

HEDEF PROGRAMLAMA İLE BÜTÜNLEŞİK UÇAK ROTALAMA VE BAKIM ÇİZELGELEME

İlkay ORHAN*, Muzaffer KAPANOĞLU**, T. Hikmet KARAKOÇ*

*Anadolu Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, 26470, Eskişehir

**Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 26480, Eskişehir

iorhan@anadolu.edu.tr, hkarakoc@anadolu.edu.tr, muzaffer@ogu.edu.tr

(Geliş/Received: 14.09.2010; Kabul/Accepted: 15.12.2011)

ÖZET

Sivil havacılık sektöründe etkili bir rekabet etkin bir filo yönetimi ile mümkündür. Filo yönetiminin en önemli işlevlerinden ikisi uçakların rotalarının belirlenmesi ve bakımlarının planlanmasıdır. Uçakların rotalara atanmasında kısıtlayıcı rol oynayan bakım gereksinimi uçakların etkin bir biçimde kullanılmasını etkilemektedir. Uygulamada genellikle uçak rotaları ve bakım planları ayrı ayrı geliştirilmekte, karşılaşılan uyumsuzluklar ek uçak envanteri tutularak ve/veya uçakları gereğinden önce bakıma alarak giderilmektedir. Bir diğer yandan, uçak rotalarını bakım planları ile birlikte ele alabilen bütünleşik yaklaşımlar, uçakların yalnızca havada kalış sürelerini değil aynı zamanda bakımlar arası uçuş sürelerini de artırma yeteneğine sahiptir. Bakım maliyetlerinin, işletme giderlerinin yaklaşık dörtte birini oluşturduğu düşünüldüğünde, bütünleşik rota-bakım planlamanın havayollarına önemli bir rekabet üstünlüğü sunması beklenmektedir. Bu çalışmada, uçak rotalarının belirlenmesi probleminin bakım gereksinimleri ile birlikte ele alınması, böylece uçakların etkin kullanımının yanı sıra bakım maliyetlerinin enküçüklenmesi hedeflenmiştir. Belirtilen amaç doğrultusunda, uçakların bakıma girmeden önceki kalan yasal uçuş sürelerini de enküçükleyen bir tamsayı doğrusal hedef programlama yaklaşımı önerilmiştir. Yaklaşım, uçuş sayılarını veya sürelerini de karar vericinin öncelikleri doğrultusunda dengelemekte, böylece uçak kullanım oranları ve bakım maliyetlerinin olabildiğince eşit tutulmasını sağlamaktadır. Yaklaşımın geçerliliğinin sınanması aşamasında, bir havayolu işletmesinin gerçek verilerinden yararlanılarak oluşturulan problem, CPLEX/GAMS tamsayı doğrusal program çözücü yazılımı kullanılarak çözülmüştür. Önerilen yöntem ile ele alınan problemlerde uçakların yasal uçuş sürelerinin kullanım oranlarının %95,4 ile %100 olarak gerçekleşmesi sağlanabilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Uçak Rotalama, Uçak Bakım Planlama, Hava Ulaştırma, Hedef Programlama.

CONCURRENT AIRCRAFT ROUTING AND MAINTENANCE SCHEDULING USING GOAL PROGRAMMING

ABSTRACT

An effective competition at the civil aviation sector could be possible by an effective fleet management. One of two important functions of the fleet management is to define the aircraft routes and plan the aircraft maintenance. The aircraft maintenance requirements which have an active role as a constraint have affected the effective aircraft usage. Common approach in practice, aircraft routes and maintenance plans are separately developed, encountered discrepancies are solved by keeping additional aircraft and/or by taking aircraft to maintenance early. The concurrent approach which takes the aircraft routes together with maintenance plans is capable of the increase not only the duration of the aircraft in the air, but also their flight time between maintenances. Considering the maintenance costs which form approximately one quarter of operating costs, concurrent routing and maintenance planning are expected to offer a significant competitive advantage. In this study, the effective usage of aircrafts and minimizing maintenance costs have been aimed by defining the aircraft routes with maintenance requirements. At the direction of these goals, an integer linear goal programming approach is proposed which minimize the remaining legal flying durations of the aircrafts before maintenance. This approach has balanced the flight numbers or flight durations at the direction of decision maker, thus it has provided that the aircraft usage ratio and maintenance costs as possible as equal. During the demonstration of the availability of the approach, the real-life problem of an airline, has been solved by the software of CPLEX/GAMS integer linear program. It has been shown that the proposed method can achieve 95.4% to 100% of utilization rates for the legal flying hours of aircrafts over the experiments.

Keywords: Aircraft Routing, Aircraft Maintenance Planning, Air Transportation, Goal Programming.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Havayolu işletmeleri, 2007 yılında yaklaşık olarak 2,25 milyar yolcu taşımış, 490 milyar dolar ciro ile 5,6 milyar dolar global kar elde etmiştir [1]. Uluslararası Havayolu Taşımacılığı Birliği (IATA: The International Air Transport Association), 2010 yılında 16 milyar dolar kar elde eden havayolu işletmelerinin, petrol fiyatlarının artması nedeniyle 2011 yılında 594 milyar dolar ciro ile 8,6 milyar dolar kar elde etmesini beklemektedir [2]. 2007–2026 yılları arasında dünya yolcu trafiğinin yıllık %4,9 ve kargo trafiğinin yıllık %5,8 oranında artacağı tahmin edilmektedir [3]. Türk Sivil Havacılık sektörü, 2002–2008 yılları arasında gelişen ekonomi ve havacılık alanındaki bazı kısıtlamaların kaldırılmasıyla %53 oranında büyümüştür [4]. Bu büyümenin önümüzdeki yıllarda yıllık %5 oranında artarak devam edeceği tahmin edilmektedir [5, 6].

Havayolu çizelgeleme ve planlama problemleri ardışık olarak çözülen bir takım alt problemlerden oluşmaktadır: uçuş programının tasarımı, filo atama, uçak rotalama ve mürettebat çizelgeleme. Bu problemlerin çözümünde temel amaç işletme karını enbüyüklemektir [7]. Havayolu sektörü, hem rekabetin çok yoğun hem de karlılık oranının çok düşük olduğu bir sektördür. Havayolu sektöründe, işletme maliyetleri çok yüksek olduğundan işletmeler mevcut yoğun rekabet ortamında maliyetlerini azaltmaya çalışmaktadır. Uçak satın alma gibi maliyetler azaltılamayacağından işletmeler çoğunlukla kendi işletme maliyetlerine odaklanmaktadır. Kontrol edilebilecek maliyetlerden biri, uçak bakım maliyetidir. Uçak bakımını eniyi (optimum) çizelgeleyen işletme hem milyonlarca dolar tasarruf etmekte hem de rakiplerine karşı üstünlük sağlamaktadır.

Havayolu işletmelerinin hazırladığı bakım programları işletme merkezinin bulunduğu ülkedeki sivil havacılık otoriteleri tarafından yeterli görülürse uygulanabilmektedir. Kullanılmakta olan bazı uçakların bakımları, A, B, C ve D gibi harf kodlu kontrol periyotlarına göre uygulanmaktadır. Amerika'da Federal Havacılık İdaresi (FAA: Federal Aviation Administration) harf kodlu kontrollerin uygulanmasını zorunlu tutmaktadır. Bu kontrollerin kapsamı, süresi ve sıklıkları değişmektedir. A–tipi kontrol her 65 uçuş saatinde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Diğer kontrollerin aralığı daha uzundur. B–tipi kontrol uçağın tipine göre her 300 ile 600 uçuş saati arasında, C–tipi kontrol her yıl ve D–tipi kontrol her dört yılda bir gerçekleştirilmektedir. Pratik uygulamalarda ise A–tipi kontrol en fazla 35 ile 40 uçuş saatinde bir yapılmaktadır. A–tipi kontrolü gerçekleştirmek için gereken zaman 3 ile 10 saat arasında değişmektedir [8, 9].

Literatürdeki çalışmaların çoğunda A–tipi kontrol dikkate alınarak uçaklar rotalara atanmaktadır. Uçaklar, her üç–dört günde bir A–tipi kontrole girerken, gün içerisinde ortalama olarak 12 saat uçuş gerçekleştirmektedir. İşletmeler, günlük planları uygularken A–tipi kontrolü kaçırarak, ciddi cezalar ödemekten kaçındıkları için uçakları izin verilen zamanda önce bakıma almaktadır. Yasal olarak, uçakların bakımına her 65 uçuş saatinde izin verilirken, pratik uygulamalarda bu değer 17 ile 30 uçuş saat öncesinde bakım gerçekleştirildiğinden, iki bakım arasındaki yasal uçuş süresinin %25 ile %45'i kayıp olmaktadır [8, 9, 10]. Planlamalar, uçuş süresi (saat) tabanlı güvenilir bir planlama yöntemiyle gerçekleştirilir ve uygulanırsa, bu süreklilik kayıplar her hangi bir uçağın bakım zamanı kaçırılmadan önemli oranda azaltılabilir [11].

Uçak rota planlamasında, belirli bir dönem için uçaklara uygulanması zorunlu bakımlar dikkate alınmadan yalnızca günlük uçuş rota planları oluşturulmaktadır. Böyle bir yaklaşımda bakım, belirli bir gün sayısı periyodunun sonunda gerçekleştirilmektedir. Bunun için ilk olarak, uçakların konum bilgilerinden yararlanılarak her gün için ayrı ayrı uçuş rota planları oluşturulmaktadır. Daha sonra uçakların yalnızca gün içerisinde uçuşlara başladıkları ve uçuşlarını sonlandırdıkları havalimanları bilgilerinden yararlanılarak uçaklar için üç veya dört günlük bakım planları yapılmaktadır. Uçakların rota planları bakım kısıtı dikkate alınmadan oluşturulduğu için bakımların yapılacağı n 'nci gündeki günlük rota planları uçakların bakımlarının yapılabileceği havalimanlarında olacak şekilde oluşturulmamış olabilmektedir. Bu durumda rota planlarının değiştirilmesi gerekmektedir. Sonuçta, günlük bazda elde edilen eniyi sonuçlar bozulmaktadır. Bununla birlikte, rotalama ve bakım çizelgelemesi uçuş süresi yerine gün üzerinden yapılması hem uçakların yasal kullanılabilir uçuş süreleri olmasına rağmen erken bakıma girmesine hem de iki bakım arasında uçağın uçuş saati başına düşen uçak bakım maliyetinin artmasına neden olmaktadır. Bakım çizelgelemesinde gün sayısı yerine, uçakların gerçek zamanlı uçuş süreleri dikkate alınması hem uçakların bakımı için tanımlanmış referans uçuş saatinde veya buna çok yakın değerlerde hem de yıl içerisinde uçakların daha az bakıma girmelerini sağlayacaktır. Ayrıca, uçakların daha az bakıma girmesiyle işletme uçağını bakım sürecine denk gelecek süreçte uçuşa veya uçuşa hazır durumda ve bakım alanı ile teknik iş gücünü en iyi şekilde kullanıma fırsatı yakalayacaktır.

Havayolu işletmesi, uçak rota planlarını oluştururken günlük olarak uçaklara atanacak uçuş sayısının veya uçuş sürelerinin birbirine denk olmasını isteyerek, uçakların kullanım oranlarını, tercihine bağlı olarak eşit tutabilir ya da uçakların bakım maliyetlerinin birbirine yakın olmasını sağlayabilir. Bu çalışma kapsamında önerilen modellerde öncelikli amaç,

uçakların kalan yasal uçuş sürelerini dikkate alarak, uygun rotalara atamak ve işletme maliyetlerinin %18 ile %23'ünü oluşturan [12] bakım maliyetlerini enküçükleme. Karar vericinin tercihine bağlı olarak seçilen hedef programlama modeli yardımıyla uçakların ya uçuş süreleri ya da uçuş sayıları dengelenmektedir. Önerilen modeller, iç hat uçuşu gerçekleştiren bir havayolu işletmesinin uçuş programı ve CPLEX/GAMS tamsayılı doğrusal program çözücü yazılımı kullanılarak incelenmiştir.

