



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Havayolu operasyonlarında dayanıklı ekip eşleme için eniyileme yaklaşımı: bir havayolu şirketi uygulaması

An optimization approach for robust crew pairing in airline operations: an airline company application

Yazar(lar) (Author(s)): Esra ÖZKAN AKSU¹, İzzettin TEMİZ²

ORCID¹: 0000-0003-2142-2221

ORCID²: 0000-0001-8672-1340

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Özkan Aksu E. ve Temiz İ., "Havayolu operasyonlarında dayanıklı ekip eşleme için eniyileme yaklaşımı: bir havayolu şirketi uygulaması", *Politeknik Dergisi*, 24(2): 417-429, (2021).

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

DOI: 10.2339/politeknik.629311

Havayolu Operasyonlarında Dayanıklı Ekip Eşleme için Eniyileme Yaklaşımı: Bir Havayolu Şirketi Uygulaması

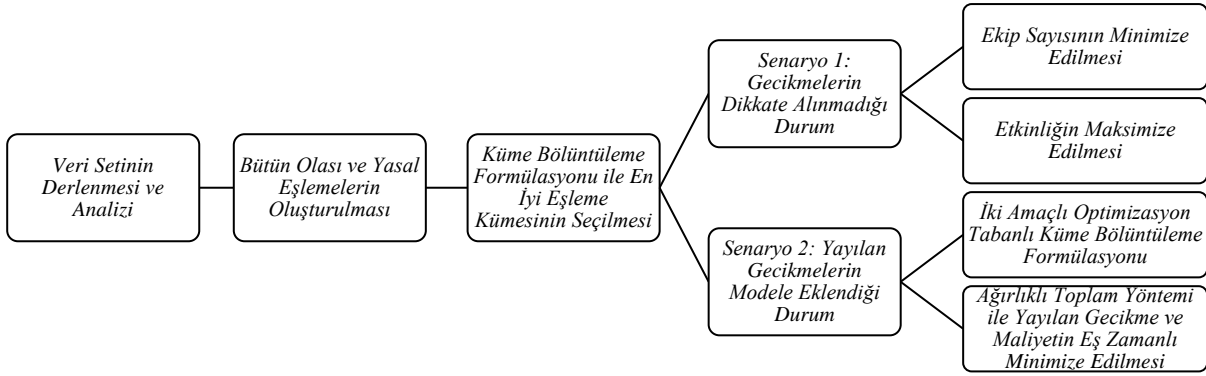
An Optimization Approach for Robust Crew Pairing in Airline Operations: An Airline Company Application

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Ekip eşleme probleminin farklı senaryolarla ele alınması / Handling the problem with different scenarios
- ❖ Yayılan uçuş gecikmelerinin modellenmesi / Modeling of propagated flight delays
- ❖ Gerçek gecikme verileri kullanılarak yapılan uygulama / Performing an application using real delay data
- ❖ İki amaçlı optimizasyon tabanlı yaklaşım / Bi-criteria optimization based approach

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Ekip eşleme problemi farklı senaryolar için iki amaçlı optimizasyon tabanlı bir yaklaşım ile çözülmüştür. / The crew pairing problem is analyzed with an approach based on bi-criteria optimization for different scenarios.



Şekil. Çalışmada izlenen metodoloji / Figure. Followed methodology in the study

Amaç (Aim)

Uçuşlardaki olası gecikmelerin planlama aşamasında hesaba katılması ve böylelikle düzensizliklere karşı daha dayanıklı çizelgelerin oluşturulması amaçlanmıştır. / It is aimed to take into consideration possible delays in flights during the planning phase and thus to organize more robust schedules against uncertainties.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Kurulan model, iki amaçlı optimizasyon tabanlı küme bölüntüleme formülasyonu ile çözülmüş ve daha sonra ağırlıklı toplam yöntemi ile amaçlar birleştirilmiştir. / The model is analyzed with set partitioning formulation based on bi-criteria optimization and then the objectives are combined with the weighted sum method.

Özgünlük (Originality)

Çalışma, ekip eşlemelerinin üretilme şekli, yayılan gecikmelerin hesaplanma yöntemi ve metodolojisi bakımından özgün bir çalışmadır. / It is an original study in terms of the way crew pairings are generated, the calculation method of propagated delays, and its methodology.

Bulgular (Findings)

Ekip sayısı ve yayılan gecikme toplamları farklı ağırlık değerleri için elde edilmiştir. / Number of crew and propagated delay totals were obtained for different weight values.

Sonuç (Conclusion)

Yayılan gecikme ve maliyet minimizasyonu amaçlarının tek başına ele alınması yerine birlikte ele alınmasının önem arz ettiği ve minimum ekip sayısı ile dayanıklılığın artırıldığı bir çizelge oluşturulabileceği sonucuna varılmıştır. / It was concluded that it is important to consider the propagated delay and cost minimization objectives together rather than handling them alone, and that with the minimum number of crew a schedule can be created in which robustness are increased.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

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

Havayolu Operasyonlarında Dayanıklı Ekip Eşleme için Eniyileme Yaklaşımı: Bir Havayolu Şirketi Uygulaması

Araştırma Makalesi / Research Article

Esra ÖZKAN AKSU^{1*}, İzzettin TEMİZ²

¹Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

²Denizcilik Fakültesi, Denizcilik İşletmeleri Yönetimi Bölümü, Mersin Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 04.10.2019 ; Kabul/Accepted : 30.03.2020)

ÖZ

Havayolu operasyonlarında, pahalı olan kaynakların etkin ve verimli bir şekilde kullanılabilmesi için, günümüz rekabet ortamında, çizelgelerin proaktif bir yaklaşım ile oluşturulması gerekmektedir. Olası aksaklık ve belirsizlik durumlarının planlama aşamasında hesaba katılması ve düzensizliklere karşı daha dayanıklı çizelgelerin oluşturulması sağlanmalıdır. Bu çalışmada, ekip çizelgeleme probleminin ilk adımı olan ekip eşleme problemi iki aşamalı olarak ele alınmıştır. İlk aşamada; ekip sayısının minimize edildiği ve etkinliğin maksimize edildiği farklı iki senaryo için küme bölüntüleme formülasyonu ile problem çözülmüş ve karar verici açısından farklı çözüm alternatifleri sunulmuştur. Problem modellenmeden önce karmaşık olan kısıt yapısından arındırılmış ve uçuş ayaklarını içeren bütün olası eşlemeler oluşturulmuştur. İkinci aşamada gecikmelerden daha az etkilenen bir eşleme kümesinin oluşturulması amaçlanmıştır. Türkiye'deki bir havayolu şirketine ait gerçek veriler kullanılarak yürütülen çalışmada, geçmiş gecikme değerleri analiz edilmiş ve her bir uçuş ayağı için ortalama bir gecikme değeri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu gecikme değerleri ile yayılan gecikmeler modellenmiştir. Bütün uçuş ayaklarını kapsayan en iyi eşleme kümesinin seçimi için kurulan model, iki amaçlı optimizasyon tabanlı bir yaklaşım ile çözülmüştür. Ağırlıklı toplam yöntemi ile amaçlar birleştirilmiş ve hem yayılan gecikmesi en az olan hem de en iyi maliyete sahip olan eşlemeler farklı ağırlık değerleri için elde edilmiştir. Önerilen metodoloji ile kabul edilebilir bir işlem zamanında problemin çözümüne ulaşılabildiği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Havayolu ekip çizelgeleme, ekip eşleme problemi, gecikme yayılımı, dayanıklı ekip çizelgeleme, küme bölüntüleme formülasyonu.

An Optimization Approach for Robust Crew Pairing in Airline Operations: An Airline Company Application

ABSTRACT

In order to use the pricy resources effectively and efficiently in airline operations, in the present competitive environment, schedules must be formed with a proactive approach. Possible delays and uncertainties must be taken into consideration during the planning phase and more robust schedules must be organized for uncertainties. In this study, crew pairing problem that is first step of the crew scheduling problem is handled at two stages. At the first stage, the problem is solved with a set partitioning formulation for two different scenarios where the crew number is minimized, and efficiency is maximized, and different solution alternatives are proposed for the decision maker. Before the problem is modelled, it is purified from the complicated constraint structure and all the possible pairings containing flight legs are created. At the second stage, it is aimed at forming a pairing set which is less affected by delays. In the study based on real data collected from an airline company in Turkey, the past delay values are analyzed, and an average delay value is calculated for each flight leg. With these calculated delay values, propagated delays are modelled. The model, which is formed to choose the best pairing set including all the flight legs, is analyzed with an approach based on bi-criteria optimization. The objectives are combined with the weighted sum method and pairings with optimal cost and less propagated delay are obtained for different weight values. With the proposed methodology, it is observed that the problem can be solved in reasonable operation time.

Keywords: Airline crew scheduling, crew pairing problem, delay propagation, robust crew scheduling, set partitioning formulation.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son zamanlarda yöneylem araştırması tekniklerinin kullanıldığı en önemli alanlardan bir tanesi de havayolu çizelgeleme problemleridir. Bir havayolu çizelgesi,

belirli bir uçuş kümesi için; uçuşun başladığı ve bittiği noktaları, kalkış ve varış zamanlarını veya uçuşlara atanan uçak ve ekip bilgilerini sağlar. Karışık havayolu operasyonları, pahalı kaynaklar ve havayolu endüstrisindeki rekabet ortamı düşünüldüğünde havayolu operasyonları için çizelge geliştirmek zorlu bir matematiksel programlama gerektirir. Bu problemlerdeki başlıca zorluklardan biri problemin boyutunun çok büyük olmasıdır. Çizelgeler üretilirken filo atama, ekip

* Bu çalışma, birinci yazarın ikinci yazar danışmanlığında hazırladığı Yüksek Lisans Tezinden üretilmiştir.

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : ozkanesra@gazi.edu.tr

atama ve uçuş atamalarının tek bir modelde birleştirilmesi milyonlarca değişken ve kısıtın kullanılmasını gerektirecektir.

Uçuş çizelgesini oluşturmak tek başına yeterli değildir. Aynı zamanda operasyonel gecikmelere ve çizelge performansının azalmasına sebep olan ve sonradan ortaya çıkan birçok aksaklık söz konusu olabilir. Bu aksaklıklara; uçak veya ekibin hazır olarak bulunmayışı, uçağın dolması sırasındaki beklenmeyen gecikmeler, güvenlik gecikmeleri, kapı problemleri, hava şartları ve hatta doğal felaketler örnek olarak verilebilir. Bütün bu aksaklıkların uçuş süresi üzerinde farklı etkileri söz konusudur ve bu etkiyi kesin olarak ölçebilmek hiç kolay değildir.

Diğer bir zorluk olan aksaklıkların yönetimi için alternatif seçenekler geliştirilmiştir. Ancak bu kolay bir süreç değildir. Örneğin bir doğal felaket sonucu yaşanan uçuş gecikmesi, takip eden diğer bütün uçuşların iptali ile sonuçlanabilir ve bu durum aynı çizelge ile devam etmeyi imkânsız kılabilir. Diğer taraftan bir ekip üyesinin hastalığından dolayı yaşanan bir gecikme, yedek ekip üyesinin kullanılması veya ekip eşlerinin yer değiştirmesi ile kolayca çözülebilir. Yani ne kadar çok kurtarma seçeneği ve alternatifi mümkünse aksaklık yönetimi o kadar iyi olur. Fakat problemin karmaşıklığı da bir o kadar artar. Gecikmeler ile başa çıkabilen ve bunu makul bir zaman aralığında gerçekleştirebilen çizelgelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu da esnekliği olan ve dayanıklı çizelgeleri önlemleri kılmaktadır. Dayanıklı çizelgeler aksaklıklara karşı daha az hassas ve bir bozulma durumunda tamiri daha kolay çizelgelerdir.

