eniyi çözüm değerine ulaşamadığımız durumlarda, örneğin enküçükleme problemleri için elde edilen alt sınır değeri olan, en iyi tahmin (best estimate) değerine ve o ana kadar elde ettiğimiz en iyi tamsayı çözüm (best integer) değerine sahip olmaktayız. Bu iki değer arasındaki fark "absolute gap" olarak adlandırılmaktadır. GAMS'in OPTCR özelliği olan "relative gap" (Denklem (9)), absolute gap değerinin elde edilen eniyi çözüm ya da eniyi tahmin değerlerinden en büyük olanına oranlanması ile elde edilmektedir (GAMS Destek, 2015):

$$rg = \frac{\text{eldeki eniyi tamsayı}}{\max(|\text{eniyi tahmin}|, |\text{eldeki eniyi tamsayı}|)} \quad (9)$$

Metasezgisel algoritma ile 20 uçak için çözüm sürelerine baktığımızda neredeyse tamamı 60 saniyenin altında sürmüştür. Matematiksel model kullanılarak 1-CPS, 2-CPS için elde edilen eniyi çözüm değerleri ve 3-CPS 600 saniyelik sürede elde edilen çözüm değerlerinin tamamı algoritma ile elde edilebilmiştir. 3-CPS için 3 deneme testi sonucunda elde edilen en küçük çözüm değeri ($z_{a,min}$), çözümlerin ortalamaları ($z_{a,ort}$) ve ortalama çözüm süreleri (\bar{t}_a) paylaşılmıştır.

Uçak sayısının 30 ve 40 olduğu senaryolar için test sonuçları Tablo 5'de paylaşılmıştır. İlk 5 senaryoda 30 uçak, diğer 5 senaryoda 40 uçak bulunmaktadır. Tüm senaryolar için 600 saniyelik zaman sınırı ile elde edilen matematiksel model sonuçları ve "relative gap" bilgisi

(rg) verilmiştir. 3-CPS için tüm senaryolarda rg bilgisi %100 olmuştur. Metasezgisel algoritma ile 3 deneme sonucunda elde edilen en küçük çözüm değeri, ortalama çözüm değeri ve ortalama çözüm süresi bilgileri paylaşılmıştır. Senaryoların algoritma ile test edilmesi durumunda çözüm sürelerine baktığımızda tamamı 120 saniyenin altında ve birçoğu 60 saniyenin altında sürmüştür. Matematiksel model ile elde edilen çözüm değerlerine birkaç test hariç çoğunlukla ulaşılmıştır. Hatta bazı testlerde matematiksel modelin 600 saniyelik sürede elde edilen çözüm değerlerinden daha iyi çözüm değerlerine algoritma ile ulaşıldığı görülmüştür. Bu duruma özellikle 40 uçağa 3-CPS izin verildiği testlerde karşılaşılmıştır.

GAMS/CPLEX çözücüsü ile 20 uçağa kadar 1-CPS izin verilmesi durumunda arzu edilen sürede eniyi çözümlere ulaşılmıştır. 2-CPS izin verilmesi durumunda ise 15 uçağa kadar arzu edilen sürede eniyi çözümlere ulaşılabilir. 3-CPS için ise sadece 10 uçak için bu geçerli olmuştur. Problem boyutu büyüdükçe ve CPS oranı artırıldıkça matematiksel model ile eniyi çözüme arzu edilen sürelerde ulaşmak mümkün olmamıştır. Testlerde eniyi çözüm değeri bilinen senaryoların çoğunun sonuçları algoritma ile de elde edilmiştir. Uçak sayısının ve CPS sayısının artırıldığı senaryolarda matematiksel modelin 600 saniyelik sürede elde ettiği çözümlerden daha iyi çözüm değerlerine algoritma ile kısa sürelerde ulaşmak mümkün olabilmektedir.