2. TERMİNOLOJİ (TERMINOLOGY)

Yasal uçuş süresi: Bir uçağın iki periyodik bakımı arasındaki süre olup, uçuş güvenliği açısından teknik olarak belirlenip yasalarla güvence altına alınmışlardır. Örneğin, A harf kodlu kontrol periyodu bazı uçak tipleri için 65 uçuş saat olup bu aynı zamanda o uçakların yasal uçuş süresini de ifade eder.

Kalan yasal uçuş süresi: Bir uçağın yasal uçuş süresinden, iki bakım arasında gerçekleştirdiği uçuş süresi çıkarıldığında elde edilen değerdir. Örneğin, A harf kodlu kontrol periyodu 65 uçuş saati olan bir uçağın, uçuş rota planlamasının yapıldığı ana kadar 20 uçuş saati kullanılmışsa, kalan yasal uçuş saati 45 saat olarak çizelgeleme yapılacaktır.

Filo: Kapasitesi ve operasyonel özellikleri aynı olan uçak kümesine verilen isimdir. Bir havayolunun filo tipi genellikle Boeing 737, Boeing 757, Fokker 100 ve Airbus 320 gibi çeşitli uçak gruplarından oluşabilir. Filo kapasitelerine örnek olarak, 169 koltuk kapasiteli Boeing 757 ve 98 koltuk kapasiteli Fokker 100 verilebilir. Operasyonel özelliklere, uçağın hızı, motor yakıt yakma oranı, uçak bakım maliyeti, uçuş için gerekli ekip sayısı ve uçağın havalimanına inmesiyle birlikte bir sonraki uçuşa hazırlanabilmesi için yapılması gereken işlerin tamamlanabileceği enküçük dönüş süresi örnek olarak verilebilir.

Uçuş bacağı: Uçuş programında tanımlanmış belli bir zamanda bir havalimanında başlayan ve tamamlanan uçuştur. Uçuş bacağı, süre olarak uçağın kalkışı ile inişi arasındaki zaman aralığını kapsar.

Rota: Belirli bir kalkış zamanında başlayan, belirli bir başlangıç ve varış noktası arasında gerçekleştirilen bir veya daha fazla ardışık uçuş bacağıdır.

Dönüş süresi (turn time): Bir uçağın havalimanına indikten sonra apronda uçak kapılarının açılması ve yeni uçuş için kapılarının kapatılması arasındaki minimum zamandır. Bu zaman, bazı küçük uçak bakımlarını, uçağın bir sonraki uçuş bacağı için hazırlanmasını, yolcunun inmesini, yolcu bagajının indirilmesini, yeni yolcunun uçağa binmesini ve yeni yolcu bagajının uçağa yüklenmesini kapsamaktadır. Dönüş süresi, uçak tipine ve havalimanına bağlıdır ve

iç hat uçuşlarında 25–60 dakika arasında değişmektedir.

3. LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE REVIEW)

Bu bölümde, filo ataması ve uçak bakım rotalaması ile ilgili yapılan çalışmalar incelenmiştir. Filo ataması ile ilgili çalışmalarda özellikle uçak bakım konusunda literatürde ön plana çıkan çalışmalara öncelik verilirken, uçak bakım rotalama ile ilgili çalışmaların çoğu ele alınmıştır.

Daskin ve Panayotopoulos, tek bir topla–dağıt (hub–and–spoke) serim yapısında uçakları rotalarına atayarak işletme karını enbüyüleyebileceklerini göstermişlerdir. Problem, karma tamsayılı doğrusal programlama problemi olarak modellenmiş ve Lagrange gevşetmesi ile çözülmüştür [13]. Feo ve Bard, hem bakım merkezlerinin yerleştirileceği hem de A–tipi kontrol gereksiniminin daha iyi karşılanacağı uçuş programı geliştiren bir model sunmuşlardır. Problem, American Airlines için enküçük maliyetli bütünleşik kısıtlı çok ürünlü akış problemi olarak formüle edilmiştir [10]. Kabbani ve Patty, uçak rotalama problemini American Airlines için her sütunun olası haftalık uçak rotası ve satırların uçuşları temsil ettiği küme belirleme problemi olarak formüle etmişlerdir. Çalışmada bakımların her üç günde bir gerçekleştirildiği kabul edilmiştir [14]. Subramanian ve arkadaşları, Delta Airlines için filo atama problemini çözerek işletmenin yıllık 100 milyon dolar tasarruf etmesini sağlamışlardır [15]. Clarke ve arkadaşları, uçak rotasyon problemini, bakım kısıtlarını sağlayan ve bağlantılı uçuşlarda aktarmasız uçuş değerini enbüyükleyen yan–kısıtlı (side constraint) Euler turu belirleme problemi olarak modellemişlerdir. Karar değişkeni, birbiri ile bağlantısı olan uçuş arklarını; çapraz arkların, uçuşları; yatay arkların, yerdeki duruşları temsil eden zaman hattı serim yapısı kullanılmıştır. Yazarlar, başlangıçta problem için Euler turun enbüyük değerini bulan bir model oluşturmuştur. Bu model, bakım kısıtları içermediği için bağlantısız uçuş problemi olarak adlandırılmış ve enbüyüklenen asimetrik gezgin satıcı problemi olarak çözülmüştür. Daha sonra uçak rotasyon problemi, bakım kısıtları geliştirilerek kısıtlandırılmış Euler tur problemi olarak çözülmüştür. Belirli bir bakım programının süresinden daha uzun olan rotalar bakımı ihlal eden rotalar olarak adlandırılmıştır. Bu rotalar eklenen bu bakım kısıtı ile birlikte elenmiştir. Model, Lagrangian ayrıştırma (decomposition) yöntemiyle çözülmüş, bakım ve alt tur kısıtlarda gevşetme yapılmıştır. Çözüm süresini ve serim yapısını kısaltmak için ön süreçler uygulanmıştır [8]. Gopalan ve Talluri, uçak rotalama problemini US Airways için modellemiş ve üç günlük bakım kontrolü ve dengeli kontrol gereksinimi için polinom zamanlı bir algoritma kullanmışlardır. Modelde, uygun uçak bakım rotalaması elde edebilmek için uçuşlar ve hatta filolar arasında deş-

tokuş yapılmıştır [9]. Barnhart ve arkadaşları, bütünleşik filo atama ve uçak rotalama problemini uçuş-dizisi (string) tabanlı modellemiş ve dal-bedel (branch-and-price) yaklaşımı kullanarak çözmüşlerdir. Bir uçuş dizisi, bakım istasyonunda başlayan ve biten ardışık bağlantılı uçuşlardan ibarettir. Uçuş dizisi kullanımı, akış dengesini (*i* istasyonuna varan uçuşu, *i* istasyonundan ayrılan uçuş takip eder) sağlarken bakımların yapılabilirliğini olanaklı kılar. Bu modelin dezavantajı, yüzlerce uçuşa sahip bir uçuş programının milyonlarca olası uçuş dizisi ile karşı karşıya kalmasıdır [16]. Rexing ve arkadaşları, mevcut uçuş programında 5 ile 20 dakikalık gecikmelerle mevcut uçuş bacak zamanlarında yeniden zamanlamaya imkan verirken, uçuş bacaklarına filo tipi ataması gerçekleştiren bütünleşik filo atama ve çizelgeleme problemini United Airlines için incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda işletmenin yıllık 50 milyon dolar civarında tasarruf ettiği ve operasyon maliyetlerini azalttığı görülmüştür [17]. Armacost ve arkadaşları, hızlı paket servisi için eniyiveya eniyiye yakın uçuş serim tasarımı oluşturmak için model ve algoritmalar hazırlamışlardır. UPS kargo işletmesinde yapılan çalışmalar sonucunda operasyon maliyetlerinin %7 ve gerekli filo sayısının %10 oranında azaltıldığı rapor edilmiştir. Geleneksel serim tasarımı probleminde karşılaşılan zayıf sınırların neden olduğu dezavantajların üstesinden gelmek için yeni bir modelleme yaklaşımı kullanılmıştır. Yeni yaklaşımda, akış değişkenleri açık kararlar olarak kaldırılmış ve tasarım değişkeninin içerisine yerleştirilmiştir. Ayrıca, talepleri içeren çoklu uçak rotalarının seçimini temsil eden bileşik değişkenler, tasarım değişkenleri ile birleştirilmiştir. Ortaya çıkan bileşik değişkenli formülasyon ile daha sıkı sınırlar ve hızlı bir şekilde daha iyi çözümlerin elde edilmesini sağlamıştır [18]. Sriram ve Haghani, bakım çizelgelemesi ve uçağın yeniden atanması problemini incelemişlerdir. Yazarlar, her iki A ve B tipi kontrolleri modellemede dikkate almışlar ve çözüm için rassal arama ve derinlemesine arama (depth first search) yaklaşımlarını karma olarak kullanan bir sezgisel yöntem kullanmışlardır [19]. Lohatepanont ve Barnhart, uçuş bacaklarını ve seçilen uçuş bacaklarına atanan uçak tiplerini eniyileyen bütünleşik model ve çözüm algoritması geliştirmişlerdir. American Airlines'da gerçekleştirilen çalışma sonucunda uçak kullanımındaki potansiyel iyileşme ve gelirlerdeki önemli artışın yıllık 200 milyon doların üstünde olduğu belirtilmiştir [20]. Sarac ve arkadaşları, bakım slotları (slots) ve bakım istasyonlarında kullanılabilir adam-saatini dikkate alan operasyonel uçak bakım rotalama problemini modelleyerek çözmüşlerdir. Kaynak kısıtı nedeniyle, problemi çözmek için dal-bedel algoritması tercih edilmiştir. Problemin, dallanmada devamı için yeniden düzenlenmesi, benzer problemlerin çözülmesi için kullanılan tipik dallandırmaya devam kuralı kullanılmıştır.

Dallandırma için herhangi bir çift uçuş bacağının bulunmadığı noktada, dallandırmaya devam edebilmek için yeni dallandırma planı kullanılmıştır. Bu plan yalnızca, eniyi koşullar onaylanmadığında ve klasik dallandırma devam kuralı ile uygun olmayan uçuş bacakları bulunduğu kullanılmıştır. Sayısal testler boyunca, çözüm yaklaşımının verimliliği, sütun türetme ve seçimi için sezgisel seçeneklerin birleşimi altında araştırılmıştır[21].