Havayolu operasyonları karmaşık yapısı ve problem boyutunun büyük olmasından dolayı literatürde genel olarak; uçuş çizelgeleme, uçak çizelgeleme (filo atama ve uçak rotalama), ekip çizelgeleme (ekip eşleme ve ekip atama) ve düzensiz olayların yönetimi (uçuş-uçak yeniden çizelgeleme ve ekip yeniden çizelgeleme) olmak üzere dört alt probleme ayrılarak planlanmaktadır. Bu problemler ardışık olarak çözülmekte ve her birinin çözümü bir sonraki problemin girdisini oluşturmaktadır. Bunlar arasında, çizelgeleme tekniklerinin kullanıldığı en önemlilerinden biri, ekip çizelgeleme problemidir. Havayolu şirketleri için ekip giderleri akaryakıt giderlerinden sonra en yüksek paya sahiptir. Bu nedenlerle bu çalışmada düşük maliyetli, etkin ve dayanıklı ekip çizelgesi elde etmek için gerekli olan eşleme kümelerinin oluşturulması ve en iyilerinin seçilmesi amaçlanmıştır. En iyi eşleme kümesinin seçilmesi konusunda, ekip maliyetleri indirgenirken aynı zamanda dayanıklılığın da sağlandığı bir yöntem izlenmiştir.

Literatürde havayolu ekip eşleme probleminin çözümü için, problem boyutunun büyüklüğü ve her kurum için değişebilen kurallar ve kısıt yapısı nedeniyle farklı yaklaşımlar ele alınmıştır. Bunlar; aksaklık olmayacağı düşünülerek çizelgeleme yapılması [1-33] veya olası aksaklık durumlarının dikkate alınması [34-49]; ekip eşleme ve atama aşamalarının ayrı ayrı [11, 12, 15, 17,

18, 25] veya eş zamanlı [7, 16, 30, 38] olarak ele alınması; günlük [10, 12, 15, 17, 34, 38, 41], haftalık [25] veya aylık [24] yaklaşım ile problemin çözülmesi; diğer çizelgeleme aşamaları (uçak rotalama, filo atama vs.) ile entegre olarak [6, 19, 20, 22, 23, 32, 33, 36, 45, 47-49] veya tek başına [5, 9-18, 21, 24-31, 34, 35, 37-44, 46] ele alınması olarak gruplanabilir. Bunun dışında en iyi eşleme kümesinin seçimi için literatürde; Sütun Oluşturma Algoritması [7, 9, 10, 15, 18, 26-28, 32, 33, 38, 42], Genetik Algoritma [12, 15, 16, 25, 31], Karınca Koloni Algoritması [13], Dal-Sınır Algoritması [14, 27], Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması [21], Süpürme Algoritması [17], Değişken Komşu Arama Algoritması [29], Küme Kapsama Formülasyonu (KKF) [26, 31, 42] veya Küme Bölüntüleme Formülasyonu (KBF) [7, 46] gibi farklı çözüm yöntemleri kullanılmıştır.

Literatürde dayanıklı havayolu ekip eşleme problemini konu alan çalışmalardan Yen ve Birge [34] tarafından havayolu ekip eşleme problemi için iki safhalı olasılıklı programlama yaklaşımı önerilmiştir. Aksaklıklara karşı dayanıklılık sağlanması amacıyla ekip yer sürelerinin artırılması ve her bir uçuş çifti arasındaki ilave süre ile beklenen gecikme süresi farkının minimize edilmesi ele alınmıştır. Amaç, oluşabilecek aksaklıklara dayanıklı çözümler üreten ve yayılan gecikmelerin etkisini minimize eden yaklaşımlar geliştirmektir. Tam vd. [37] gecikme durumundaki düzensizliklerden kaynaklı maliyetleri azaltmayı ve çizelgeye dayanıklılık katmayı amaçlamışlardır. Çalışmada olasılıklı programlama ve iki amaçlı optimizasyon karşılaştırılmıştır. Dück vd. [40] tarafından yapılan çalışmada ekip ve uçak çizelgelerinin tutarlılığını artırmak ve gecikme yayılımını azaltmak amaçlanmıştır. Bunun için olasılıklı model ve sütun üretme tabanlı bir yaklaşım sunulmuştur. Sonuçta deterministik ve olasılıklı modeller karşılaştırılmış ve olasılıklı modelin daha çok zaman gerektirdiği belirtilmiştir. Ayrıca olasılıklı modelin kullanılan gecikme senaryolarına uyarlanabiliyor olması bir avantaj olarak gösterilmiştir. Soykan [46] genel KBF'yi çift amaçlı olarak kullanmış ve hem yayılan gecikmelerin beklenen değerlerini minimize etmeyi, hem de maliyet etkin bir çözüm elde etmeyi amaçlamıştır. Türkiye'deki orta ölçekli bir havayolu şirketinden elde ettiği gerçek veri setini iki alt parçaya ayırmıştır. Birinci parçasını yayılan gecikmelerin beklenen değerinin optimize edilmesinde, ikinci parçasını ise elde edilen çözümlerin değerlendirilmesinde kullanmıştır. Dal sınır ağacının her bir düğümünde sütun oluşturma yöntemi uygulanan dal ücret esaslı bir algoritma geliştirmiştir. Çözümlerin dayanıklılık performansının değerlendirilmesi için ise, bir benzetim modeli önermiş ve son aşamada bu model ve algoritmaları bir karar destek çerçevesinde kavramsal olarak birleştirmiştir.

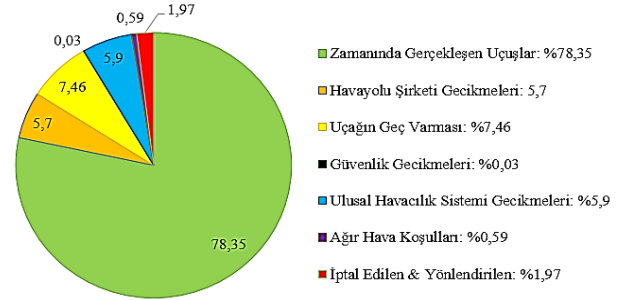
Havayolu ekip çizelgeleme problemi ile ilgili yapılan önceki çalışmalarda yayılan gecikme hesabı için genellikle beklenen gecikme değerinin olasılıklı programlama ile modellenmesi [34] veya gecikme değerlerinin bir dağılıma uydurulması [46] kullanılmıştır. Olasılıklı programlama modellerinde [34,

37, 38, 40, 41] aynı gün içerisindeki uçuşlardaki gecikmeler arasında bağlantı olmadığı varsayılmaktadır. Ancak, gerçekte uçuşlardaki gecikmelerin birbirinden bağımsız olması söz konusu değildir. Ayrıca, rassal değişkenlerin gerçek olasılık dağılımları, herhangi bir standart olasılık dağılıma uygun olmayabilir. Havayolu operasyonlarında olasılık dağılımlarının sağlıklı olarak tespit edilememesi nedeniyle, bu çalışmada olasılıklı programlama yaklaşımı tercih edilmemiştir. Çalışmanın gecikmeleri dikkate alan diğer çalışmalardan [34, 37, 39, 40, 46] farkı ise; gerçek gecikme verilerin kullanılması, eşleme kümelerinin belirlenmesi için uygulanan metodoloji ve istatistiksel bir yaklaşım ile her bir uçuş ayağı için ortalama bir gecikme değeri hesabı yapılarak bu değerlerin eşlemelerin yayılan gecikme hesabında kullanılmasıdır. Havayolu şirketlerinde yaşanan gecikmeler daha önce yaşananlardan bağımsız olabilmektedir, fakat çalışmada her bir uçuş ayağı için yeteri kadar geçmiş gecikme verisinin incelenmesi ve o uçuş ayağı için ortalama bir gecikme değerinin belirlenmesiyle gelecekteki gecikme değerleri için bir öngörü oluşturulabileceği düşünülmektedir. Ayrıca modelin bu gecikmelerin takip eden uçuşlara yayılmasını minimuma indirecek şekilde kurulması dayanıklılığın artmasını sağlamıştır. Çalışmada en iyi eşleme kümesinin belirlenmesi süreci, karşılaştırma açısından, gecikmeleri içeren ve içermeyen farklı senaryolar için iki amaçlı optimizasyon tabanlı bir yaklaşım ile çözülmüştür. Bu nedenlerle çalışmanın havayolu operasyonlarında aksaklık yönetiminin önemli hususunda farklılık oluşturacağı düşünülmektedir.

2. HAVAYOLU OPERASYONLARINDA DÜZENSİZ OLAYLARIN VE GECİKMELERİN ANALİZİ (THE ANALYSIS OF IRREGULAR EVENTS AND DELAYS IN AIRLINE OPERATIONS)

Havayolu operasyonları ile ilgili işleyiş genellikle planlanandan çok daha farklı olabilmektedir. Yöneylem araştırmasındaki ilerlemelere rağmen, özellikle havayolları ile ilgili günlük operasyonlarda çok fazla belirsizlik olduğundan, bu gelişmeler de yetersiz kalabilmektedir. Bu sebeple havayolları için aksaklık yönetimi bütüncü bir rol üstlenmektedir. Aksaklık yönetimi uçuş, uçak, ekip ve yolcu seviyelerindeki yeniden çizelgeleme kararlarının yapılandırılması demektir. Düzensizliğe sebep olabilen çok sayıda muhtemel durum söz konusudur. Birleşmiş Milletler Ulaşım Departmanı'nın Ulaştırma İstatistikleri Bürosu (BTS) bu aksaklıkları genellikle beş sınıfa ayırmaktadır. Bunlar; havayolu şirketi aksaklıkları, ulusal havacılık sistemi aksaklıkları, ağır hava koşulları, uçağın geç varması ve güvenlik aksaklıklarıdır. Bu beş sınıfın dışında uçuşların iptal edilmesi veya başka bir havaalanına yönlendirilmesi gibi özel durumlar da mevcuttur. Bütün bu düzensiz olaylar çoğu zaman gecikmeler ile sonuçlanmaktadır ve bu gecikmeler havayolu operasyonlarında önemli aksaklara sebep olmaktadır. Uçuş gecikmelerinin bahsi geçen durumlara

göre, son 3 yıl içerisindeki dağılımını gösteren BTS istatistikleri Şekil 1'de verilmiştir.