7. Tartışma ve Sonuçlar

Farklı kategoriler arasındaki kuyruk türbülans ayrımları değişiklik göstermesinden dolayı verilen bir uçak kümesi için operasyonların toplam tamamlanma zamanları uçaklar arasında yapılacak olan sıra değişikliklerine bağlı olarak değişmektedir. Uçakların FCFS sıralama disiplinine göre operasyonlarını gerçekleştirmeleri ve k-CPS ile operasyonlarını

gerçekleştirmeleri durumunda toplam tamamlanma sürelerinde büyük farklılıklar gözlemlenmiştir. Örneğin 40 uçakta bu fark 478 saniyeye kadar çıkmıştır. Bunun anlamı, k-CPS ile önerilen sıralamanın FCFS sıralama disiplinine göre göre bir saatlik pist operasyonu sırasında fazladan 4 taneye kadar uçağın inişine olanak sağlamasıdır. Bu durum pist kapasitesinde %10 oranında gibi ciddi bir artışa karşılık gelmektedir. Böyle bir artışın havalimanlarındaki oluşacak havadaki ve yerdeki bekleme ve gecikmeleri de ciddi ölçüde azaltacağı aşikârdır. Uçak sayısının ve CPS sayısının artırılması durumunda oluşturulan matematiksel model ile arzu edilen sürede çözümler elde edilememiştir. Ancak çalışmada önerilen CLONALG algoritması ile tüm testler için arzu edilen sürede çözümler elde edilebilmiştir. Yapılan testlerin birçoğunda en iyi çözüm değerlerine algoritma ile ulaşılabilmiştir. Uçak sayısının yoğun olduğu senaryolarda matematiksel model ile sınırlı sürede elde edilen çözümlerden daha iyi çözümlere de ulaşılabilmiştir. Bu sebeple, algoritma havaalanı operasyonlarında hava trafik kontrolörlerinin iş yükünü azaltmak amacıyla kullanılan mevcuttaki ve gelişmekte olan karar destek ve otomasyon sistemlerini destekleyici kabiliyete sahiptir. Bundan sonraki zamanda hem iniş hem de kalkış operasyonlarının yer aldığı bir çalışma yapılması planlanmaktadır. Ayrıca iniş uçakları için geliş rotaları da göz önünde bulundurulacaktır. Bu durumda emniyet ayırmalarının sadece pist üzerinde değil aynı zamanda havada da sağlanması gerekmektedir.

Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Zekeriya KAPLAN, literatür araştırması, matematiksel modelin oluşturulması ve bilgisayar ortamına aktarılması, çözüm algoritmasının belirlenip araştırılması, anlatılması ve probleme uygulanması, sonuçların elde edilmesi ve değerlendirilmesi; Cem ÇETEK, problemin tanımlanması, matematiksel modelin oluşturulması, çözüm algoritmasının belirlenmesi, sonuçların elde edilmesi ve değerlendirilmesi konularında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

Atay, Y. (2012). *Yapay bağışıklık sistemleri ile atölye çizelgeleme problemlerinin optimizasyonu* (Yüksek lisans tezi). Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya. Erişim adresi: <http://acikerisimarsiv.selcuk.edu.tr:8080/xmlui/handle/123456789/5461>