Literatürde gün-sayısını dikkate alan bakım planlama yaklaşımlarında ilk olarak, uçakların bakım kısıtı göz önüne alınmadan günlük olarak rota planları oluşturulmuştur. Aynı süreç, ikinci ve üçüncü gün tekrarlanmıştır. Daha sonra uçakların üç günlük bakım kısıtlarını sağlayacak şekilde, üçüncü gün bakım yapılabilecek havalimanlarına gün içinde son uçuşları gerçekleştirilmesi sağlanarak, rotalara atama yapılmıştır. Her uçak, belirli bir gün sayısı sonunda uygulanması gereken bakımlar için uygun havalimanlarına atanması gerekmiştir. Günlük uçuş rota atama planları önceden oluşturulduğu için bazı durumlarda uçakların uçuş tarifesinde zorunlu olarak değişiklik yapılmıştır. Uçuş tarifesindeki değişiklikler, gelir kaybına veya işletme maliyetlerinde artışa ve bakım koşullarını sağlayan eniyi rotalamanın yapılamamasına neden olmuştur. Uçuş tarifesinin korunması ve uçağın uygun bakım merkezine atanması arasında bir dengenin olması gerekir. Bu çalışmada yukarıdaki problemlerin üstesinden gelmek için uçak bakım ve rota planlama problemi, uçakların kullanılabilir kalan yasal uçuş süreleri enküçüklenerek günlük olarak bütünleşik bir şekilde çözülmüştür. Ayrıca, karar vericinin tercihinin göre uçakların ya uçuş süreleri ya da uçuş sayıları dengelenmiştir.

4. DOĞRUSAL TAMSAYILI HEDEF PROGRAMLAMA MODELİ (LINEAR INTEGER GOAL PROGRAMMING MODEL)

Hedef programlama, karar vericilerin, problemin çözümünde gözetmek istedikleri hedeflerini kırılgan olmayan (soft) kısıtlar şeklinde ifade etmelerine olanak sağlar. Hedef programlamanın bu yaklaşımı, karar vericilerin hedeflerinden ve kırılgan olmayan kısıtlarından istenmeyen yönde sapmaları enküçüklemelerine izin verir. Söz konusu enküçükleme, istenmeyen yöndeki sapmaların toplamalarının, sapmaların ağırlıklı toplamalarının, ağırlıklı normalleştirilmiş toplamalarının, öncelikle darboğaz oluşturan sapma(lar)ının temsil edildiği amaç fonksiyonları ile gerçekleştirilebilir. Kırılgan kısıtların olursuz (infeasible) çözümlerle sonuçlanabildiği klasik matematiksel programlamaya karşın, hedef programlama kısıtlardan istenmeyen yöndeki sapma miktarlarını ortaya koyarak arzu edilen çözümlere ne kadar yaklaşıldığını da karar vericinin görmesini destekler [22, 23].

Uçak rotalama ve bakım çizelgeleme kararlarının, havayolu işletmelerinin beklentilerini eniyilemek üzere aynı matematiksel model içinde ele alınması, her iki problemin farklı hedefler gözetmeleri sebebi ile çok-amaçlı bir yaklaşımla olanaklıdır. Söz konusu hedefler, havayolu işletmelerinin tamamının gözetmek isteyeceği ölçütlere dayalı olup, bu çalışmada ele alınan hedefler (i) uçakların kalan yasal uçuş sürelerinin enküçüklenmesi, (ii) uçaklara düşen uçuş sayılarının dengelenmesi ve (iii) uçakların uçuş sürelerinin dengelenmesi olarak belirlenmiştir. Önerilen yaklaşım, karar vericinin beklentileri doğrultusunda her hedefi önceliklendirmesine veya hedeflere ağırlık değerleri vererek tek aşamada değerlendirme olanağı da sunmaktadır. Bu yaklaşımın uygulamada başarılı olabilmesi bu esnekliği destekleyen özel bir bilgi–model sistemi içinde karar vericiye sunulmasına bağlıdır. Bu özel bilgi sistemi, hedef programlama tabanlı bir karar destek sistemi olup, Şekil 1’de sunulmaktadır. Veri yönetimi, uçakların bakım zamanlaması, filo, rota, uçuş tarifesi, teknik personel ve mürettebat gibi bilgileri içermektedir. Model yönetimi, veri tabanından belirli bilgileri alarak karar vericinin tercihinin göre bir modeli çalıştırmakta ve model sonuçlarını kullanıcı ara yüzü ile karar vericiye sunmaktadır. Karar verici, GAMS gibi çözücülerden aldığı sonuçları değerlendirmekte ve sonuçlardan memnun oluncaya kadar farklı modelleri çalıştırmaktadır. Sonuçların uygun olduğuna karar verdiğinde, karar destek sisteminden ayrıntılı bir rapor olarak modelin çözümlerini uygulamaktadır.

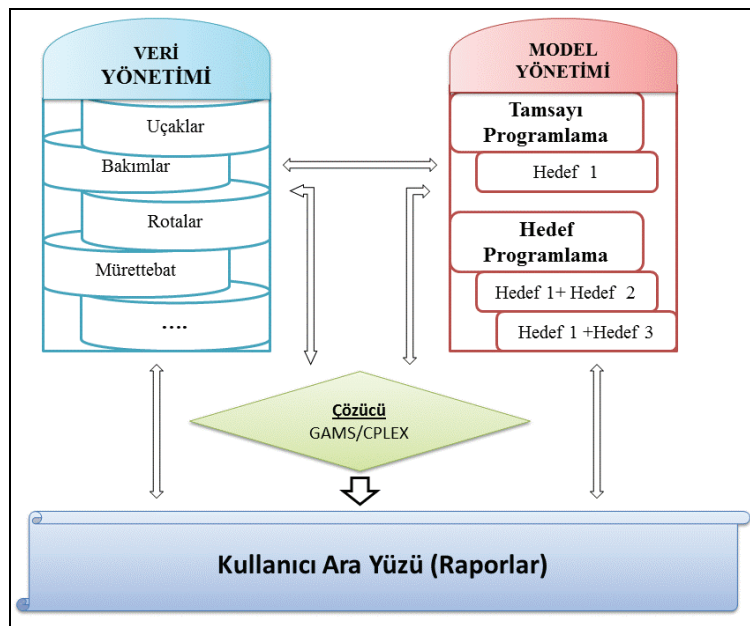
Uçakların kalan yasal uçuş sürelerinin enküçüklenmesi hedefi, maliyetler açısından belirgin bir önceliğe sahiptir. Havayolu işletmeleri, uluslararası otoriteler ve uçak üreticileri tarafından zorunlu tutulan bakımları, uçuş planlarını aksatmayacak şekilde

uygulamaya çalışmaktadır. Uçak üreticileri, günümüzde temel olarak iki bakım arasındaki aralığı uçuş süresini dikkate alarak vermektedir. Önerilen yaklaşım, iki bakım arasında uçağın kalan yasal uçuş süresinin tamamını kullanacak şekilde uygun rotalara atanmasını sağlamaktadır. Böylece, belli bir uçuş süresi içerisinde bakıma girecek uçağın iki bakım arasındaki uçuş saati başına düşen bakım maliyetleri enküçüklenmektedir.

4.1. Varsayımlar (Assumptions)

Problemler modellenirken aşağıdaki varsayımlar dikkate alınmıştır:

- Havayolu işletmesinin uçuş tarifesinin ve filosunun bilindiği varsayılmıştır.
- Uçuş tarifesinin, topla–dağıt serim yapısının özelliklerini taşıyacak şekilde ve uçuş bağlantılarını mümkün kılacak şekilde olmasına dikkat edilmiştir.
- Bir merkezi havalimanı aracılığıyla gerçekleştirilen aktarmasız uçuşların önceden yolcu talepleri dikkate alınarak tespit edildiği kabul edilmiştir.
- Matematiksel model oluşturulurken serim yapısı olarak bağlantı serim yapısı tercih edilmiştir.
- Bütün uçuşlarda minimum dönüş süresi 40 dakika olarak kabul edilmiştir.
- Uçakların kalan yasal uçuş süreleri, uçuş programındaki uçuş süreleri ve uçağın bakım limit değerlendirmeleri dakika üzerinden dikkate alınmıştır.
- Model, tek bir filoya özgü çözülmüştür. Bu yüzden, uçakların herhangi bir havalimanına iniş–kalkışını sınırlayan kısıtlar kullanılmamıştır.



Şekil 1. Önerilen karar destek sisteminin yapısı (The structure of the proposed decision support system)

- Bakım yapılabilen havalimanlarında, bakım hangar alanının ve teknisyen sayısının yeterli olduğu kabul edilmiştir.
- Gün sayısı dikkate alınarak bakım uygulanması gereken uçakların karar verici tarafından bilindiği varsayılmıştır.

4.2. Modelin Kısıtları (Constraints of The Model)

Modellerde kullanılan ortak kısıtlar ve karar vericinin tercihine göre hedef programlama modellerine ilave edilen özel kısıtlar açıklanacaktır. Model indisleri ve parametreleri, yanısıra karar değişkenleri aşağıda verilmiştir:

İndis ve Parametreler:

- i ve j : Uçuş bacakları (düğümleri) indisi,
 k : Uçak indisi,
 o : $i \in N$ olan her düğüm ile bağlantılı yapay kaynak düğümü ($o \in N$),
 t : $i \in N$ olan her düğüm ile bağlantılı yapay havuz düğümü ($t \in N$),
 c : Havalimanları indisi,
 u : Aktarmasız yapılacak uçuş bacaklarının indisi,
 mt : Bakım tipi indisi,
 K : Uçak kümesi,
 N : Uçuş bacakları kümesi (düğümler),
 C : Havalimanları kümesi,
 Td_i : i uçuş bacağına ayrılış zamanı (dakika),
 T_{ij} : (i,j) bağlantısının süresi (i bacağına uçuş süresine eşittir),
 Ts_i : i uçuşu sonunda uçağın bir sonraki uçuş için hazırlanma süresi (dakika),
 Tdt_{ik} : k uçağının yapay t havuz düğümünden ayrılış zamanı (dakika),
 Tdo_{ok} : k uçağının yapay o havuz düğümünden ayrılış zamanı (dakika),
 M : Yeterince büyük bir sayı,
 Ca_{ic} : i uçuş bacaklarının varış şehirleri kümesi $\{i: \text{uçuş bacağı}, c: \text{varış şehirleri} \mid i-c \text{ seçeneği tanımlı ise } 1, \text{ değilse } 0\}$,
 Cd_{jc} : j uçuş bacaklarının ayrılış şehirleri kümesi $\{j: \text{uçuş bacağı}, c: \text{ayrılış şehirleri} \mid j-c \text{ seçeneği tanımlı ise } 1, \text{ değilse } 0\}$,
 $Cmt_{mt,c}$: mt tipi bakım yapılan şehirler kümesi $\{mt: \text{bakım tipi}, c: \text{şehirler} \mid mt-c \text{ seçeneği tanımlı ise } 1, \text{ değilse } 0\}$,
 $A_{mt,k}$: mt tipi bakıma ihtiyacı olan uçakların kümesi $\{k: \text{uçak}, mt: \text{bakım tipi} \mid mt-k \text{ seçeneği tanımlı ise } 1, \text{ değilse } 0\}$,
 r_k : k uçağının kalan yasal uçuş süresi (dakika),
 $DFFc(i)$: c şehrinde başlayan i uçuşları,
 $OWNc(k)$: c şehrinde geceleleyen k uçak kümesi,
 KM : Bakıma girecek uçak kümesi ($KM(k) \subset K$),
 KMc : Bakım merkezinin bulunduğu havalimanına olan uçuşların kümesi,

- KMw : Takvim zamanı üzerinden bakım uygulanacak uçak kümesi,
 Nth_u : Aktarmasız yapılacak uçuş bacaklarının kümesi ($Nth_u \subset N$),
 $SS^+(k)$: k uçağın uçuş denge sayısını aşan değeri, pozitif sapma değişkeni
 $SS^-(k)$: k uçağın uçuş denge sayısının altındaki değeri, negatif sapma değişkeni
 $SSS^+(k)$: k uçağın uçuş denge süresini aşan değeri, pozitif sapma değişkeni
 $SSS^-(k)$: k uçağın uçuş denge süresinin altındaki değeri, negatif sapma değişkeni
 z^*I : Bütünleşik uçak rotalama ve bakım çizelgeleme modelinin eniyi değeri,
 FNV : Uçakların gün içerisinde eşit oranda uçması istenilen uçuş denge sayısının değeri,
 FHV : Uçakların gün içerisinde eşit oranda uçması istenilen uçuş denge süresinin değeri,