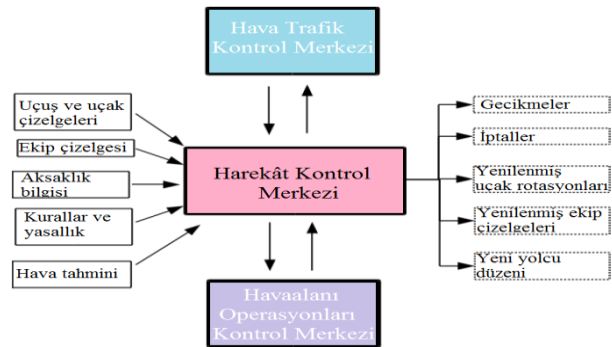


Şekil 1. Nedenlerine göre son üç yıldaki uçuş gecikmeleri dağılımı [50] (Distribution of flight delays over the last three years according to causes)

Şekil 1'de verilen uçuş gecikmeleri dağılımı, Mart-2013 ile Mart-2016 dönemleri arasındaki, toplam üç yıllık uçuşlar ile ilgilidir. BTS tarafından internet sitesinde yayımlanmıştır ve belli ülke ve havayollarını kapsamaktadır. Bu istatistiklere göre eğer bir uçuş, varış yapacağı havaalanına, çizelgelenen zamanına göre 15 dakika veya daha fazla geç varmış ise gecikmiş olarak sayılmaktadır. Şekle göre, son üç yılda uçuşların %21,65'i herhangi bir sebepten ötürü gecikmiştir. Gecikme sebepleri arasında en az oran güvenlik gecikmelerine (%0,03) ait iken en fazla oran ise uçağın geç varmasına (%7,46) aittir.

2.1. Düzensiz Olayların Yönetimi (Management of Irregular Events)

Havayolu operasyonlarında aksaklık durumu olduğu bir kurtarma planı uygulanır. Bu kurtarma süreci genellikle bir kontrol merkezi tarafından yürütülür. Çoğu havayolu şirketi, merkezileştirilmiş ve görevi; uçuş çizelgeleri, uçaklar, havaalanları, ekipler veya hava trafik yönetimi gibi günlük operasyonları gözetmek olan bir Harekât Kontrol Merkezi'ne sahiptir. Bu merkezin girdileri ve çıktıları Şekil 2'de özetlenmiştir.



Şekil 2. Havayolu harekât kontrol merkezi girdi ve çıktıları [51] (Inputs and outputs of airline operations control center)

Temel bir harekât kontrol merkezinde olası bir aksaklık ile karşılaşıldığında; bu aksaklığa sebep olan haller, mevcut durumdaki çizelge bilgileri, kurallar, düzenlemeler ve hava tahmini gibi bilgiler girdileri

oluşturur. Bu girdiler dışında Hava Trafik Kontrol Merkezi ve Havayolu Operasyonları Kontrol Merkezi ile de bilgi alışverişinde bulunularak bir kurtarma planı oluşturulur. Bu kurtarma planı sonucu, aksaklığın hangi aşamada meydana geldiğine bağlı olarak revize edilmiş planlar bu sistemin çıktılarını oluşturur. Havayolu hareket kontrolörleri aksaklıkları yönetirken genellikle üç strateji kullanırlar [51]. Bunlar;

- Herhangi bir rotaya ait uçuşlardan birinde aksaklık meydana geldiğinde ve uçuş geciktiğinde, bu gecikmenin o uçuşu takip eden bütün uçuşlara, tampon süre ile absorbe edilinceye kadar yayılmasına izin vermek.
- Özellikle ana dağıtım üssü – kenar üs (hub and spoke) şebeke yapısında genellikle çevrimsel bir yapıda olan uçak rotaları için en az bir çevrimdeki bütün uçuşları iptal etmek.
- Aksaklığın rota boyunca yayılması hafifletilmek istendiğinde geçici olarak uçağın değiştirilmesidir.

2.2. Uçuş Gecikmelerinin Hesaplanması (Calculation of Flight Delays)

Gecikmelerin ölçülmesi için son zamanlarda kullanılan standart birim ‘operasyon başına ortalama gecikme’dir. Ama bu birimin tek başına yeterli olmadığı ve tam olarak durumu açıklamadığı konusunda bir fikir birliği de mevcuttur. Yine de büyük çaplı bir havaalanı için aşağıdaki genel yapı söz konusudur [52];

- Ortalama gecikmenin 5 dakikanın altına düştüğü durumlar tolere edilebilir.
- 10 dakikanın üzerindeki bir ortalama gecikme sorun teşkil etmektedir.
- 20 dakikanın üzerindeki bir ortalama gecikme, havaalanının tıkanıklığa karşı işlem yapabileceği noktasında önemli bir karışıklık içinde olduğunu gösterir.

Bir uçuş gecikmesi hesaplanırken eğer bir erken varış söz konusu ise, bu uçuş zamanında gerçekleşmiş olarak kabul edilmektedir. Erken biten uçuşu takip eden uçuş, çizelgelenen başlangıç zamanı gelmeden gerçekleştirilemeyeceği için, bu erken varış durumu herhangi bir gecikmeyi sönmülemeyecek ve dolayısıyla hesaplamalarda gecikme değeri sıfır olarak alınacaktır. Uçuş gecikmeleri, Eurocontrol, BTS, CODA (Gecikme Analizi Merkez Ofisi), FAA (Federal Havacılık İdaresi) gibi ulusal veya uluslararası havacılık kuruluşlarının tuttuğu istatistikler ve yayınladıkları raporlarda genel olarak üç farklı yöntemle araştırılmaktadır. Bu üç yöntem *blok süresini aşma yüzdesi*, *uçuş dakikliği* ve *yayılan gecikme* hesaplarıdır.

Blok süresi uçuşun kalkış zamanı ile varış zamanı arasında geçen süredir. Planlanan blok süresi (*PBS*) ile gerçekleşen blok süresi (*GBS*) değişen şartlar ve meydana gelen aksaklıklardan dolayı birbirinden farklı olabilir. *GBS*'nin *PBS*'den fazla olduğu durumlarda blok süre aşımı (*BSA*) söz konusudur. Herhangi bir *i* uçuşuna ilişkin *BSA* hesaplaması Eş.3'te görülmektedir. Eş.1 ve Eş.2'deki $PVZ = \text{Planlanan Varış Zamanı}$, $PKZ =$

Planlanan Kalkış Zamanı, $GVZ = \text{Gerçekleşen Varış Zamanı}$ ve $GKZ = \text{Gerçekleşen Kalkış Zamanı}$ anlamına gelmektedir.

$$PBS_i = PVZ_i - PKZ_i \quad (1)$$

$$GBS_i = GVZ_i - GKZ_i \quad (2)$$

$$BSA_i = GBS_i - PBS_i \quad (3)$$

Blok süre aşımı negatif bir değer ise sıfır olarak alınmalıdır. Çünkü bu durumda blok süresini aşma söz konusu değildir. *BSA yüzdesi*; gerçekleşen blok zamanı, planlanan blok zamanını aşan uçuşların yüzdesidir. Yani, blok süre aşımı pozitif olan uçuşların toplam uçuşlar içerisindeki yüzdesi anlamına gelir. Uçuş gecikmelerinde en yaygın olan gösterge varış gecikmeleridir. Genel bir yargı olarak uçak varış lokasyonuna geç varmış ise gecikmiş sayılmaktadır. Fakat bu geç varma durumu, bir sonraki uçuşun kalkışının gecikmesine sebep olacağından kalkış gecikmesi (*KG*) kavramı ortaya çıkmaktadır. Önceki uçuşun geç varmadığı durumlarda da ekip üyesinin hastalanması, uçak arızası gibi sebepler ile kalkış gecikmesi söz konusu olabilir ve bu yine bir varış gecikmesi (*VG*) ile sonuçlanır. Bu iki kavram birbiri ile doğrudan etkileşim içindedir ve herhangi bir *i* uçuşu için Eş.4 ve Eş.5'teki gibi hesaplanırlar. *Uçuş dakikliği* kavramı ise varış ve kalkış gecikmeleri arasındaki farktır. Dakika birimi ile kullanılır ve gecikme hesaplamalarında planlamacılar için bir gösterge teşkil eder. Eş.6'da herhangi bir *i* uçuşu için uçuş dakikliği hesaplaması verilmiştir.

$$KG_i = GKZ_i - PKZ_i \quad (4)$$

$$VG_i = GVZ_i - PVZ_i \quad (5)$$

$$i \text{ Uçuşunun Dakikliği} = VG_i - KG_i \quad (6)$$

Uçuş dakikliği için en iyi durum sıfıra eşit olması durumudur. Çünkü bu her şeyin planlandığı gibi gittiğinin bir göstergesidir. Fakat planlamacılar genellikle bu değerin negatif olmasını isterler. Böylece olası kalkış gecikmelerini tolere edebileceklerini düşünürler. Uçuş dakikliğinin sıfıra eşit olup olmama durumuna göre kalkış ve varış gecikmeleri arasındaki ilişki Eş.7 - Eş.9 ile gösterilmiştir. Avrupa'daki uçuş gecikmelerinin analiz sonuçlarından yola çıkarak araştırmacılar, varış gecikmesinin kalkış gecikmesinden ortalama olarak 3 dakika daha az olduğunu söylemişlerdir. Bu da her bir uçuşun ortalama olarak 3 dakikalık bir gecikmeyi kurtarabileceğinin göstergesidir [53].

$$\text{Uçuş dakikliği} = 0;$$

$$\text{Varış Gecikmesi} = \text{Kalkış Gecikmesi} \quad (7)$$

$$\text{Uçuş dakikliği} > 0;$$

$$\text{Varış Gecikmesi} > \text{Kalkış Gecikmesi} \quad (8)$$

$$\text{Uçuş dakikliği} < 0;$$

$$\text{Varış Gecikmesi} < \text{Kalkış Gecikmesi} \quad (9)$$

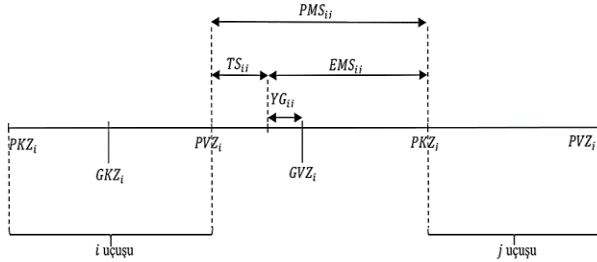
Havayolu planlamacıları açısından bir uçuşun gecikmesinden daha kötü olan, bu gecikmenin takip eden diğer uçuşlara yayılmasıdır. İki uçuş arasında yeteri kadar bir bekleme zamanı yoksa bir uçuşta meydana gelen aksaklığın diğer uçuşa yansması kaçınılmaz olacaktır. Bu nedenle çizelgeler oluşturulurken genellikle uçuşlar arasında tampon süreler eklenmektedir. Tampon süre (TS) iki uçuş arasında planlanan mola süresi (PMS) ile havayolu şirketince veya yasalar ile belirlenmiş en az mola süresi (EMS) arasındaki farka eşittir. En az yer süresi ekiplerin hazır olması için gereken en az süredir ve sabit bir değerdir. Bu durumda herhangi bir i uçuşu ile j uçuşu arasındaki tampon süre Eş.10'daki gibi hesaplanır.

$$TS_{ij} = PMS_{ij} - EMS_{ij} \quad (10)$$

Tampon süreler ekiplerin hazır olma süresi bittikten sonra bekledikleri atıl süre olarak görülebilir. Fakat çoğu durumda; gecikmeleri sönmüledikleri, çizelgeye esneklik sağladıkları ve gecikme yayılımını engelledikleri için dayanıklı çizelgeler oluşmasını sağlamaktadırlar. Uçuşlar arasındaki mola periyotlarına yayılan gecikmeleri engellemek amacıyla TS 'ler eklendiğinden i uçuşundan j uçuşuna yayılan gecikme (YG) Eş.11'deki gibi hesaplanmaktadır [54].

$$YG_{ij} = \max(VG_i - TS_{ij}, 0) \quad (11)$$

Eş.11'den şu sonuç çıkmaktadır; bir uçuştan onu takip eden uçuşa yayılan gecikme, uçuşun toplam varış gecikmesi ile i tampon süre arasındaki fark sıfırdan büyük ise bu fark kadardır. Bu fark sıfırdan küçükse veya sıfıra eşit ise yayılan gecikme söz konusu değildir. Ayrıntıları verilen bu kavramlar ile birlikte, bir i uçuşundan j uçuşuna yayılan gecikme şematik olarak ve en basit hâli ile Şekil 3'te görülmektedir.