- Balakrishnan, H., & Chandran, B. G. (2010). Algorithms for scheduling runway operations under constrained position shifting. *Operations Research*, 58(6), 1650-1665. doi: <https://dx.doi.org/10.1287/opre.1100.0869>
- Beasley, J. E., Krishnamoorthy, M., Sharaiha, Y. M., & Abramson, D. A. (2000). Scheduling aircraft landings - The static case. *Transportation Science*, 34, 180-197. doi: <https://dx.doi.org/10.1287/trsc.34.2.180.12302>
- Briskorn, D., & Stolletz, R. (2014). Aircraft landing problems with aircraft classes. *Journal of Scheduling*, 17, 31-45. doi: <https://dx.doi.org/10.1007/s10951-013-0337-x>
- Chen, J., Weiszer, M., & Stewart, P. (2015). Optimal speed profile generation for airport ground movement with consideration of emissions. *IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, 1797-1802. doi: <https://dx.doi.org/10.1109/ITSC.2015.292>
- Çeçen, R. K., & Çetek, C. (2019). A two-step approach for airborne delay minimization using pretactical conflict resolution in free-route airspace. *Journal of Advanced Transportation*. doi: <https://doi.org/10.1155/2019/4805613>
- De Castro, L. N., & Von Zuben, F. J. (2002). Learning and optimization using the clonal selection principle. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(3), 239-251. doi: <https://dx.doi.org/10.1109/TEVC.2002.1011539>
- Desai, J., & Prakash, R. (2016). An optimization framework for terminal sequencing and scheduling: The single runway case. *Complex Systems Design & Management Asia. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 426. 195 - 207. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-29643-2_15
- Engin, O., ve Döyen, A. (2004). Yapay bağışıklık sistemleri ve endüstriyel problemlerde kullanımı. *G.U. Journal of Science*, 17(1), 71-84. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/publication/228634280_Artificial_immune_systems_and_applications_in_industrial_problems
- GAMS Destek. (2015). Erişim adresi: <https://support.gams.com/>
- Hong, Y., Choi, B., Lee, S., Lee, K., & Kim, Y. (2017). Optimal and practical aircraft sequencing and scheduling for point merge system. *International Federation of Automatic Control*, 50(1), 14644-14649. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1904>
- Hu, X. B., & Chen, W. H. (2005). Receding horizon control for aircraft arrival sequencing and scheduling. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*,

- 6(2), 189-197. doi: <https://dx.doi.org/10.1109/TITS.2005.848365>
- Hu, X. B., & Paolo, E. D. (2008). Binary-representation-based genetic algorithm for aircraft arrival sequencing and scheduling. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 9(2), 301-310. doi: <https://dx.doi.org/10.1109/TITS.2008.922884>
- ICAO. (2016a). *2016-2030 Global air navigation plan*. Montréal, Canada: International Civil Aviation Organization. Erişim adresi: <https://www.icao.int/airnavigation/Documents/GANP-2016-interactive.pdf>
- ICAO. (2016b). *Doc 4444, Procedures for air navigation services - Air traffic management*. Montréal, Canada: International Civil Aviation Organization. Erişim adresi: <https://ops.group/blog/wp-content/uploads/2017/03/ICAO-Doc4444-Pans-Atm-16thEdition-2016-OPSGROUP.pdf>
- Jia, X., Cao, X., Guo, Y., Qiao, H., & Zhang, J. (2008). Scheduling aircraft landing based on clonal selection algorithm and receding horizon control. *Proceedings of the 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, 357-362. doi: <https://dx.doi.org/10.1109/ITSC.2008.4732662>
- Kwasiborska, A. (2017). Sequencing landing aircraft process to minimize schedule length. *International Conference on Air Transport*, 28, 111-116. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.175>
- Lee, H., & Balakrishnan, H. (2008). Fuel cost, delay and throughput tradeoffs in runway scheduling. *2008 American Control Conference*, 2449-2454. doi: <https://dx.doi.org/10.1109/ACC.2008.4586858>
- Lieder, A., Briskorn, D., & Stolletz, R. (2015). A dynamic programming approach for the aircraft landing problem with aircraft classes. *European Journal of Operational Research*, 243, 61-69. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2014.11.027>
- Talbi, E.-G. (2009). *Metaheuristics*. Hoboken, New Jersey, USA: Wiley.
- Ulutaş, B. H. (2019). An immune system based algorithm for cell formation problem. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30, 2835-2852. doi: <https://dx.doi.org/10.1007/s10845-018-1407-x>
- Ulutaş, B. H., & İşlier, A. A. (2009). A clonal selection algorithm for dynamic facility layout problems. *Journal of Manufacturing Systems*, 28, 123-131. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2010.06.002>
- Vadlamani, S., & Hosseini, S. (2014). A novel heuristic approach for solving aircraft landing problem with single runway. *Journal of Air Transport Management*, 40, 144-148. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2014.06.009>
- Zuniga, C., Delahaye, D., & Piera, M. A. (2011). Integrating and sequencing flows in terminal maneuvering area by evolutionary algorithms. *30th Digital Avionics Systems Conference*, 1-11. doi: <https://dx.doi.org/10.1109/DASC.2011.6095980>