Karar Değişkenleri:

- x_{ijk} : 1, Eğer k uçağı i ve j uçuş bacaklarını ardışık olarak uçuyorsa; 0, d.d.,

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in N / \{o, t\} \quad (1)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ijk} = 1 \quad k \in K \quad \text{ve} \quad i = o \quad (2.a)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ijk} = 1 \quad k \in K \quad \text{ve} \quad j = t \quad (2.b)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ijk} - \sum_{j \in N} x_{jik} = 0 \quad \forall i \in N / \{o, t\} \text{ ve } k \in K \quad (3.a)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{ojk} - \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} x_{itk} = 0 \quad (3.b)$$

$$Td_i + T_{ij} + Ts_i - Td_j \leq M(1 - x_{ijk}) \quad \forall k \in K \text{ ve } \forall (i, j) \in N / \{o, t\} \quad (4.a)$$

$$Tdo_{ok} + T_{oi} - Td_i \leq M(1 - x_{oik}) \quad \forall k \in K \text{ ve } \forall (i) \in N \quad (4.b)$$

$$Td_i + T_{it} + Ts_i - Tdt_{ik} \leq M(1 - x_{itk}) \quad \forall k \in K \text{ ve } \forall (i) \in N \quad (4.c)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ijk} \leq \sum_{c \in C} Ca_{ic} Cd_{jc} \quad \forall i \in N \text{ ve } \forall j \in N \quad (5.a)$$

$$x_{ojk} \leq Cd_{jc} Ca_{bc} \quad \forall j \in N \text{ ve } k \in K \quad (5.b)$$

$$\sum_{j \in DFFc(j)} x_{ijk} = 1 \quad \forall k \in OWNc(k) \text{ ve } i = o \quad (5.c)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{m \in Mc \in C} \sum_{k \in KM} x_{itk} Ca_{ic} Cmt_{mt,c} A_{mt,k} = 1 \quad \forall k \in KM \quad (5.d)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ij} x_{ijk} \leq r_k \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{i \in KMc(i)} x_{ijk} = 1 \quad \forall k \in KMw \text{ ve } j = t \quad (7)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in N_{th_u}} \sum_{j \in N_{th_u}} x_{ijk} = 1 \quad (8)$$

$$t_{oj} = 0 \quad \forall k \in K \quad (9)$$

$$Tdo_{ok} \geq 0 \quad ve \quad Tdt_{ik} \geq 0 \quad \forall k \in K \quad (10)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, \quad i \in N \quad ve \quad j \in N \quad (11)$$

$$\sum_{k \in K} \left(r_k \left(\frac{1}{r_k} \right) \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ij} x_{ijk} \right) \leq z^* \cdot 1 \quad (12)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{ijk} + SS^-(k) - SS^+(k) = FNV \quad (13)$$

$$k \in K / KM$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ij} x_{ijk} + SSS^-(k) - SSS^+(k) = FHV \quad (14)$$

$$k \in K / KM$$

Uçuş bacak kapsam kısıtı (1), her uçuş bacağına bir uçağın atanmasını sağlamaktadır. Uçuş tarifesindeki her uçuşun gerçekleştirilmesi gerekli olduğu için eşitlik kısıtı kullanılmaktadır. Uçak kapsam kısıtı olarak iki farklı kısıt (2.a)–(2.b) kümesi bulunmaktadır. Kısıt (2.a), her uçağın bir başlangıç uçuş bacağına atanmasını sağlamaktadır. Ayrıca karar değişkeni, “I” değerini aldığına “i” uçuşundan sonra hangi “j” uçuşunun gerçekleştirileceğini bilgisi de elde edilmektedir. Kısıt (2.b) ise her uçağın bir havalimanında sonlanan bir uçuş bacağına yani yapay havuzda son bulan bir uçuşa atanmasını sağlamaktadır. Akış koruma kısıtları (3.a)–(3.b), herhangi bir “i” düğümüne gelen bağlantı ark sayısının “i” düğümünden çıkan bağlantı ark sayısına eşit olmasını sağlamaktadır. Akış koruma kısıtı (3.a), her uçağı uçuş tarifesinde sirkülasyon yapmaya zorlamaktadır. Böylece, uçak gün içerisinde yapay uçuş noktasına ulaşıncaya kadar uçuşuna devam etmektedir. Akış koruma kısıtı (3.b), yapay kaynak düğümünden çıkan uçuş bağlantı sayısının, yapay havuz düğümüne gelen uçuş bağlantı sayısına eşit olmasını sağlamak için kullanılmaktadır. Böylece model, her gün tekrar eden uçuş tarifesi için her havalimanında aynı sayıda uçak bulunmasını sağlamaktadır. Uygun rota, yapay kaynakta başlayan ve yapay havuzda son bulan ardışık uçuş bacağı veya bacalarının oluşturduğu bir diziyi ifade etmektedir. Uçuş bacaları, uçuşların ayrılış zaman uyumu ve havalimanı uyumu için kullanılan kısıt koşullarını sağlaması durumunda ardışık olarak birbirini izlemektedir. (4) ve (5) kısıt grupları, rota ve öncelik kısıtlarıdır. (4.a)–(4.c) kısıtları, uçuşların zaman bilgilerini dikkate alarak uçakların uygun uçuşlar arasında bağlantı yapabildiğini sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. İlk kısıt (4.a), uçuşlar arasında zaman uyumunu sağlamaktadır. Ayrılış zaman uyum kısıtı, bir uçuşun süresi ve uçuş sonundaki minimum dönüş süresi toplamı, bir sonraki uçuşun başlangıç zamanından küçük ise uçuş bağlantı arki, “i” ve “j” uçuşlarını (düğümlemlerini) birbirine bağlamaktadır. Ayrılış zaman kısıtı aynı şekilde, hem yapay kaynak

düğümü (4.b) hem de yapay havuz düğümü (4.c) için yazılmıştır. Havalimanı uyum kısıtı, “j” ve “i” uçuş bacalarını “j” uçuş bacağına ayrılış şehri, “i” uçuş bacağına varış şehri ile aynı ise birbirine bağlamaktadır. (5.a)–(5.d) kısıtları, uygun şehir bağlantılarını tanımlamak amacıyla kullanılmaktadır. Kısıt (5.a), gün içerisinde gerçekleştirilen uçuşlar arasındaki havalimanı uyumunu sağlamaktadır. Bu kısıtta, x_{ijk} değişkeni, yalnızca “i” uçuş bacağına varış şehri ve “j” uçuş bacağına ayrılış şehri aynı olduğunda “1” olmaktadır. Aksi takdirde, bütün değişkenler sıfıra eşit olmaktadır. Kısıt (5.b), yapay kaynak düğümü için havalimanı uyum kısıtıdır. Herhangi belirli k uçağı için x_{ojk} değişkeni, yalnızca “j” uçuş bacağına varış şehri ve yapay uçuşun başlangıç şehri aynı olursa “1” olmasına izin verilmektedir. Kısıt (5.c), uçakların gece boyunca konakladıkları havalimanlarını dikkate alarak, yeni günün ilk uçuşuna buldukları havalimanından gerçekleşecek olan uçuşlardan birine atamaktadır. Kısıt (5.d), uçuş saati belli bir limit değerinin altında olan uçakların gün içerisinde uygun rotalara atandıktan sonra son uçuşlarını bakım merkezlerinin olduğu havalimanlarına olmasını sağlamaktadır. Böylece, gün sonunda uçaklara gerekli bakımlar yapılabilmektedir. Bu kısıt kümesi, kalan yasal uçuş süresi belli bir değerin altında olan uçaklar için geçerlidir. Karar verici bu değeri 9–12 uçuş saati arasında bir değer olarak alabilir ve uçakların günlük ortalama uçuş saatine bağlı olarak değiştirebilir. Belirlenen limit değerinin üstünde olan uçaklar gün içindeki son uçuşlarını gece konaklamak için herhangi bir havalimanına yapmaktadır. Kısıt (6), uçak için rotayı tanımlayan problemin temel kısıtıdır. Bu kısıt, uçakların kalan yasal uçuş sürelerini aşmadan uygun bir şekilde rotalara atamaktadır. Uçakların kalan yasal uçuş süre limitlerini ihmal ederek, gerekli bakımları yönetmeliklere uygun olarak yapmayan havayolu işletmelerine sivil havacılık otoriteleri tarafından yüksek cezalar kesilmekte ve belirli durumlarda işletmenin uçuş lisansı iptal edilmektedir. Bu yüzden, havayolu işletmeleri üretici firmaların bakım aralıklarını dikkate almakta ve belirtilmiş özel durumlar haricinde bakımları zamanında uygulamaktadır. Özel durum ve şartlar, üretici firmalar tarafından bakım el kitaplarında tanımlanmaktadır. Uçak üreticileri, günümüzde kullanılan bazı uçaklarda olduğu gibi uçak üzerindeki belirli bakımların gün üzerinden uygulanmasını tavsiye edebilmektedir. Kısıt (7), gün sayısı üzerinden tanımlanmış uçak bakımlarının n 'nci günde uçaklara uygulanması için uçakların gün içindeki son uçuşunun bakım merkezlerinin bulunduğu havalimanlarına olmasını sağlamaktadır. Kısıt (8), aktarmasız uçuş kısıtıdır. Aktarmasız uçuş, iki havalimanı arasında uçuşun merkezi bir havalimanına bağlantılı olarak gerçekleştirilmesidir. Uçak, merkezi havalimanında yolcuların bir kısmını indirip, yeni yolcu aldıktan sonra planlanan havalimanına uçuşunu gerçekleştirmektedir. Böylece aktarmasız uçuşu tercih

eden yolcular merkezi havalimanında uçak değiştirmeden uçuşlarını tamamlayabilmektedir. Temel olarak, bir uçak tarafından gerçekleştirilmesi planlanmış belirli uçuş numaraları birbirine bağlanmaktadır. Uçuş numaralarının önceden tespit edilmiş olması gerekmektedir. Aktarmasız uçuşların bağlantıları, belli bir uçağa özel oluşturulabilmektedir. Yolcular, uçak değiştirmeden iki nokta arasındaki uçuşlarını yoğun havalimanlarında uçak değiştirmenin zorluğundan kaçınmak ve uçuş süresini kısaltması açısından tercih edebilmektedir. Havayolu işletmeleri, ek gelir elde edebileceği bu hizmeti yolculara sunarak hem karlılığını arttırmakta hem işletmenin tercih edilmesini sağlamaktadır. Kısıt (9), her uçak için yapay havuzdan gerçekleştirilen ilk uçuş süresinin sıfır olduğunu göstermektedir. Kısıt (10), yapay kaynak ve yapay havuz düğümünden gerçekleştirilen uçuşların başlangıç zamanlarının sıfırdan büyük veya eşit olduğu belirtmektedir. Kısıt (11), karar değişkenlerinin ikili değişken olarak tanımlanmaktadır. Karar vericinin tercihinin göre ikinci amacın eniyilenmesinde hedef programlama modeline ilave edilecek olan kısıt (12), bütünleşik uçak rotalama ve bakım çizelgeleme modelinde elde edilen, uçakların toplam kalan yasal uçuş sürelerinin eniyi değerinin korunmasını sağlamaktadır. Bunun gerçekleştirilebilmesi için bütünleşik uçak rotalama ve bakım çizelgeleme modelinin amaç fonksiyonu, ikinci modele kısıt olarak eklenmekte ve yeni kısıtın eşitsizliği, küçük eşit olarak kullanılmaktadır. Bu kısıtın sağ tarafına, bütünleşik uçak rotalama ve bakım çizelgeleme modelinde elde edilen eniyi değer atanmaktadır. (13–14) sırasıyla uçuş sayı ve sürelerini dengeleyen hedef kısıtlarını göstermektedir. (13)'de karar vericinin bakıma girecek uçaklar için tanımladığı referans uçuş süresi değerinin üstünde kalan yasal uçuş süresine sahip her bir uçağa atanacak toplam uçuş sayısını (14)'de ise karar vericinin bakıma girecek uçaklar için tanımladığı referans uçuş süresinin üstünde kalan yasal uçuş süresine sahip her bir uçağa atanacak uçuşların sürelerinin toplam değerini dengelemek hedeflenmektedir.