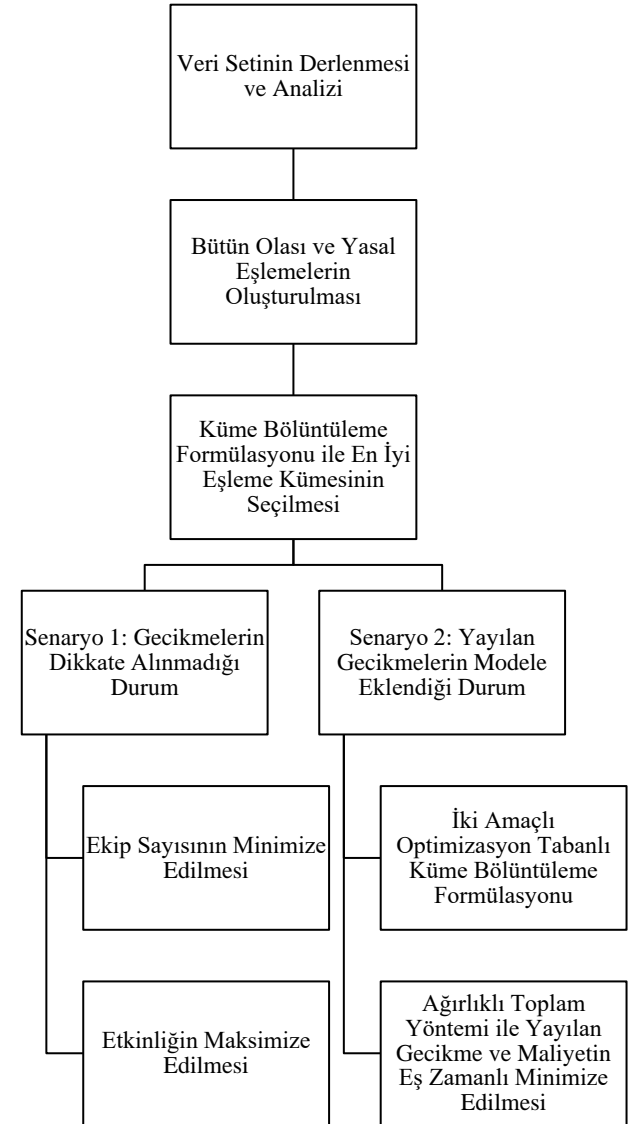
Şekil 3. Bir uçuştan diğerine yayılan gecikmenin şematik gösterimi (Schematic representation of delay propagation from one flight to another)

Şekil 3 incelendiğinde i ve j uçuşu arasındaki planlanan mola süresi (PMS_{ij}) ile en az mola süresi (EMS_{ij}) farkından elde edilen tampon süre (TS_{ij}), i uçuşunda yaşanan gecikmeden çıkarıldığında i uçuşundan j uçuşuna yayılan gecikmenin (YG_{ij}) bulunduğu görülmektedir.

3. EKİP EŞLEME PROBLEMİ (CREW PAIRING PROBLEM)

Çalışmanın bu bölümünde, havayolu operasyonlarında ekip çizelgelemenin ilk aşamasını oluşturan ekip eşleme

probleminin çözümü üzerinde durulmuştur. Bunun için bir havayolu şirketinin 2011 yılına ait gerçek uçuş verilerinden faydalanılmıştır. Eşlemeler kabin ekibi için oluşturulmuştur. Bunun sebebi kokpit ekibi için eşleme probleminin filo tipi bilgilerini de gerektirmesidir. Oysa çalışmada uçuş çizelgesindeki, filo tipi farklılığı ayırt edilmeden, bütün uçuş ayakları göz önünde bulundurulmuştur. Kabin ekibi için, özellikle yurt dışı uçuşlarında, yabancı dil bilgisi gibi farklı özellikler arandığından ve bu uçuşlar genellikle aktarmalı ya da uzun menzilli olduğundan, sadece yurt içi uçuşlar dikkate alınmıştır. Ayrıca günlük problem göz önünde bulundurulmuş ve bir günlük uçuşlar için eşlemeler oluşturulmuştur. Bütün işlemler için 2,40 GHz Intel(R) Core(TM) i7-4700MQ CPU ve 8 GB RAM'e sahip 64 bit, Microsoft Windows 10 işletim sisteminde çalışan kişisel bir bilgisayar kullanılmıştır. Çalışmada izlenen metodoloji Şekil 4'teki şemada özetlenmiştir.



Şekil 4. Ekip eşleme problemi için çalışmada izlenen metodoloji (Followed methodology in the study for crew pairing problem)

3.1. Çalışmadaki Sınırlama ve Varsayımlar

(Limitations and Assumptions in the Study)

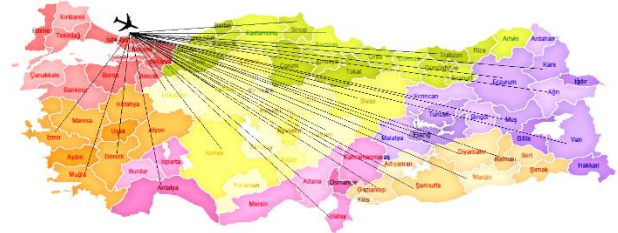
Havayolu ekip eşleme problemi için birçok kısıtlayıcı kural ve sınırlama vardır. Ülkemizde bu kısıtlamalar Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü (SHGM) tarafından yayımlanan “Uçucu Ekip Uçuş Görev ve Dinlenme Süreleri ile Uygulama Esasları Talimatı (SHT-6A.50 Rev. 05)” ile belirlenmiş olup, bunun dışında havayolu şirketinin kendi koyduğu kurallar da söz konusudur. Ayrıca problem büyük boyutlu ve karmaşık olduğundan bazı varsayımların yapılması da gerekmektedir. Bahsi geçen talimata göre belirlenmiş sınırlamalar ve çalışmadaki varsayımlar Çizelge 1’de özetlenmiştir. Günlük ekip eşleme probleminde eşlemeler bir görev periyodundan (en fazla 4 uçuş ayağı) oluştuğu için, görev periyodu kısıtları da eşleme kısıtları gibi dikkate alınmaktadır. Çizelge 1’deki sınırlamalar bahsi geçen talimat ile belirlenen yasal zorunluluklardır. Çalışma boyunca problem çözülürken bu kurallar dikkate alınmıştır.

3.2. Verinin Analizi (Analysis of the Data)

Çalışmada kullanılan veri bir havayolu şirketinin 2011 yılına ait altı aylık uçuş verilerini içermektedir. 40263 adet uçuşu içermektedir.

Kullanılan orijinal veri setinin içerdiği bilgilerin görülebilmesi için, ilk ve son birkaç satırdan oluşan sadece küçük bir kısmı Çizelge 2’de verilmiştir. Çizelge

2’de bir kısmı görülen verinin tamamı çalışmanın ikinci kısmındaki gecikme analizi için kullanılmıştır. Bir günlük ekip eşleme problemi için, günlük uçuşların her gün yapıldığı varsayılarak, uçuş yoğunluğunun daha fazla olduğu yaz dönemine denk gelen bir tarihteki uçuşlar üzerinden planlama yapılmıştır. Bu tarihten başlayıp ertesi güne sarkan uçuş dizileri de söz konusu olabileceğinden, eşlemelerin oluşturulması için ertesi günün uçuşlarının bir kısmı da kullanılmış ve günlük planlama için toplamda 232 uçuş üzerinde çalışılmıştır. Havayolu firması için ekiplerin konumlandığı ve eşlemelerin başlayıp sonlandığı ana üs İstanbul’dur. Bu nedenle uçuşlar ya İstanbul’a ya da İstanbul’dan hareket edecek şekildedir. Günlük problem verisinde İstanbul ana üssünün dışındaki kenar üsler 32 tanedir. Firmanın her gün tekrarlanan İstanbul merkezli bu uçuşları Şekil 5’te görselleştirilmiştir.



Şekil 5. Havayolu şirketinin İstanbul merkezli uçuşları (İstanbul centered flights of air carrier)

Çizelge 1. Çalışmadaki sınırlama ve varsayımlar (Limitations and assumptions in the study)

SINIRLAMALAR	Varsayımlar
<ul style="list-style-type: none"> Eşlemeler ana üste başlayıp ana üste bitecek şekildedir. Bir uçuşun varış havaalanı kendini takip eden uçuşun kalkış havaalanı ile aynıdır. Bir uçuşun kalkış zamanı ondan bir önceki uçuşun varış zamanından sonradır. Birbirini takip eden iki uçuş arasında en az 30 dakika mola süresi vardır. Bir uçuş görevindeki uçuş hazırlığının başlaması ile günün ilk uçuş seferi arasındaki ön bilgilendirme (briefing) süresi 1 saattir. Bir uçuş görevindeki son uçuş ayağının sona ermesi ile mesainin kapanması arasındaki son bilgilendirme (debriefing) süresi 30 dakikadır. Yaz dönemi için görev başlangıç saati; <ul style="list-style-type: none"> * 06:00-15:00 arasındaysa, azami uçuş görev süresi dört inişe kadar 14 saattir. * 15:01-18:00 arasındaysa, azami uçuş görev süresi dört inişe kadar 13 saattir. * 18:01-05:59 arasındaysa, azami uçuş görev süresi dört inişe kadar 12 saattir. Bir uçuş görevindeki toplam uçulan süre en fazla 8 saattir. En iyi eşleme kümesi seçilirken uçuş çizelgesindeki tüm uçuşlar kapsanmalıdır. 	<ul style="list-style-type: none"> Uçuş tarifesi için filo atama, uçak rotalama gibi ekip eşlemeden önce gelen aşamalar havayolu şirketi tarafından tamamlanmıştır. Tamamlanan önceki aşamalarda değişiklik olmayacağı kabul edilmiştir. Uçuş tarifesine uçuş ekleme veya silme gibi durumların olmayacağı kabul edilmiştir. Uçuş çizelgesindeki uçuşlar günlük problem olarak ele alınmıştır. Haftanın her günü aynı uçuşların uçulduğu varsayılmaktadır. Kabin ekibi için planlama yapılacaktır. (Çizelgeleme filo tipinden bağımsızdır.) Havayolunun bir tane ana üssü vardır ve İstanbul’dur. Eşlemeler en az iki, en fazla dört uçuş ayağından oluşacak şekildedir. Yayılan gecikme hesaplamalarında bir uçuş ayağının varış gecikmesi, aynı uçuş ayağının bütün veri seti için varış gecikmeleri ortalaması olarak kabul edilmiştir. Günün ilk uçuşunda yayılan gecikmenin olmadığı kabul edilmiştir. Pas uçuşuna izin verilmemektedir.