4.3. Hedef 1: Uçakların Toplam Kalan Yasal Uçuş Sürelerinin Enküçüklenmesi (Goal 1: Minimizing The Total Remaining Legal Flying Hours of Aircrafts)

Uçak üreticileri, uçakların bakım aralıklarının tanımlanmasında temel olarak uçak uçuş saatini referans olarak tanımlanmaktadır. Bir uçağın iki bakım arasındaki yasal olarak kullanılabileceği uçuş süresini enbüyük oranda kullanması, uçuş saati başına düşen bakım maliyetini enküçükmektedir. Bütünleşik uçak rotalama ve bakım çizelgeleme modeli, bakıma girecek uçak kümesinde yer alan uçakların bakıma girmeden önceki kalan yasal uçuş süresini enbüyük oranda kullanmakta ve uçakların gün içindeki son uçuşlarını bakım merkezlerinin bulunduğu havalimanlarına olacak şekilde atamaktadır. Modelin

amaç fonksiyonu (15), uçakların bakıma girmeden önceki kalan yasal uçuş süresini, uçakları uygun rotalara atayarak enküçükmektedir. $(1/r_k)$ katsayısı, kalan yasal uçuş süresi enküçük olan uçağın ilk olarak uygun rotalara atanmasını sağlamaktadır.

$$\text{Min} \sum_{k \in K} \left((r_k) - \left(\frac{1}{r_k} \right) \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ij} x_{ijk} \right) \quad (15)$$

Bütünleşik uçak rotalama ve bakım çizelgeleme modeli, uçakların kalan yasal uçuş sürelerini enküçükleyen amaç fonksiyonu (15) ve (1–11) kısıtlarından oluşmaktadır.

4.4. Hedef 2: Uçakların Uçuş Sayılarının Dengelenmesi (Goal 2: Balancing The Number of Flights of Aircrafts)

Uçak üreticileri, temel olarak bakım aralıklarını uçak uçuş süresi olarak tanımlamakla birlikte, uçak iniş sayısı olarak tanımlanmış bakım aralıkları da bulunmaktadır. Karar verici, rotalama ve bakım çizelgelemesini yaparken uçuş sayılarını dengeleyen hedef programlamayı kullanarak, hem uçakların kalan yasal uçuş sürelerini enküçükmekte hem de bakım aralığı uçak iniş sayısına göre verilen uçak parçalarında eniyi planlamayı yapma fırsatı yakalamaktadır.

Hedef programlama ile uçakların uçuş sayılarının dengelenmesinde ilk olarak bütünleşik uçak rotalama ve bakım çizelgeleme modeli çözülmektedir. Daha sonra uçakların uçuş sayılarını dengeleyen amaç fonksiyonu (16), birinci aşamada kullanılan modelin kısıtlarına (1)–(11) ilave edilen yeni iki kısıt (12) ve (13) ile birlikte çözülmektedir.

$$\text{Min} \sum_{k \in K} SS^+(k) + SS^-(k) \quad (16)$$

Amaç fonksiyonu (16), uçakların eşit olması istenilen uçuş sayısı değerinden sapma değerlerinin toplamını enküçükmektedir.

4.5. Hedef 3: Uçakların Uçuş Sürelerinin Dengelenmesi (Goal 3: Balancing The Flight Duration of Aircrafts)

Uçuş sürelerini dengeleyen model, bakıma girecek uçak kümesi dışındaki uçaklara atanacak uçuş bacaklarının sürelerinin toplamını birbirine eşit veya yakın olmasını sağlamaktadır. Hedef programlama ile uçuş sürelerini dengeleyen modelin kullanılması karar vericiye aynı yaştaki uçakların hem kullanım oranlarının hem de bakım maliyetlerinin birbirine eşit veya yakın tutma fırsatı vermektedir.

Tablo 1. 64 uçuşlu problem seti (The problem set with 64 flight)

Uçuş Numarası	Kalkış	Varış	Kalkış Zamanı	Varış Zamanı	Uçuş Numarası	Kalkış	Varış	Kalkış Zamanı	Varış Zamanı
F101	IST	ADA	06:30	08:00	F133	ADB	IST	16:30	17:30
F102	IST	ADA	15:15	16:45	F134	ADB	IST	22:30	23:30
F103	IST	ADA	20:00	21:30	F135	IST	ASR	06:30	07:50
F104	ADA	IST	08:55	10:25	F136	IST	ASR	19:40	21:00
F105	ADA	IST	17:40	19:10	F137	ASR	IST	08:50	10:10
F106	ADA	IST	22:30	23:55	F138	ASR	IST	21:50	23:10
F107	IST	AYT	06:30	07:30	F139	IST	KYA	11:30	12:40
F108	IST	AYT	10:45	11:45	F140	KYA	IST	13:20	14:25
F109	IST	AYT	16:45	17:45	F141	IST	MLX	11:50	13:20
F110	IST	AYT	20:45	21:45	F142	MLX	IST	14:15	15:45
F111	AYT	IST	08:30	09:30	F143	IST	MQM	13:25	15:10
F112	AYT	IST	12:35	13:35	F144	MQM	IST	16:10	17:55
F113	AYT	IST	18:45	19:45	F145	IST	SZF	11:55	13:10
F114	AYT	IST	22:50	23:50	F146	SZF	IST	14:10	15:25
F115	IST	DLM	15:35	16:45	F147	IST	TZX	06:40	08:15
F116	DLM	IST	17:45	18:55	F148	IST	TZX	18:55	20:30
F117	IST	DIY	06:40	08:25	F149	TZX	IST	09:15	10:50
F118	IST	DIY	18:55	20:40	F150	TZX	IST	21:35	23:10
F119	DIY	IST	09:25	11:00	F151	ESB	AYT	18:15	19:15
F120	DIY	IST	21:40	23:25	F152	ESB	AYT	16:15	17:15
F121	IST	ERZ	12:10	14:00	F153	AYT	ESB	20:15	21:15
F122	ERZ	IST	14:55	16:45	F154	AYT	ESB	18:15	19:15
F123	IST	GZT	06:30	08:15	F155	ESB	DIY	09:15	10:30
F124	IST	GZT	19:50	21:35	F156	ESB	DIY	10:30	11:45
F125	GZT	IST	09:10	10:55	F157	DIY	ESB	11:30	12:45
F126	GZT	IST	22:35	00:20	F158	DIY	ESB	12:45	14:00
F127	IST	ADB	06:30	07:30	F159	ESB	ADB	22:15	23:30
F128	IST	ADB	10:30	11:30	F160	ESB	ADB	20:15	21:30
F129	IST	ADB	14:25	15:25	F161	ESB	ADB	13:45	15:00
F130	IST	ADB	20:30	21:30	F162	ADB	ESB	07:00	08:15
F131	ADB	IST	08:30	09:30	F163	ADB	ESB	07:45	09:00
F132	ADB	IST	12:30	13:30	F164	ADB	ESB	16:00	17:15

Hedef programlama ile uçakların uçuş sürelerinin dengelenmesinde ilk olarak bütünleşik uçak rotalama ve bakım çizelgeleme modeli çözülmektedir. Daha sonra uçakların uçuş sürelerini dengeleyen amaç fonksiyonu (17), birinci aşamada kullanılan modelin kısıtlarına (1)–(11) ilave edilen yeni iki kısıt (12) ve (14) ile birlikte çözülmektedir.

$$\text{Min} \sum_{k \in K} SSS^+(k) + SSS^-(k) \quad (17)$$

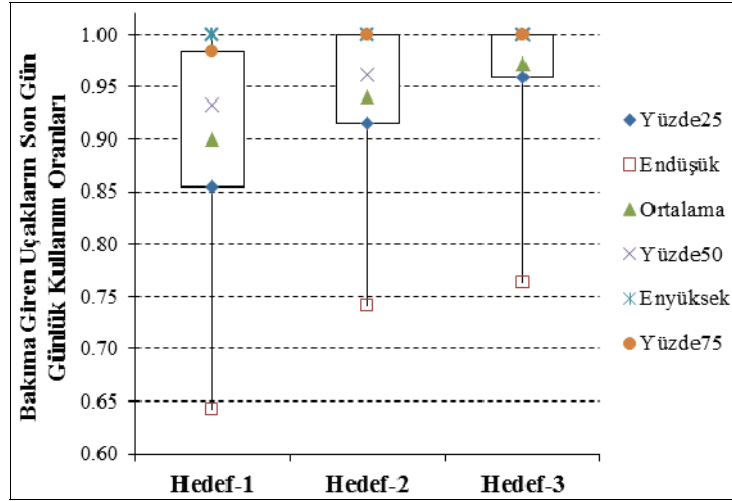
Amaç fonksiyonu (17), uçakların eşit olması istenilen uçuş süresi değerinden sapma değerlerinin toplamını enküçüklemelektir.

5. UYGULAMALAR (EXPERIMENTS)

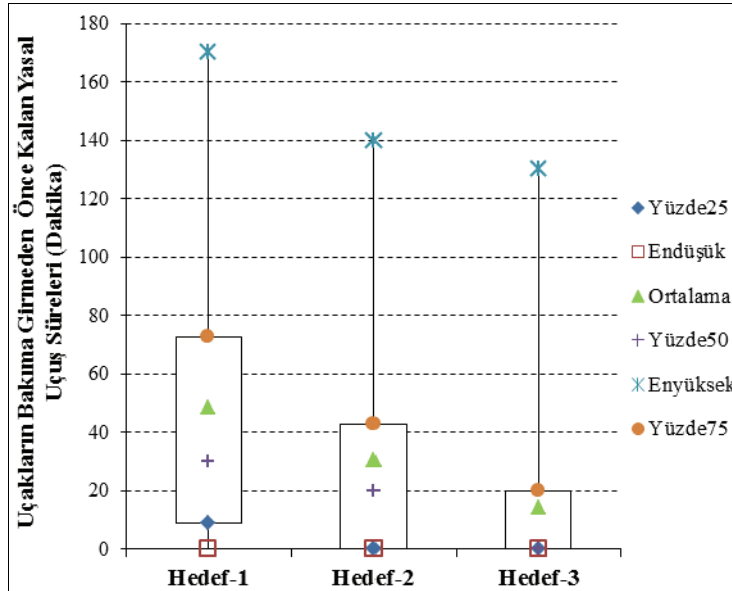
Çalışmanın bu bölümünde, havayolu işletmelerinin gerçek verilerinden yararlanılarak oluşturulan örnek uçuş tarifeli problem setleri önerilen modeller için CPLEX/GAMS tamsayı doğrusal program çözücü yazılımı kullanılarak çözülmüştür. Türkiye’de faaliyet gösteren özel bir havayolu işletmesinin uçuş tarifesinden yararlanılarak hazırlanan ve Tablo 1’de verilen 64 uçuşlu problem setinin çözümünde 11 uçak kullanılmıştır. Uçuş tarifesi, topla–dağıt uçuş serim yapısı olarak oluşturulmuş ve İstanbul tek bir merkezi havalimanı olarak kullanılmıştır.

Modeller, aynı uçuş programı ve rassal olarak uçakların kalan yasal uçuş sürelerinin türetildiği 10 farklı problem seti çözümlenerek, *çözüm süresi*, *eniye değerden sapma* ve *kullanım oranları* açısından değerlendirilmiştir. Her problem, üç hedef için çözülmüş ve toplamda 30 çözüm üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Problem setlerinden biri için grafikler hazırlanmış ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Bütün modeller %10 göreceli eniyilik tolerans değeri ile CPLEX/GAMS yazılımı Intel, Core 2 Duo 2.8GHz, 32 bit işlemcili bir bilgisayarda çalıştırılmıştır. Üç ayrı hedef için türetilen 10 ayrı problemde, çözüm süreleri sırasıyla saniye olarak 2,699–3,776; 4,509–4,836 ve 4,493–4,743 aralıklarında ve eniye değerden sapmalar ise %0–%00025; %0–%0 ve %0–%094 aralıklarında elde edilmiştir.

Hedeflere göre problem setleri çözüldüğünde bakıma giren uçakların son gün kullanım oranları Şekil 2’de ve bakıma girmeden önce kalan yasal uçuş dakikaları olarak Şekil 3’de kutu diyagramları ile gösterilmiştir. Bakıma giren uçakların son gün kullanım oranları hedeflere göre sırasıyla %64,28–%100; %74,07–%100 ve %76,36–%100 aralıklarında gerçekleşmiştir (Şekil 2). Uçaklar, kalan yasal uçuş süreleri açısından incelendiğinde ise sırasıyla 0–170; 0–140 ve 0–130 dakika aralıklarında bakıma girmişlerdir (Şekil 3). Uç değerler bir tarafa bırakıldığında, oranların dağılımlarının her üç hedef için de tutarlı olduğu,



Şekil 2. Hedeflere göre bakıma giren uçakların son gün günlük kullanım oranları (According to the goals of the utilization rate of aircrafts just before the maintenance on a daily basis)

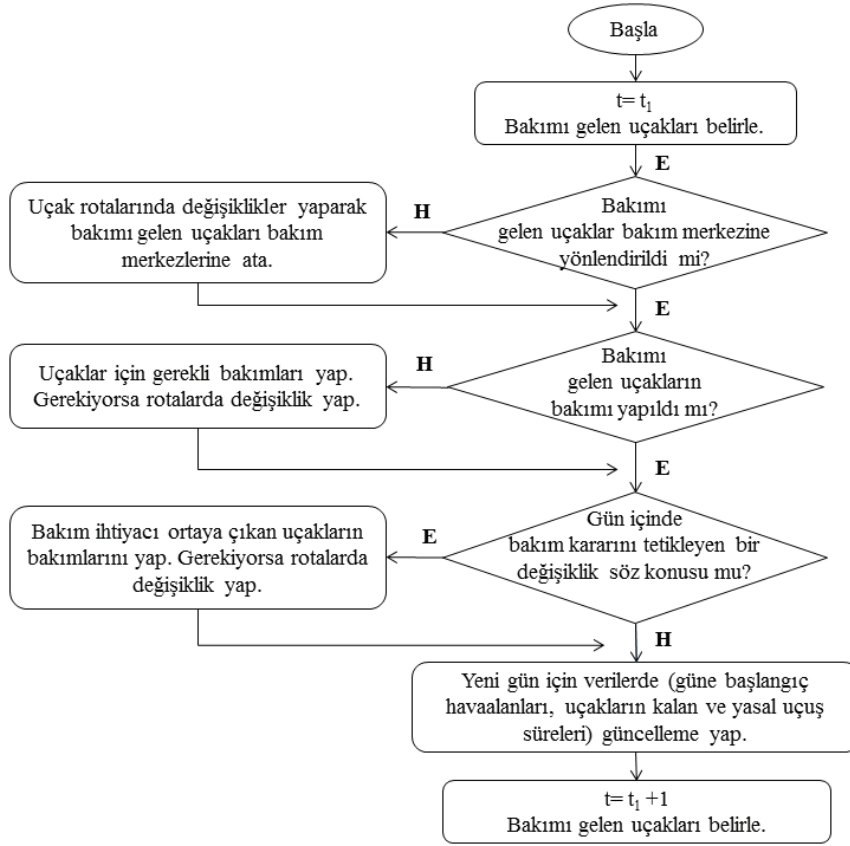


Şekil 3. Hedeflere göre uçakların bakıma girmeden önce kalan yasal uçuş süreleri (According to the goals the remaining legal flying hours of aircrafts just before the maintenance)

sırasıyla %85, %90 ve %95'in üzerinde bir kullanım oranı ile bakıma giren uçakların son gün kullanıldığı, yanı sıra kalan yasal uçuş sürelerinin 80, 50 ve 20 dakikanın altında olduğu görülmektedir.

Yaygın olarak kullanılan *gün tabanlı yaklaşım* ile çalışmada önerilen *uçuş süresi yaklaşımı* arasında karşılaştırma yapabilmek amacıyla aynı uçuş tarifesi ve aynı başlangıç değerler dikkate alınarak 24 günlük bir periyot için 192 problem ele alınmıştır. Gün tabanlı yaklaşımda Şekil 4'de gösterilen akış şemasına uygun olarak uçaklar dört günde bir ve beş günde bir bakıma girecek şekilde ayrı ayrı çözülmüştür. Uçaklar dört ve beş günde bir bakıma girdiklerinde yasal uçuş sürelerinin sırasıyla ortalama olarak %52,5 ve %41,2'i kullanılmadığı görülmüştür. Buna karşın problem

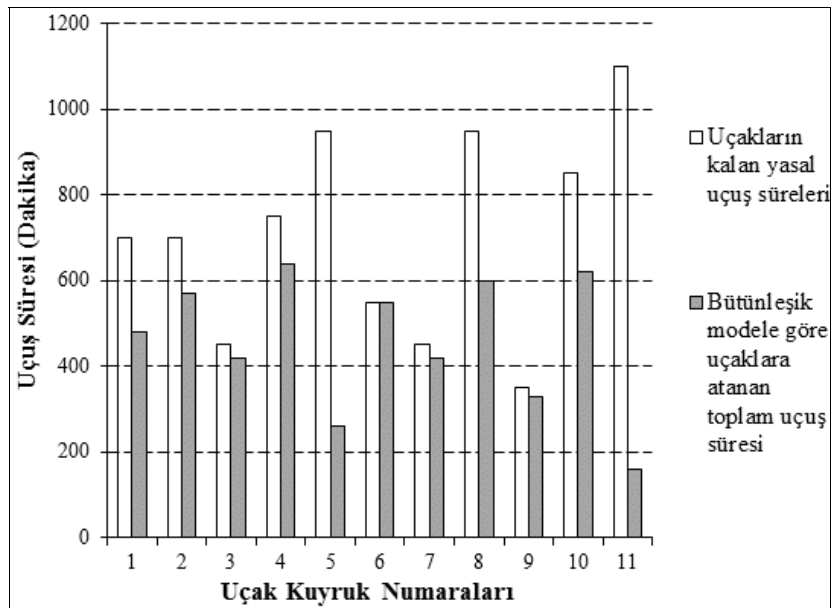
setleri uçuş süresi dikkate alınarak çözüldüğünde hedeflere göre uçaklar sırasıyla %0088; %0058 ve %0052 kayıp oranları ile bakıma girmiştir. Uçuş süresinin dikkate alındığı yaklaşımda uçakların yasal uçuş süreleri aşılmadan yedi ile on gün arasında bakıma girdiği görülmüştür. Karşılaştırmalar yıl bazında değerlendirildiğinde, gün tabanlı yaklaşımda sırasıyla beş ve dört günde bir bakıma giren uçak yılda 73 ve 91 kez, süre tabanlı yaklaşımda ortalama dokuz günde bir bakıma giren uçak yılda 41 kez bakıma girmiş olacaktır. Sonuç olarak, süre tabanlı yaklaşım kullanıldığında uçaklara %43,8 ile %54,9 oranında daha az bakım uygulanacak, bakım maliyetleri de aynı oranda azalacaktır.



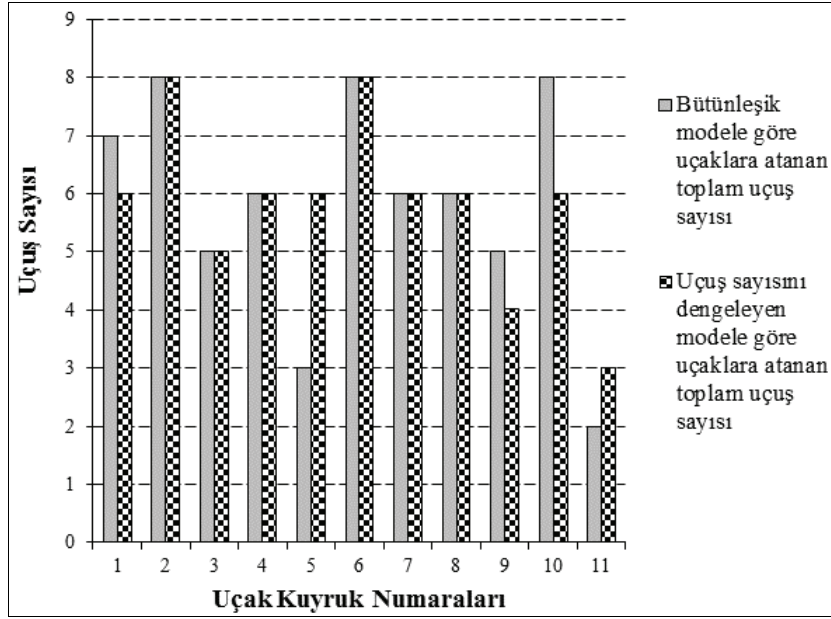
Şekil 4. Klasik gün tabanlı yaklaşımın akış şeması (The flow chart for the typical day-based approach)

Bütünleşik uçak rotalama ve çizelgeleme modelinin, Şekil 5’de gösterildiği gibi kalan yasal uçuş süresi enyüksek olan uçağa daha az uçuş süresi ve daha az kalan uçuş süresine sahip uçağa toplamda daha fazla uçuş süresi kullanılacak şekilde atama yaptığı görülmüştür. Örneğin, enküçük kalan yasal uçuş süresine sahip 9 kuyruk numaralı uçak %94,2;