Çizelge 2. Veri setinin küçük bir örneği (A small part of the dataset)

NO	Tarih	Kalkış Limanı Kodu	Kalkış Limanı	Varış Limanı Kodu	Varış Limanı	Planlanan Kalkış Zamanı	Planlanan Varış Zamanı	Gerçekleşen Kalkış Zamanı	Gerçekleşen Varış Zamanı
1	1.4.2011	IST	İstanbul	NAV	Nevşehir	04:25	05:40	04:27	05:42
2	1.4.2011	NAV	Nevşehir	IST	İstanbul	06:25	07:45	06:20	07:42
3	1.4.2011	IST	İstanbul	NAV	Nevşehir	14:45	16:00	14:45	15:55
4	1.4.2011	NAV	Nevşehir	IST	İstanbul	16:50	18:10	16:45	18:09
5	1.4.2011	IST	İstanbul	ASR	Kayseri	04:20	05:45	04:21	05:45
...
40259	30.9.2011	TZX	Trabzon	IST	İstanbul	17:40	19:30	17:40	19:43
40260	30.9.2011	IST	İstanbul	TZX	Trabzon	20:35	22:15	20:49	22:34
40261	30.9.2011	TZX	Trabzon	IST	İstanbul	04:05	05:55	03:59	05:48
40262	30.9.2011	IST	İstanbul	SIC	Sinop	07:00	08:20	06:54	08:19
40263	30.9.2011	SIC	Sinop	IST	İstanbul	09:05	10:20	09:02	10:14

İstanbul'dan kalkan her uçağın tekrar İstanbul'a döneceği düşünülerek uçuş ayakları birleştirilmiş ve 232 uçuş ayağından kurallara uyan ve yasal olan 116 adet uçuş çifti Microsoft Excel programı kullanılarak oluşturulmuştur. Hazırlık süresi (1 saat), uçuş süreleri, uçuşlar arasındaki mola süresi (en az 30 dakika) ve mesai kapatma süresini (30 dakika) içine alan uçuş görev süresi sınırlamalarına uygun uçuş çifti verilerinin bir kısmı örnek teşkil etmesi bakımından Çizelge 3'te verilmiştir.

3.3. Uygun Eşlemelerin Oluşturulması (Generating the Proper Pairings)

Ekip eşlemesi; yasal kısıtlara ve işletme kurallarına uyularak, aralarında uzun mola periyotları yani dinlenme süreleri ile birbirine eklenmiş uçuş ayakları dizisidir. Bu çalışmada ilk önce iki uçuş ayağından oluşan uçuş çiftleri elde edilmiş ve bunların uygun şekilde birleştirilmesiyle eşlemeler oluşturulmuştur. Günlük ekip eşleme

problemünde eşlemeler aynı zamanda uçuş görevleri olduğundan uçuş görevi kısıtlarına da uymak zorundadırlar. Bu yasal sınırlamalardan Bölüm 3.1'de bahsedilmiştir. Fakat burada uçuşlardan ziyade uçuş çiftleri söz konusu olduğundan, uçuş çiftleri için geçerli olan yasal sınırlamalar aşağıda verilmiştir;

- Bir uçuş çiftinin son uçuşunun varış havaalanı, kendini takip eden uçuş çiftinin kalkış havaalanı ile aynıdır.
- Bir uçuş çiftinin ilk uçuşunun kalkış zamanı, ondan bir önceki uçuş çiftinin son uçuşunun varış zamanından sonradır.
- Birbirini takip eden iki uçuş çifti arasında en az 30 dakika mola süresi vardır.
- Bir uçuş görevindeki uçuş hazırlığının başlaması ile günün ilk uçuş seferi arasındaki ön bilgilendirme (briefing) süresi 1 saattir.

Çizelge 3. Günlük uçuş verisinden elde edilen uçuş çiftleri (Flight couples obtained from daily flight data)

Uçuş Çifti No	Kalkış Meydanı 1	İlk Uçuş Kalkış Zamanı	Planlanan Kalkış Zamanı 1	Planlanan İniş Zamanı 1	Gerçekleşen Kalkış Zamanı 1	Gerçekleşen İniş Zamanı 1	Varış Meydanı 1 & Kalkış Meydanı 2	İkinci Uçuş Kalkış Günü	Planlanan Kalkış Zamanı 2	Planlanan İniş Zamanı 2	Gerçekleşen Kalkış Zamanı 2	Gerçekleşen İniş Zamanı 2	Varış Meydanı 2	Planlanan Bekleme Süresi	Toplam Uçuş Süresi	Uçuş Görev Süresi
1	IST	1	01:40	03:20	01:40	03:15	TZX	1	04:05	05:55	03:56	05:50	IST	00:45	03:30	05:45
2	IST	1	03:10	04:15	03:06	04:03	ESB	1	05:00	06:10	04:54	06:11	IST	00:45	02:15	04:30
3	IST	1	03:20	04:55	03:19	04:55	GZT	1	05:40	07:20	05:39	07:26	IST	00:45	03:15	05:30
4	IST	1	03:35	05:15	03:37	05:19	KCM	1	06:00	07:45	05:53	07:40	IST	00:45	03:25	05:40
...
113	IST	1	20:55	22:10	21:01	22:27	BJV	2	01:45	02:55	01:34	02:44	IST	03:35	02:25	07:30
114	IST	1	20:55	22:10	21:01	22:37	AYT	2	03:50	05:10	03:44	05:02	IST	05:40	02:35	09:45
115	IST	1	20:55	22:15	21:19	22:53	DLM	2	02:10	03:30	01:59	03:17	IST	03:55	02:40	08:05
116	IST	1	20:55	22:45	21:00	23:08	DIY	2	01:00	03:00	01:00	02:59	IST	02:15	03:50	07:35

- Bir uçuş görevindeki son uçuş ayağının sona ermesi ile mesainin kapanması arasındaki son bilgilendirme (debriefing) süresi 30 dakikadır.
- Yaz dönemi için görev başlangıç saati;
 - 06:00-15:00 arasındaysa, azami uçuş görev süresi dört inişe kadar 14 saattir.
 - 15:01-18:00 arasındaysa, azami uçuş görev süresi dört inişe kadar 13 saattir.
 - 18:01-05:59 arasındaysa, azami uçuş görev süresi dört inişe kadar 12 saattir.
- Bir uçuş görevindeki toplam uçulan süre en fazla 8 saattir.
- Eşlemeler en az iki uçuş ayağı (uçuş çiftinin kendisi), en fazla dört uçuş ayağından (iki uçuş çiftinin birleştirilmesiyle) oluşacak şekildedir.

Mevcut problem için uçuş çiftlerine ait olası tüm yasal eşlemeler MYSQL veri tabanında web tabanlı bir programlama dili olan PHP kodlaması ile bulunmuş ve 1298 adet eşleme hesaplanmıştır. Elde edilen olası eşlemeler KBF'nin oluşturulmasında kullanılmıştır. Bunların bir kısmı örnek teşkil etmesi amacıyla Çizelge 4'te verilmiştir.

Bu şekilde hem iki uçuş ayağından hem de dört uçuş ayağından oluşan bütün yasal eşlemeler İstanbul'dan başlayıp İstanbul'da sonlanacak şekilde elde edilmiştir. Bu eşlemelerden en iyilerinin seçimi KBF ile elde edilmiştir. KKF yerine KBF kullanılmasının nedeni KKF'nin uçuş çizelgesindeki bütün uçuşların en az bir defa kapsanabilmesine olanak vermesi ve birden fazla kapsanması durumunda pas uçuşu gerektirmesidir. Pas uçuşuna izin verilmediği varsayıldığından KBF ile uçuş çizelgesindeki bütün uçuşların sadece bir kez kapsanması sağlanmıştır.

Çizelge 4. Olası yasal eşlemeler (Possible legal pairings)

Eşleme Id	Uçuş Çifti Id1	Bekleme Süresi	Uçuş Çifti Id2	Toplam Uçuş Süresi	Uçuş Görev Süresi
1	1			03:30	05:45
2	1	00:30	34	07:15	10:45
3	1	00:35	35	05:55	09:30
4	1	00:35	36	06:15	10:00
5	1	00:40	37	07:00	10:40
...
905	50	03:10	94	05:40	11:50
906	50	03:15	95	06:05	12:20
907	50	03:50	96	05:55	13:05
908	50	04:40	98	05:50	13:35
909	51			02:10	04:35
910	51	00:35	67	04:20	08:35
911	51	00:45	68	05:25	09:20
...
1296	114			02:35	09:45
1297	115			02:40	08:05
1298	116			03:50	07:35

3.4. En İyi Eşleme Kümesinin Belirlenmesi (Determining the Best Pairing Set)

Bu aşamada gecikmelerin dikkate alınmadığı ve yayılan gecikmelerin de modele eklendiği iki farklı senaryo ele alınmıştır. Bu iki farklı senaryoda kısıt yapısı ortaktır ve bütün uçuş çiftlerinin seçilen eşlemeler tarafından kapsanmış olmasını gerektirir, fakat amaç fonksiyonları farklılık göstermektedir. Problemin çözümünde kullanılan iki ayrı senaryo şu şekilde özetlenebilir [55];

Senaryo 1: (Gecikmelerin Dikkate Alınmadığı Durum) Oluşturulan eşlemelerden tüm uçuş ayaklarını en az maliyet ile kapsayan eşleme kümesi, gecikmeler hesaba katılmadan seçilmiştir. Pas uçuşuna izin verilmediğinden problem için KKF yerine KBF kullanılmıştır. Atıl sürelerin minimize edilmesi ve ekip sayısının minimize edilmesini sağlayan farklı durumlardaki amaç fonksiyonları için ayrı ayrı çözüme ulaştırılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu modeller Matlab (Matrix Laboratory) programı ile çözülmüş ve iki ayrı sonuç ile planlamacı için farklı seçeneklerin ortaya çıkması sağlanmıştır.

Senaryo 2: (Yayılan Gecikmelerin Modele Eklendiği Durum) Her bir uçuş ayağı için ayrı ayrı gecikme ortalamaları hesaplanarak bunlar da modele dâhil edilmiştir. Burada amaç, yayılan gecikmeleri minimize ederek daha dayanıklı eşlemeler oluşturmaktır. Uçuş verisinin gecikme analizleri için SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) ve Microsoft Excel programları kullanılmıştır.