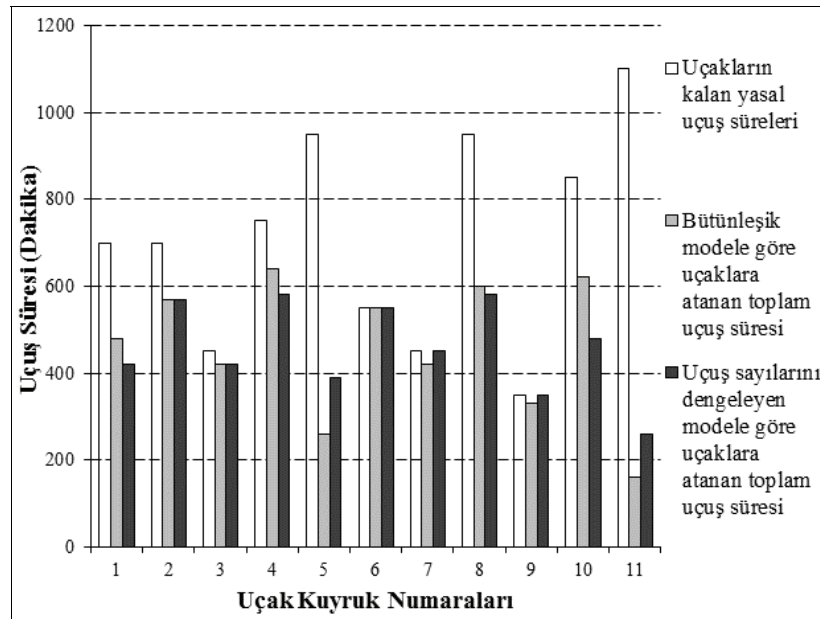
enyüksek uçuş sürelerinden birine sahip olan 11 kuyruk numaralı uçak %14,5 kullanım oranı ile rotalara atanmıştır (Şekil 5). 950 dakika uçuş süresine sahip 5 ve 8 kuyruk numaralı uçakların sırasıyla kalan yasal uçuş sürelerinin %27,3 ve %63,1’ini kullanılmıştır (Şekil 5). Bütünleşik uçak rotalama ve bakım çizelgeleme modeli, bakıma girecek uçakların



Şekil 5. Bütünleşik uçak rotalama ve bakım çizelgeleme modelinin sonuçları ile uçakların kalan yasal uçuş sürelerinin karşılaştırılması (Comparing the concurrent aircraft routing and maintenance scheduling model solutions with aircraft remaining legal flying hours)



Şekil 6.a Bütünleşik modelin sonuçları ile uçuş sayılarını dengeleyen modelin sonuçlarının uçaklara atanan toplam uçuş sayısına göre karşılaştırılması (Comparing the solution of the concurrent model and the solution of balancing aircraft flight numbers model according to the sum of the number of flights assigned to aircrafts)



Şekil 6.b Bütünleşik modelin sonuçları ile uçuş sayılarını dengeleyen modelin sonuçlarının uçaklara atanan uçuş sürelerinin toplamına göre karşılaştırılması (Comparing the solution of the concurrent model and the solution of balancing aircraft flight numbers model according to the sum of flight times assigned to aircrafts)

kalan yasal uçuş süreleri açısından incelendiğinde, 3 ve 6 kuyruk numaralı uçaklar %93,3; 6 ve 9 kuyruk numaralı uçaklar sırasıyla %100 ve %94,2 kullanım oranı ile son uçuşlarını bakım merkezlerinin olduğu havalimanına gerçekleştirecek şekilde atamıştır (Şekil 5).

Modelin, bakıma girmeden önce enküçük kalan yasal uçuş süresine sahip uçaktan başlayarak sıra ile uçakların uçuş değerlerinin tamamını kullanabilecek şekilde uygun rotalara atayabilmesi için uçakların sabah ilk uçuşlarına başladıkları havalimanı, uçuş süreleri, bağlantılı olabilecek diğer uçuşlar, uçuşların

başlangıç zamanları ve uçakların son uçuşunu gerçekleştireceği havalimanları arasında eniyi çizelgelemenin yapılmış olması gerektiği görülmüştür.

Şekil 6.a ve 6.b'de, uçaklara atanan uçuş sayısını dengelemek için denge sayısının 7 olarak alındığında elde edilen sonuçlar, bütünleşik uçak rotalama ve bakım çizelgeleme modeli sonuçları ile karşılaştırılarak gösterilmiştir. Uçuş sayılarını dengeleyen modelde bazı uçaklara (2 ve 3 kuyruk numaralı) bütünleşik modelde atanan uçuş numaraları ve uçuş sayısında atama yapılmıştır (Şekil 6.a). Bununla birlikte, uçuş sayılarını dengeleyen model,

Tablo2. Hedeflere göre uçaklara atanan uçuş numaraları (Flight numbers assigned to aircrafts according to the goals)

Uçak Numaraları	Bütünleşik modele göre uçaklara atanan uçuş numaraları	Uçuş sayısını dengeleyen modele göre uçaklara atanan numaraları	Uçuş süresini dengeleyen modele göre uçaklara atanan numaraları
1	F163-F156-F158- F152-F154-F160-F134	F163-F156-F158- F152-F154-F160	F162-F155-F157-F161- F164-F151-F153-F159
2	F162-F155-F157-F161- F164-F151-F153-F159	F162-F155-F157-F161- F164-F151-F153-F159	F163-F156-F158- F152-F154-F160-F134
3	F140-F102- F105-F103-F106	F140-F102- F105-F103-F106	F140-F102- F105-F103-F106
4	F123-F152-F121- F122-F118-F120	F117-F119-F121- F122-F136-F138	F123-F125-F145-F146- F109-F147-F149-F139
5	F147-F149-F139	F145-F146-F109- F113-F110-F114	F147-F149-F139
6	F107-F111-F128-F132- F129-F133-F148-F150	F107-F111-F108-F112- F129-F133-F148-F150	F117-F119-F141- F142-F136-F138
7	F108-F112-F115- F116-F136-F138	F127-F131-F128- F132-F118-F120	F101-F104- F143-F144-F130
8	F101-F104-F143- F144-F124-F126	F135-F137-F143- F144-F124-F126	F108-F112-F129- F133-F124-F126
9	F127-F131- F145-F146-F130	F123-F125-F115-F116	F135-F137-F148-F150
10	F117-F119-F141-F142- F109-F113-F110-F114	F101-F104-F141- F142-F130-F134	F107-F111-F121- F122-F118-F120
11	F135-F137	F147-F149-F139	F127-F131-F128- F132-F115-F116

uçaklara atanan uçuş sayısını dengelemek için bazı uçaklara atanan uçuş numaralarını ve atanan uçuş sayısını değiştirmiştir. Örneğin, Şekil 6.a'da gösterildiği gibi uçuş sayısını dengeleyen modelde 5 kuyruk numaralı uçağa atanan uçuş sayısı %100 oranında artmış (3 uçuş sayısı 6 uçuş sayısına çıkmış), 10 kuyruk numaralı uçağa atanan uçuş sayısı %25 oranında (8 uçuş sayısı 6 uçuş sayısına inmiş) azalmıştır.

Model, uçuş sayısının daha fazla olduğu problemlerde alternatif uçuş rota sayısına bağlı olarak daha başarılı sonuçlar verecektir. Uçuş sayılarını dengeleyen modelin sonuçları, her bir uçağa atanan toplam uçuş süresi açısından değerlendirildiğinde, bazı uçaklara atanan uçuş sayısı değişmemesine karşın bazılarında atanan uçuş numaraları ve her bir uçağın toplam uçuş süresi değişmiştir. Örneğin; 4, 6, 7 ve 8 kuyruk numaralı uçaklar aynı sayıda uçuş gerçekleştirmelerine rağmen (Şekil 6.a), uçaklara atanan uçuş numaraları (Tablo 2) ve dolayısıyla uçuş süreleri (Şekil 6.b) farklılık göstermektedir. İncelenen üç model için uçakların sırasıyla gerçekleştirdikleri uçuş numaraları Tablo 2'de gösterilmektedir.

Uçuş sayısını dengeleyen model, bakıma girecek uçakların kalan yasal uçuş süreleri açısından incelendiğinde, 3 kuyruk numaralı uçağı %93,3 ve 6, 7 ve 9 kuyruk numaralı uçakları %100 kullanım oranı ile son uçuşlarını bakım merkezlerinin olduğu havalimanına gerçekleştirecek şekilde atamıştır (Şekil 6.b).

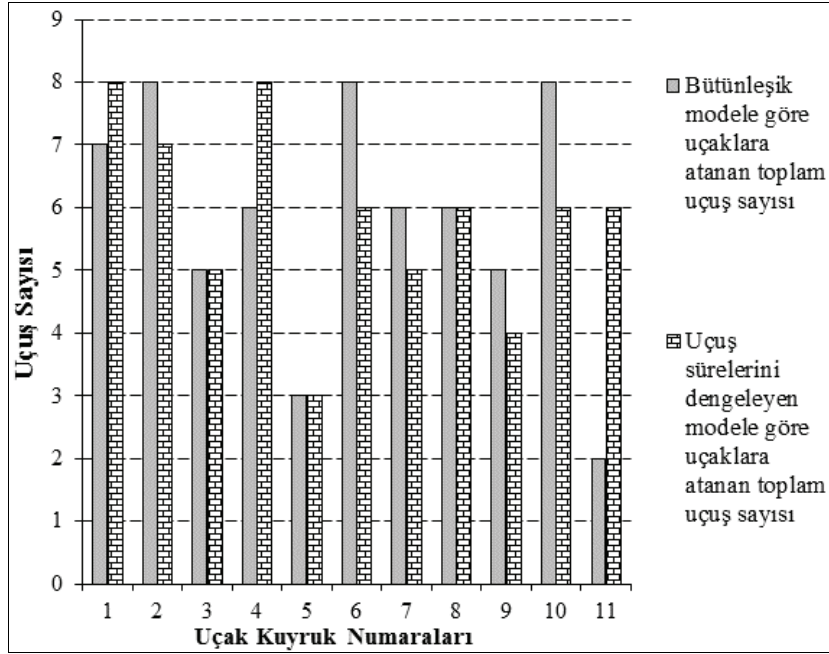
Şekil 7.a ve 7.b'de, uçaklara atanan uçuş sürelerini dengelemek için denge süresinin 400 dakika olarak alındığında elde edilen sonuçlar, bütünleşik uçak rotalama ve bakım çizelgeleme modeli sonuçları ile

karşılaştırılarak gösterilmiştir. Bütünleşik model ile karşılaştırıldığında uçuş sürelerini dengeleyen modelde 3 ve 5 kuyruk numaralı uçaklara atanan uçuş numaraları (Tablo 2) ve sayılarının (Şekil 7.a) aynı olduğu görülmüştür. Model, uçaklara atanan uçuş sürelerini dengeleyebilmek için bazı uçaklara atanan toplam uçuş sürelerini değiştirmiştir. Örneğin, bütünleşik modele göre 6 kuyruk numaralı uçağın toplam uçuş sayısı %25 oranında (8 yerine 6 uçuş atanmış) (Şekil 7.a) ve toplam uçuş süresi %1,81 oranında (550 yerine 540 dakikalık uçuş süresi) (Şekil 7.b) azalmış; 11 kuyruk numaralı uçağın toplam uçuş sayısı %200 oranında (2 yerine 6 uçuş atanmış) ve uçuş süresi %137,5 oranında (160 yerine 380 dakikalık uçuş süresi) artmıştır. Uçuş sürelerini dengeleyen modelde bütünleşik modelin eniyi değerinin korunarak çözüm elde edilmesi, bütünleşik modelin aslında alternatif çözüme sahip olduğunu göstermiştir.

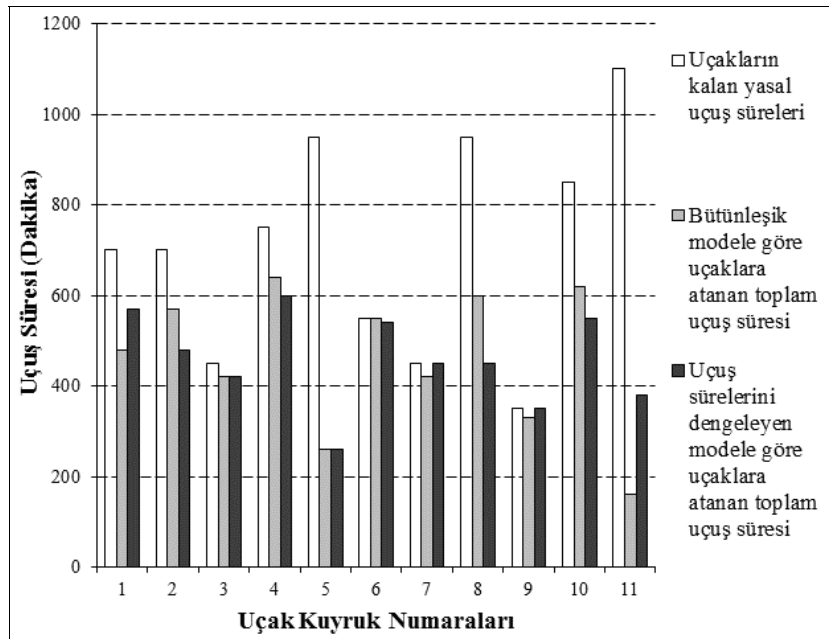
Uçuş süresini dengeleyen model, bakıma girecek uçakların kalan yasal uçuş süreleri açısından incelendiğinde, 3 ve 6 kuyruk numaralı uçakları sırasıyla %93,3 ve %94,2; 7 ve 9 kuyruk numaralı uçakları %100 kullanım oranı ile son uçuşlarını bakım merkezlerinin olduğu havalimanına gerçekleştirecek şekilde atamıştır (Şekil 7.b).

6. SONUÇLAR (RESULTS)

Havayolu sektörü kar marjlarının çok düşük ve rekabetin çok yoğun olduğu bir sektördür. Eniyileme yöntemlerini kullanan havayolu işletmeleri uzun vadede belirledikleri hedeflere ulaşmaya çalışırken, rakip firmalara karşı ciddi anlamda avantaj sağlamaktadır. Artan yakıt maliyetlerinin, havayolu işletmelerini, eniyilemeye dayalı planlama ve



Şekil 7.a Bütünleşik modelin sonuçları ile uçuş sayılarını dengeleyen modelin sonuçlarının uçaklara atanan uçuş sayısına göre karşılaştırılması (Comparing the solution of the concurrent model and the solution of balancing aircraft flight numbers model according to the sum of the number of flights assigned to aircrafts)



Şekil 7.b. Bütünleşik modelin sonuçları ile uçuş sürelerini dengeleyen modelin sonuçlarının uçaklara atanan uçuş sürelerinin toplamına göre karşılaştırılması (Comparing the solution of concurrent model with the solution of balancing the flight duration of aircraft according to the sum of flight times assigned to aircrafts)

çizelgeleme yöntemleri ile erişilebilir tasarruflara yöneltmesi kaçınılmazdır. Bu çalışmada, havayolu işletmelerinin direkt işletme maliyetleri arasında %18–23 oranında yer tutan bakım maliyetlerini öncelikli olarak enküçükleyen modeller önerilmiştir. Hedef programlama ile önerilen bütünleşik modeller, karar vericinin tercihine bağlı olarak uçuş sayılarını ve uçuş sürelerini dengeleyen amaçlara da erişilmesini sağlayacak şekilde hazırlanmıştır.

Amerikan Federal Havacılık İdaresinin her 65 uçuş saatinde zorunlu tuttuğu A-tipi kontrolü gerçekleştirebilmek amacıyla işletmeler her üç-dört günde bakıma girecek şekilde gün üzerinden planlama yaptıklarında uçakların yasal uçuş sürelerinin sırasıyla %55 ile %75'ini kullanabilmektedir. Türetilen 10 ayrı problem, bütünleşik uçak rotalama ve çizelgeleme modeline göre çözüldüğünde bakıma girecek uçaklar *son gün kalan yasal uçuş sürelerini* ortalama olarak %81,8 ile %96 oran aralığında kullanması sağlanmıştır. Önerilen bütünleşik rotalama ve

çizelgeleme yaklaşımında, *uçuş sayılarını* ve *uçuş sürelerini* de dengelemek hedeflendiğinde bakıma girecek uçakların *son gün kalan yasal uçuş sürelerinin* ortalama olarak sırasıyla %88,2 ile %98,3 ve %93,9 ile %99 aralıklarında kullanması gerçekleştirilmiştir. Önerilen hedef programlama yaklaşımı, aynı zamanda yasal uçuş süresi 65 uçuş saati üzerinden değerlendirildiğinde, uçakların bakıma girdiklerindeki kullanım oranlarının %95,4 ile %100 düzeyine çekilebileceğini göstermektedir.

Karşılaştırma amacıyla kullanılan 192 problemde, gün tabanlı yaklaşımda her dört ve beş günde bir bakıma giren uçakların ortalama kullanım oranları sırasıyla %47,5 ve %58,8 olduğu görülmüştür. Buna karşın söz konusu problem kümesi için önerilen yaklaşım ile uçakların %99,34 kullanım oranı ile bakıma girmelerinin sağlanabileceği gösterilmiştir.

Önerilen yaklaşım ile gün tabanlı yaklaşım karşılaştırıldığında, uçakların kullanım oranları arasındaki önemli yüzdellik farklar, bakım maliyetlerinde işletmelerin milyonlarca dolar tasarruf etmesini ve rakiplerine karşı bir üstünlük fırsatı sağlayacağı görülmektedir.

Önerilen yaklaşımın en önemli avantajı, gün sayısını temel alan bakım planlama yaklaşımları ile ortalamaların altında uçan uçakların erken bakıma girme ihtimalini uçuş atama-bakım kararlarını birlikte ele alarak önemli ölçüde azaltmasıdır. Uçakların kalan yasal uçuş sürelerinin dikkate alınarak yapılan bütünleşik uçak rotalama ve bakım çizelgelemesinde, bakım maliyetlerinin azalması, uçaklardan daha fazla yararlanılması, teknik personel ve bakım alanının daha iyi kullanılması ve böylece havayolu işletmesinin rekabet gücünün artırılması hedeflenmektedir. Sonuç olarak, işletmelerin günlük uçuş rota planlarının uçakların kalan yasal uçuş limitleri aşılmadan, bakım maliyetlerinde tasarruflar sağlanarak başarılı bir şekilde oluşturulmasının ve uygulamaya yönelik farklı yönetici tercihlerinin de çözüme yansıtılmasının havayolu işletmeciliğinin etkinliğini olumlu yönde geliştireceği gösterilmiştir.

Önerilen yaklaşımın bir tamsayı model olması, karar değişkeni ve kısıt sayılarına bağlı olarak, belirli bir model boyutu aşıldığında bilinen eniyileme yöntemlerinin yetersiz kalabileceği anlamına gelir. Ancak uygulamadaki uçuş programları sözkonusu yaklaşımın, Türkiye dahil bir çok ülkenin iç hat uçuşlarının planlanmasına engel olacak boyutlarda değildir. Nitekim incelenen gerçek problem, yaygın iç hat uçuşu yapan özel havayollarından birine aittir. Önerilen yaklaşımın iç hat ve uluslararası uçuşları birlikte ele alması istendiğinde, yani problem boyutları büyüdüğünde, eniyileme amacıyla ayrıştırma (decomposition) algoritmalarından, paralel eniyileme yaklaşımları (parallel optimization) ve metasezgisel

(metaheuristic) yöntemlerden yararlanılması düşünülmelidir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. IATA, “**IATA 2008 Annual Report**”, International Air Transport Association, 2008.
2. <http://www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2011-03-02-01.aspx>, 2011
3. Airbus, “**Airbus Global Market Forecast 2007-2026**”, 2007.
4. SHGMY, “**2002’den 2008’e Sivil Havacılık**”, T.C. Ulaştırma Bakanlığı Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü Yayınları, No:13., 2009.
5. <http://www.shgm.gov.tr/haberhtm/pegasus2.Htm>, 2009.
6. <http://www.hurriyet.com.tr/ekonomi/6780062.asp?m=1>, 2009.
7. Orhan, İ., Kapanoğlu, M., Karakoç, T.H., 2010, “Planning And Scheduling Of Airline Operations”, **Pamukkale University Journal of Engineering Sciences**, Cilt 16, Sayı 2, 181-191, 2010.
8. Clarke, L.W., Johnson, E.L., Nemhauser, G.L., Zhu Z., “The Aircraft Rotation Problem”, **Annals of Operations Research**, Cilt 69, Sayı 1, 33-46, 1997.
9. Gopalan, R. ve K. Talluri, “The Aircraft Maintenance Routing Problem”, **Operations Research**, Cilt 46, Sayı 2, 260–271, 1998.
10. Feo, T.A., Bard J. F., “Flight Scheduling and Maintenance Base Planning”, **Management Science**, Cilt 35, Sayı 12, 1415-1432, 1989.
11. Orhan, İ., Kapanoğlu, M., Karakoç, T.H. 2007, “Flight-Hour Based Optimization for Aircraft Scheduling”, **INFORMS**, 369, WD43, A.B.D.
12. Radnoti, G., **Profit Strategies for Air Transportation**, McGraw-Hill, New York, A.B.D., 2002.
13. Daskin, M.S. and Panayotopoulos N.C.. “A Lagrangian Relaxation Approach to Assigning Aircraft to Routes in Hub and Spoke Networks”, **Transportation Science**. Cilt 23, Sayı 2, 91-99, 1989.
14. Kabbani, N.M. ve Patty B.W., “Aircraft Routing at American Airlines”, **Proceeding of The 32nd Annual Symposium of AGIFORDS**, Budapest, Hungary, 1992.
15. Subramanian, R., Scheff, R.P., Quillinan, J.D., Wiper, D.S., Marten, R.E., “Coldstart: Fleet Assignment at Delta Airlines”, **Interfaces**, Cilt 24, No 1, 104-120, 1994.
16. Barnhart, C., Boland, N.L., Clarke L.W., Johnson E.L., Nemhauser, G.L., “Flight String Models for Aircraft Fleeting and Routing”, **Transportation Science**, Cilt 32, No 2, 208-220, 1998.
17. Rexing, B., Barnhart, C., Kniker, T., Jarrah, A., Krishnamurthy, N. “Airline Fleet Assignment

- with Time Windows”, **Transportation Science**, Cilt 34, Sayı 1, 1-20, 2000.
18. Armacost, A, Barnhart, C., Ware, K., “Composite Variable Formulations For Express Shipment Service Network Design”, **Transportation Science**, Cilt 36, No 1, 1-20, 2002.
 19. Sriram, C. ve Haghani, A., “An Optimization Model For Aircraft Maintenance Scheduling And Re-Assignment”, **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, Cilt 37, Sayı 1, 29-48, 2003.
 20. Lohatepanont, M., Barnhart, C., “Airline Schedule Planning: Integrated Models and Algorithms for Schedule Design and Fleet Assignment”, **Transportation Science**, Cilt 38, Sayı 1, 19-32, 2004.
 21. Sarac, A., Batta, R., Rump, C.M., “A Branch-and-Price Approach for Operational Aircraft Maintenance Routing”, **European Journal of Operational Research**, Cilt 175, No 3, 1850-1869, 2006.
 22. Schniederjans, M.J., **Goal Programming: Modeling and Applications**, Kluwer Academic, Boston, A.B.D., 1995.
 23. Jones, D. ve Tamiz, M., **Practical Goal Programming**, Springer, New York, A.B.D., 2010.