3.4.1. Gecikme olmayacağı düşünülerek oluşturulan model (Model created with no delay)

İlk senaryoya göre; toplam 116 uçuş çiftine ait tüm olası yasal eşlemeler dikkate alındığında 1298 değişken ve 116 kısıttan oluşan bir küme bölüntüleme modeli aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur.

$$Z_{opt} = \min \sum_{p \in P} c_p x_p \quad (12)$$

$$\sum_{p \in P} a_{ip} x_p = 1 \quad \forall i \in F \quad (13)$$

$$x_p \in \{0,1\} \quad \forall p \in P \quad (14)$$

Modeldeki indisler; i uçuş ayağı indisi ve p eşleme indisi, kümeler; $F = (1,2,3,\dots,116)$ uçuş çiftleri kümesi ve $P = (1,2,3,\dots,1297,1298)$ F 'nin kurallara uygun eşlemelerinden oluşan eşlemeler kümesi, parametreler; c_p P kümesindeki p eşlemelerin maliyetleri ve $a_{ip} = \begin{cases} 1, & i \text{ uçuş ayağı } p \text{ eşlemesinde ise} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$ ve son olarak

karar değişkeni ise $x_p = \begin{cases} 1, & p \text{ eşlemesi çözümde ise} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$ dir.

Kısıtlar her bir uçuş çiftinin kapsandığı olası eşlemeleri göstermektedir.

KBF iki farklı durum için oluşturulmuştur. Bunlar atıl sürelerin minimize edildiği (etkinliğin maksimize edildiği) ve ekip sayısının minimize edildiği (maliyetlerin minimize edildiği) durumlardır.

Atıl Sürelerin Minimize Edildiği Durum: Her bir eşlemeye uçuş görevindeki atıl zamanlar ile doğru orantılı bir maliyet katsayısı eklenmiştir. Yani 1'den 1298'e kadar olan $x_1, x_2, x_3, \dots, x_{1297}, x_{1298}$ karar değişkenlerinin amaç fonksiyonu katsayıları, ilgili eşlemenin 'hazırlık ve mesai kapatma süreleri dışındaki uçuş görev süresi' ile 'uçulan fiili süre' arasındaki fark olarak alınmış ve kalan dinlenme zamanını veya boş süreleri minimize etmeye yönelik bir model oluşturulmuştur. Böylece atıl sürelerin minimize edildiği durumda Eş.12 ile gösterilen amaç fonksiyonu; $Z_{opt} = \min (2,25x_1 + 3,50x_2 + 3,58x_3 + \dots + 7,17x_{1296} + 5,42x_{1297} + 3,75x_{1298})$ olarak alınmıştır. Örneğin 1 numaralı eşlemenin toplam uçuş görev süresi (UGS) 5 sa 45 dk, toplam uçuş süresi (US) de 03 sa 30 dk'dır (Bkz. Çizelge 4). Bu durumda; $UGS=(5*60)+45=345$ dk ve $US=(3*60)+30=210$ dk olduğundan; Eşleme Maliyeti = $UGS-US = 345 - 210 = 135$ dk yani $(135/60) = 2,25$ sa olarak alınmıştır. Buna benzer şekilde 1298 adet eşlemenin hepsi için PHP programlama dili ile maliyetler hesaplanmış ve amaç fonksiyonu yazdırılmıştır.

Ekip Sayısının Minimize Edildiği Durum: Ekip eşleme problemlerinde yaygın olarak ekip sayısını minimize etmek amaçlanmaktadır. Bu nedenle ikinci durum olarak etkinlikten ziyade maliyetlerin minimize edilmesi amaçlanmış ve aralarında bir karşılaştırma yapılabilmesine olanak sağlanmıştır. İlk duruma göre sadece amaç fonksiyonunda farklılık yapılmış ve amaç fonksiyonundaki karar değişkeni katsayıları 1 olarak alınmıştır. Böylece ekip sayısının minimize edildiği durumdaki Eş.12 ile gösterilen amaç fonksiyonu; $Z_{opt} = \min (x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_{1297} + x_{1298})$ olarak alınmıştır.

Problemde her bir uçuş çifti için bir kısıt mevcuttur. Bu kısıtlar, bütün uçuş çiftlerinin sadece bir defa kapsanmasını garantileyen kısıtlardır. Yani uçuş çiftlerinin her birinin kapsandığı eşlemeler bulunur ve bunlara ilişkin karar değişkenleri (ilgili eşlemenin çözüm kümesinde yer alıp almama durumunu gösteren x_p 'ler) toplamı KBF için 1'e eşitlenir. Burada her uçuş ayağının sadece 1 kez uçulması amaçlanmakta ve pas uçuşuna izin verilmemektedir. Ele alınan problemin kısıt yapısı

Eş.13'teki gibidir. 1298 değişken ve 116 kısıttan oluşan modeldeki kısıtlar PHP kodlaması kullanılarak yazdırılmıştır. Problem bahsedilen her iki durumdaki amaç fonksiyonları ve kısıt yapısı ile Matlab programının *Optimization Toolbox* seçeneği ile çözüldüğünde elde edilen sonuçlar Çizelge 5'te görülmektedir.

Çizelge 5'teki sonuçlar incelendiğinde, sadece ekip sayısını minimize etmek amaçlandığında daha az eşleme ile problemin çözüldüğü görülebilmektedir. Atıl süreler eşleme maliyetleri olarak alındığında 82 ekip ile tüm uçuşlar bir defa kapsanmışken, maliyetler eşit alındığında bu sayı 71'e düşmüştür. Fakat eşleme maliyetleri daha az sayıdaki eşlemeler için toplandığında; 417,75 saat atıl süre söz konusudur. Yani ekip başına ortalama 5,88 saat atıl süre düşmektedir. İzin verilen uçuş görev süresinin maksimum 14 saat olduğu düşünüldüğünde %57,97 oranında zamanı verimli kullanma söz konusudur. Bu da 82 ekipli (%71,17) çözüme göre %13,20 daha azdır. Burada karar firmaya aittir. 11 ekibi fazladan çalıştırarak zamanı verimli kullanma oranını %13,20 artırmış olacaktır. Ya da zamandan %13,20 oranında kaybederek 11 ekip için ücret ödemeyecektir. Bu durumda ekip maliyetleri ile zaman kaybı maliyetleri karşılaştırılarak bir karara varılmalıdır.

3.4.2. Yayılan gecikmelerin modele eklenmesi (Adding propagated delays to the model)

Dayanıklılık kavramı havayolu operasyonlarında çizelgeleme problemi için son yıllarda ortaya çıkan bir kavramdır. Literatür incelendiğinde daha önceleri sadece operasyonların çizelgelenmesi irdelenmişken, son yıllarda çalışmalar dayanıklı çizelgeler üretme yoluna kaymıştır. Çünkü günlük operasyonlarda birçok belirsizlik söz konusu iken çizelgelerin aksamaması veya bu belirsizliklerden en az şekilde etkilenmesi, en önemli amaçlardan biri hâline gelmiştir. Ayrıca belirsizlikler dışında, artan yolcu trafiği nedeniyle oluşturulan sıkışık çizelgelerin aksaklıklar zincirini başlatabileceği de açıktır. Sıkışık çizelgedeki herhangi bir uçuşun küçük bir gecikmesi dahi, bütün çizelgeye yayılabilmekte ve planları bozabilmektedir. Bu gibi sebeplerin havayolu şirketi için itibar kaybına sebep olmasının yanında mali açıdan da pek çok zararı olmaktadır. Bu nedenle ikinci senaryoda probleme gecikmeler de dâhil edilmiştir.

Çizelge 5. İlk senaryodaki iki farklı durumun çözüm sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of solution results for two different situations in the first scenario)

Maliyetin Minimize Edildiği Durum (Ekip Sayısının Minimize Edilmesi)	Etkinliğin Maksimize Edildiği Durum (Atıl Sürelerin Minimize Edilmesi)
$Z_{opt} = 71$ ekip	$Z_{opt} = 330,92$ saat
Atıl Süre = 417,75 saat	Atıl Süre = 330,92 saat
71 ekip ile uçuşların tamamının sadece bir defa kapsanması	82 ekip ile uçuşların tamamının sadece bir defa kapsanması
Ekip başına günlük ortalama 5,88 saat atıl süre	Ekip başına günlük ortalama 4,04 saat atıl süre
Günlük maksimum 14 saat olan uçuş görev süresinin ortalama %57,97'sinin verimli kullanılması	Günlük maksimum 14 saat olan uçuş görev süresinin ortalama %71,17'sinin verimli kullanılması

Kullanılan veri her bir uçuş için hem planlanan hem de gerçekleşen kalkış ve iniş zamanlarını içerdiğinden toplamda 40263 uçuş ayağının her biri için gecikme hesapları SQL kodları yardımıyla yapılmıştır. Bu hesaplamalar uçuş ayakları bazındadır. İlgili uçuş ayağındaki bütün uçuşların kalkış ve varış gecikmelerinin ortalaması ve blok süresini aşma yüzdelerini içermektedir. 32 farklı uçuş noktası için İstanbul'dan veya İstanbul'a olan 64 farklı uçuş ayağına ait hesaplamaların bir kısmı örnek olması bakımından Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. Uçuş ayakları bazında gecikme hesaplamaları (Delay calculations based on flight legs)

Uçuşlar	Uçuş Sayısı	Ortalama Kalkış Gecikmesi (dakika)	Ortalama Varış Gecikmesi (dakika)	BSA Yüzdesi (%)
ADA-IST	1445	3,97	5,16	38,27
ADB-IST	2665	5,16	8,99	60,71
ADF-IST	74	0,47	1,69	40,54
AJI-IST	181	5,13	9,85	59,67
AOE-IST	67	1,75	3,52	44,78
...
SIC-IST	174	4,13	6,82	74,71
SZF-IST	549	3,71	5,34	43,90
TZX-IST	748	8,17	12,59	67,11
VAN-IST	258	9,35	13,41	62,79
VAS-IST	256	4,25	8,77	82,42

Gecikme kavramları arasındaki ilişkinin derecesini görebilmek için Pearson korelasyondan faydalanılmış ve bu kavramlar arasında mantıksal bir ilişki olup olmadığı da test edilmiştir. Bu işleme ilişkin SPSS program çıktısı Çizelge 7'de görülmektedir.

Çizelge 7. Gecikme kavramları arasındaki korelasyonun incelenmesi (Examining the correlation between delay concepts)

		Varış gecikmeleri ortalaması	Blok süresini aşma yüzdesi	Kalkış gecikmeleri ortalaması
Varış gecikmeleri ortalaması	Pearson Korelasyon	1	0,60	0,86
	Anlamlılık (2 taraflı)		0,00	0,00
Blok süresini aşma yüzdesi	Pearson Korelasyon	0,60	1	0,17
	Anlamlılık (2 taraflı)	0,00		0,18
Kalkış gecikmeleri ortalaması	Pearson Korelasyon	0,86	0,17	1
	Anlamlılık (2 taraflı)	0,00	0,18	

Çizelge 7'deki sonuçlara göre kalkış gecikmelerini ve blok süresi aşımını etkileyen ortak faktörün varış gecikmeleri olduğu görülmektedir. Diğerlerinin birbirleri

ile ilişkileri zayıf çıkarken varış gecikmeleri ile kuvvetli bir ilişki içerisindedirler. Bundan dolayı uçuşların gecikmelerinin ölçülmesi için varış gecikmeleri ortalamasının dikkate alınması ve uçuş dizilerindeki yayılan gecikmelerin bu ortalama varış gecikmeleri üzerinden yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu nedenle çalışmada, geçmiş 6 aylık veri seti kullanılarak ve yeterli miktarda geçmiş verinin mevcut olduğu kabul edilerek, her bir uçuş ayağı için varış gecikmelerinin ortalamaları hesaplanmıştır. Fakat gecikme olması olasılığına karşın bu gecikme değerlerinin ne olacağı belirsizliğine cevap arandığından bu hesaplamalar yapılırken, sadece geciken uçuşların varış gecikmelerinin ortalaması dikkate alınmıştır.

Yayılan gecikme hesabının daha önce Bölüm 2.2'deki Eş 11'de olduğu gibi yapılması gerektiği belirtilmişti. Bu hesaplamada gerekli olanlar; uçuş dizisindeki her bir uçuşun varış gecikmesi, iki uçuş arasındaki; kurullarla belirlenen en az mola süresi, planlanan mola süresi ve tampon süredir. Bütün bu kavramlara dair hesaplamalar oluşturulan eşlemeler üzerinde yapılmıştır (Bkz. Eş.10, Eş.11). Yayılan gecikme negatif olamayacağından negatif değerler sıfır olarak alınmıştır. Uçuş ayağı bazında hesaplanan bu yayılan gecikmeler klasik ekip eşleme problemindeki KBF'ye entegre edilmiştir. Bunu yaparken iki amaç ile hareket edilmiştir. Bunlar, yayılan gecikmelerin minimize edilmesi ve ekip sayısının minimize edilmesi amaçlarıdır. Bu iki amacı tek amaç altında birleştirebilmek için "ağırlıklı toplam skalerleştirme yöntemi" tercih edilmiştir. w ve $(1 - w)$ katsayıları ile bu amaçlar ağırlıklandırılmış ve ağırlıklı toplam skalerleştirme yöntemi ile elde edilen skaler fonksiyon en küçüklenmiştir. w ($0 \leq w \leq 1$) şeklinde değişen ağırlık faktörünü göstermektedir. Problem bu şekilde Matlab programının *Optimization Toolbox* seçeneği ile farklı w değerleri için çözülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışmada ele alınan ilk senaryodaki (Bölüm 3.4.1) notasyonlara ek olarak $\delta_{ij}^p = p$ eşlemesinde i uçuşundan j uçuşuna yayılan gecikme değeri ve $w =$ yayılan gecikme minimizasyonuna ilişkin amaç fonksiyonuna verilen ağırlık notasyonları eklenmiş ve ilk senaryodaki modelde bulunan maliyet (c_p) parametresi (Eş. 12) bu modelde çıkarılmıştır. F_p , p eşlemesinde yer alan uçuş ayakları kümesidir. Bu durumda ikinci senaryo için model Eş.15 - Eş.17 formülasyondaki gibidir. Bu model yayılan gecikmelerin olası değerlerinin minimize edilmesini, aynı zamanda da ekip sayısının enküçüklenmesini sağlayan amaç fonksiyonu ve her bir uçuşun sadece bir defa kapsanmasını garantileyen kısıtlardan oluşmaktadır.

$$Z_{opt} = \min \left(w \sum_{p \in P} \left[x_p \sum_{i,j \in F_p} \delta_{ij}^p \right] + (1 - w) \sum_{p \in P} x_p \right) \quad (15)$$

$$\sum_{p \in P} a_{ip} x_p = 1 \quad \forall i \in F \quad (16)$$

$$x_p \in \{0,1\} \quad \forall p \in P \quad (17)$$

Eş.15'teki amaç fonksiyonu ile farklı ağırlık (w) değerleri için problem çözülmüş ve hangi ağırlık değeri ile daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir. Çalışma kapsamında incelenen w ağırlık değerleri şu şekildedir;

- $w = 1 \rightarrow$ sadece dayanıklılık amacının dikkate alındığı durum,
- $w = 0,75 \rightarrow$ dayanıklılık amacının ağırlığının en iyi maliyet amacının ağırlığından fazla olduğu durum,
- $w = 0,5 \rightarrow$ iki amacın eşit ağırlıkta olduğu durum,
- $w = 0,25 \rightarrow$ en iyi maliyet amacının ağırlığının dayanıklılık amacının ağırlığından fazla olduğu durum,
- $w = 0 \rightarrow$ sadece en iyi maliyet amacının dikkate alındığı durum.

w için 0 ile 1 arasında olması koşulu ile farklı ağırlık değerleri de denenebilir. Bu çalışmada, hangi amacın amaç fonksiyonuna daha çok katkı sağladığının görülmesi amaçlanmış ve sadece yukarıda bahsi geçen ara değerler ve sınır değerleri için sonuçlar alınmıştır. Model formülasyonu, Matlab programı ile bu ağırlık değerlerinin her biri için çözülmüş ve Çizelge 8'deki sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre; w değeri azaldıkça amaç fonksiyonu değerinde bir azalma görüldüğü açıktır. Fakat ekip sayısı sadece $w = 1$ durumunda, yayılan gecikme toplamı ise sadece $w = 0$ durumunda diğer durumlara göre amaç fonksiyon değeri daha yüksek elde edilmiştir. Ağırlık katsayısının ara değerleri ($w = 0,75$, $w = 0,5$ ve $w = 0,25$) için elde edilen ekip sayısı ve yayılan gecikme toplamının aynı olduğu ve dolayısıyla en iyi maliyet ve dayanıklılık amaçlarının her ikisi için de en iyi sonuçların bulunduğu görülmektedir. Ağırlıklandırılmış amaç fonksiyonu bu ara değerler arasından $w = 0,25$ için minimum olsa da önemli olan dikkate alınan iki amaç fonksiyonuna ait değerler olduğundan en iyi çözümün w 'nun ara değerlerinde elde edildiği yorumu yapılabilir. Bu da sadece en iyi maliyet amacı ile oluşturulan modelde ($w = 0$ durumu) ekip sayısı minimize edilirken yayılan gecikme toplamının artması ve çizelgenin sağlamlığından ödün verilmesi; sadece dayanıklılık amacı ile oluşturulan modelde ise ($w = 1$ durumu) yayılan gecikme toplamı minimize edilirken ekip sayısının artması ve belli bir maliyete katlanılması gerekliliği anlamına gelmektedir.

Çizelge 8. Dayanıklı ekip eşleme modelinin farklı ağırlık değerlerine göre çözümlerinin karşılaştırılması (Comparison of the solutions with different weight values of the robust crew pairing model)

Ağırlık Katsayısı (w)	Amaç Fonksiyonu Değeri (Z_{opt})	Ekip Sayısı	Yayılan Gecikme Toplamı (dk)
$w = 1$	101,59	73	101,59
$w = 0,75$	93,94	71	101,59
$w = 0,5$	86,30	71	101,59
$w = 0,25$	78,65	71	101,59
$w = 0$	71	71	162,97

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada havayolu operasyonlarında ekip çizelgelemenin ilk aşamasını oluşturan ekip eşleme probleminin gecikmeleri içeren ve içermeyen farklı iki senaryosunun uygulamasına yer verilmiştir. Günlük problem ele alınmıştır. Gecikme analizleri yapılarak yayılan gecikmeler hesaplanmış ve olası gecikmelere karşı dayanıklı eşlemelerin seçimi amaçlanmıştır.

Klasik ekip eşleme problemi KBF ile çözülmüştür. Yani her uçuşun sadece bir defa kapsanmasına izin verilmiştir. İlk senaryoda eşleme maliyetlerinin farklı alındığı ve eşit alındığı durumlar ayrı ayrı analiz edilmiş ve fazladan 11 ekip daha çalıştırılarak zamandan %13,20 oranında kâr edilebileceği gösterilmiştir.

Çalışmanın dayanıklı planlama senaryosunda eşlemelerin proaktif bir yaklaşım ile seçilmesi önerilmiştir. Gecikmelerden daha az etkilenen bir eşleme kümesi ile hareket edildiğinde çizelgenin dayanıklılığının da artacağı öngörüsüyle geçmiş veriler gecikmelerin analizi için kullanılmıştır. Gecikmelerin ölçülmesi için literatürde yer alan kalkış gecikmeleri, varış gecikmeleri veya blok süresini aşma gibi kavramlar istatistiksel olarak analiz edilmiş ve kalkış gecikmeleri ve blok süresi aşımı kavramlarının ikisinin de varış gecikmeleri ile kuvvetli bir ilişki içinde oldukları hâlde birbirleri ile zayıf ilişkileri olduğu belirlenmiştir. Uçuş ayakları bazında elde edilen varış gecikme ortalamaları, uçuş dizilerinde birbirini takip eden uçuşlar arasındaki yayılan gecikmelerin hesabı için kullanılmıştır. Tampon süreler hesaplanmış ve bu tampon süreler varış gecikmelerinden çıkartılarak yayılan gecikmeler bulunmuştur. Hesaplanan yayılan gecikme değerleri ile dayanıklı model oluşturulmuştur. Bu model iki amaçlıdır. Amaçlardan biri ekip sayısının minimize edilmesi diğeri ise yayılan gecikmeleri minimize ederek dayanıklılığın artırılmasıdır. Bu iki amaca ilişkin amaç fonksiyonları, ağırlıklı toplam yöntemi ile skalerleştirilmiş ve tek bir amaç fonksiyonu olarak ele alınmıştır. En iyi amaç fonksiyonu değerinin yayılan gecikme değerinin minimize edildiği durumlar arasında en iyi maliyetli 71 ekip ile tüm uçuşların kapsanmasını sağlayan $w = 0,25$ ağırlık değeri olduğu görülmüştür. Fakat w 'nun diğer ara değerleri için de çözümlerin pek farklılaşmadığı sadece 1 ve 0 olduğu durumlarda farklı ekip sayısı ve yayılan gecikme değeri elde edildiği belirlenmiştir. Bu durumda yayılan gecikme ve maliyet minimizasyonu amaçlarının tek başına ele alınması yerine birlikte ele alınmasının önem arz ettiği ve minimum ekip sayısı ile dayanıklılığın artırıldığı bir çizelge oluşturulabileceği kanısına varılmıştır.

Sonuç olarak ekip eşleme problemi için hem eşlemelerin üretilmesi aşamasında hem de en iyi eşleme kümesinin seçimi konusunda farklı bir yaklaşım ile çalışılmış ve yayılan gecikmeler modellenerek dayanıklı ekip çizelgeleme literatürüne katkı sağlanmıştır. İleride yapılacak çalışmalar için; bu çalışmada günlük olarak ele alınan problemin haftalık veya aylık olarak ele alınması, ekip eşlemelerinden sonra ekip atamalarının da probleme

dâhil edilmesi, problemin diğer havayolu çizelgeleme aşamaları ile entegre olarak ele alınması, gecikmeleri azaltırken aynı zamanda çizelgeye eklenen ekstra uçuşlar veya iptal edilen uçuşlar olması durumlarının da modellenmesi, maliyet etkinlik ve ekip memnuniyeti gibi birbirine zıt amaçların sezgisel bir algoritma ile birleştirilmesi önerilebilir.

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)

Esra ÖZKAN AKSU: Uygulamayı yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

İzzettin TEMİZ: Sonuçları analiz etmiş, metinde düzeltmeler yapmıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Arabeyre J. P., Fearnley J., Steiger F. C. and Theather W., "Airline Crew Scheduling Problem: A Survey", *Transportation Science*, 3(2): 140-163, (1969).
- [2] Rubin J. A., "Technique for the Solution of Massive Set Covering Problems with Applications to Airline Crew Scheduling", *Transportation Science*, 7(1): 34-48, (1973).
- [3] Etschmaier M. M., Mathaisel D. F. X., "Airline Scheduling: An Overview", *Transportation Science*, 19(2): 127-138, (1985).
- [4] Gershkoff I., "Optimizing Flight Crew Schedules", *Interfaces*, 19(4): 29-43, (1989).
- [5] Graves G. W., McBride R. D., Gershkoff I., Anderson D. and Mahidhara D., "Flight Crew Scheduling", *Management Science*, 39(6): 736-745, (1993).
- [6] Teodorović D. and Stojković G., "Model to Reduce Airline Schedule Disturbances", *J. Transp. Eng.*, 121(4): 324-331, (1995).
- [7] Stojković M., Soumis F. and Desrosiers J., "The Operational Airline Crew Scheduling Problem", *Transportation Science*, 32(3): 232-245, (1998).
- [8] Ernst A. T., Jiang H., Krishnamoorthy M. and Sier D., "Staff Scheduling and Rostering: A Review of Applications, Methods and Models", *European Journal of Operational Research*, 153(1): 3-27, (2004).
- [9] Zeybekcan N., "Airline Crew Scheduling", *Master of Science Thesis*, Dokuz Eylül University Graduate School of Natural and Applied Sciences, (2005).
- [10] Çankaya G. and Arıkan M., "Sütun Oluşturma Yaklaşımı ile Bir Havayolu Ekip Çizelgeleme Uygulaması", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24(1): 43-50, (2009).
- [11] AhmadBeygi S., Cohn A. and Weir M., "An Integer Programming Approach to Generating Airline Crew Pairings", *Computers & Operations Research*, 36(4): 1284-1298, (2009).
- [12] Aydemir-Karadağ, A. and Dengiz, B., "A Hybrid Approach of Heuristic and Exact Method for Crew Pairing Problem", *40th IEEE International Conference on Computers & Industrial Engineering (CIE)*, Awaji City, Japan, 1-6, (2010).
- [13] Deng G. F. and Lin W. T., "Ant Colony Optimization-Based Algorithm for Airline Crew Scheduling Problem", *Expert Systems with Applications*, 38(5): 5787-5793, (2011).
- [14] Lijima, Y., Nishi, T., Inuiguchi, M., Takahashi, S., Ueda, K. and Ojima, K., "Modeling and Solution of Practical Airline Crew Scheduling Problems", *2013 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, Bangkok, 116-120, (2013).
- [15] Aydemir-Karadağ A., Dengiz B. and Bolat A., "Crew Pairing Optimization Based on Hybrid Approaches". *Computers & Industrial Engineering*, 65(1): 87-96, (2013).
- [16] Chen C. H., Liu T. K. and Chou J. H., "Integrated Short-Haul Airline Crew Scheduling Using Multiobjective Optimization Genetic Algorithms", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Systems*, 43(5): 1077-1090, (2013).
- [17] Korkmaz, G., "Sivil Havacılıkta Uçucu Ekip Çizelgelemesi", *Yüksek Lisans Tezi*, Hava Harp Okulu Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü, (2013).
- [18] Saddoune M., Desaulniers G. and Soumis F., "Aircrew Pairings with Possible Repetitions of the Same Flight Number", *Computers & Operations Research*, 40(3): 805-814, (2013).
- [19] Cacchiani V. and Salazar-González, J. J. A., "Heuristic Approach for an Integrated Fleet-Assignment, Aircraft-Routing and Crew-Pairing Problem", *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 41: 391-398, (2013).
- [20] Dunbar M., Froyland G. and Wu C. L., "An Integrated Scenario-Based Approach for Robust Aircraft Routing, Crew Pairing and Re-Timing", *Computers & Operations Research*, 45: 68-86, (2014).
- [21] Ezzinbi O., Sarhani M., El Afia A. and Benedada Y., "Particle Swarm Optimization Algorithm for Solving Airline Crew Scheduling Problem", *2014 IEEE International Conference on Logistics and Operations Management (GOL)*, Rabat, Morocco, 52-56, 2014.
- [22] Salazar-González J. J., "Approaches to Solve the Fleet-Assignment, Aircraft-Routing, Crew-Pairing and Crew-Rostering Problems of a Regional Carrier", *Omega*, 43: 71-82, (2014).
- [23] Díaz-Ramírez J., Huertas J. I. and Trigos F., "Aircraft Maintenance, Routing and Crew Scheduling Planning for Airlines with a Single Fleet and a Single Maintenance and Crew Base", *Computers & Industrial Engineering*, 75: 68-78, (2014).
- [24] Erdoğan G., Haouari M., Örmeci-Matoglu M. and Özener O. Ö., "Solving a Large Scale Crew Pairing Problem", *Journal of the Operational Research Society*, 66(10): 1742-1754, (2015).
- [25] İpekçi-Çetin E., "Genetik Algoritmaların Kullanımıyla Küme Bölme Modelinin Çözülmesi: Ekip Eşleştirme Uygulaması", *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 5(1): 89-96, (2008).

- [26] Zeren B. and Özkol İ., “A novel column generation strategy for large scale airline crew pairing problems”, *Expert Systems With Applications*, 55: 133-144, (2016).
- [27] Quesnel F., Desaulniers G., Soumis F., “A new heuristic branching scheme for the crew pairing problem with base constraints”, *Computers and Operations Research*, 80: 159-172, (2017).
- [28] Yildiz B. C., Gzara F., Elhedhli S., “Airline crew pairing with fatigue: Modeling and analysis”, *Transportation Research Part C*, 74: 99-112, (2017).
- [29] Agustin A., Juan A., Pardo E. G., “A variable neighborhood search approach for the crew pairing problem”, *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 58: 87–94, (2017).
- [30] Doi T., Nishi T., Voß S., “Two-level decomposition-based mathuristic for airline crew rostering problems with fair working time”, *European Journal of Operational Research*, 267: 428–438, (2018).
- [31] Deveci M., Çetin Demirel, N., “Evolutionary algorithms for solving the airline crew pairing problem”, *Computers & Industrial Engineering*, 115: 389–406, (2018).
- [32] Parmentier A., Meunier F., “Aircraft routing and crew pairing: Updated algorithms at Air France”, *Omega*, 93:(Article in Press), (2020).
- [33] Cacchiani V., Salazar-González J.-J., “Heuristic approaches for flight retiming in an integrated airline scheduling problem of a regional carrier”, *Omega*, 91:(Article in Press), (2020).
- [34] Yen J. W. and Birge J. R. A., “Stochastic Programming Approach to the Airline Crew Scheduling Problem”, *Transportation Science*, 40: 3–14, (2006).
- [35] Shebalov S. and Klabjan D., “Robust Airline Crew Pairing: Move-up Crews”, *Transportation Science*, 40(3): 300-312, (2006).
- [36] Gao C., Johnson E. and Smith B., “Integrated Airline Fleet and Crew Robust Planning”, *Transportation Science*, 43(1): 2-16, (2009).
- [37] Tam B., Ehr Gott M., Ryan D. and Zakeri G. A., “Comparison of Stochastic Programming and Bi-Objective Optimization Approaches to Robust Airline Crew Scheduling”, *Operations Research Spectrum*, 33(1): 49-75, (2011).
- [38] Ionescu L. and Klierer N., “Increasing Flexibility of Airline Crew Schedules”, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 20: 1019-1028, (2011).
- [39] Arikan, M., “The Impact of Airline Flight Schedules on Flight Delays: An Analysis of Block-Time, Delay Propagation and Schedule Optimization Using Stochastic Models”, *Ph. D. Thesis*, Purdue University Krannert School of Management, (2011).
- [40] Dück V., Ionescu L., Klierer N. and Suhl L., “Increasing Stability of Crew and Aircraft Schedules”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 20(1): 47-61, (2012).
- [41] Mou D. and Zhang Y., “Multi-Objective Integer Programming Model and Algorithm of the Crew Pairing Problem in a Stochastic Environment”, *World Scientific and Engineering Academy and Society Transactions on Mathematics*, 12(8): 809-818, (2013).
- [42] Muter İ., Birbil Ş. İ., Bülbül K., Şahin G., Yenigün H., Taş D. and Tüzün D., “Solving a Robust Airline Crew Pairing Problem with Column Generation”, *Computers & Operations Research*, 40(3): 815-830, (2013).
- [43] Aoun, O. and El Afia, A., “A Robust Crew Pairing Based on Multi-Agent Markov Decision Processes”, *2014 IEEE Second World Conference on Complex Systems, WCCS*, Agadir, Morocco, 762-768, (2014).
- [44] Karacaoğlu, N., “An Application of Stochastic Programming on Robust Airline Scheduling”, *Master of Science Thesis*, Bilkent University Graduate School of Engineering and Science, (2014).
- [45] Gürkan, H., “An Integrated Approach for Robust Airline Scheduling, Aircraft Fleeting and Routing with Cruise Speed Control”, *Master of Science Thesis*, Bilkent University Graduate School of Engineering and Science, (2014).
- [46] Soykan, B., “Aksaklıklara Karşı Dayanıklı Havayolu Ekip Eşleme Problemi için Çözüm Algoritmaları ve Karar Destek Çerçeve Önerisi”, *Yayımlanmamış Doktora Tezi*, Kara Harp Okulu Savunma Bilimleri Enstitüsü, (2015).
- [47] Zhang D., Henry Lau H. Y. K. and Yu C., “A Two Stage Heuristic Algorithm for the Integrated Aircraft and Crew Schedule Recovery Problems”, *Computers & Industrial Engineering*, 87:436-453, (2015).
- [48] Bouarfa S., Müller J., Blom H., “Evaluation of a Multi-Agent System approach to airline disruption management”, *Journal of Air Transport Management*, 71: 108–118, (2018).
- [49] Ahmed M. B., Mansour F. Z., Haouari, M. “Robust integrated maintenance aircraft routing and crew pairing”, *Journal of Air Transport Management*, 73: 15–31, (2018).
- [50] https://www.transtats.bts.gov/OT_Delay/OT_DelayCause1.asp?pn=1, BTS, Birleşmiş Milletler Ulaştırma Departmanı Ulaştırma İstatistikleri Bürosu, Erişim Tarihi Mayıs 18, (2016).
- [51] Petersen, J. D., “Large-Scale Mixed Integer Optimization Approaches for Scheduling Airline Operations Under Irregularity”, *Ph. D. Thesis*, H. Milton Stewart School of Industrial and Systems Engineering Georgia Institute of Technology, (2012).
- [52] Transportation Research Board, “Defining and Measuring Aircraft Delay and Capacity Thresholds”, *Cooperative Research Program Report 104*, Washington, 7, (2014).
- [53] Eurocontrol, “Planning for Delay: Influence of Flight Scheduling on Airline Punctuality, Trends in Air Traffic”, 22, (2011).
- [54] Chiraphadhanakul V. and Barnhart C., “Robust Flight Schedules Through Slack Re-Allocation”, *Euro Journal on Transportation and Logistics*, 2(4): 277-306, (2013).
- [55] Özkan Aksu E. “Havayolu Operasyonlarında Dayanıklı Ekip Eşleme için Eniyileme Yaklaşımı: Bir Havayolu Şirketi Uygulaması”, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2016).