

**UÇAK BAKIM PLANLAMASININ
EN İYİLENMESİNE YÖNELİK
BİR KARAR DESTEK TASARIMI**

İlkay ORHAN
Doktora Tezi

Sivil Havacılık Anabilim Dalı
Ekim-2007

JÜRİ ve ENSTİTÜ ONAYI

İlkay ORHAN'ın “Uçak Bakım Planlamasının En İyilenmesine Yönelik Bir Karar Destek Tasarımı” başlıklı Sivil Havacılık Anabilim Dalındaki, Doktora Tezi 19.10.2007 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Adı-Soyadı

İmza

Üye (Tez Danışmanı) : Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ

Üye (Tez Danışmanı) : Yard. Doç. Dr. Muzaffer KAPANOĞLU

Üye : Prof. Dr. Mustafa CAVCAR

Üye : Prof. Dr. Mecit SİVRİOĞLU

Üye : Yard. Doç. Dr. Hüseyin GÜNERHAN

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

ÖZET

Doktora Tezi

UÇAK BAKIM PLANLAMASININ EN İYİLENMESİNE YÖNELİK BİR KARAR DESTEK TASARIMI

İlkay ORHAN

**Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Sivil Havacılık Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ
İkinci Danışman: Yard. Doç. Dr. Muzaffer KAPANOĞLU
2007, 132 sayfa**

Dünya havacılık sektörü son 5 yılda dünyada %5 büyürken Türk Sivil Havacılık sektörü %30 büyümüştür. Bu hızlı büyüme rekabet ve fırsatları da yanısıra getirmiştir. 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 rotalarının belirlenmesi yani rotalamanın uçakların havada kalış sürelerini belirleyici olması, öte yandan, uçak bakım maliyetlerinin direkt işletme maliyetlerinin %18-23'ünü oluşturuyor olması göz önüne alındığında, bu iki problemin bütünlük çözümlenmesi ile yakalanabilecek fırsatların havayollarının rekabet gücünü olumlu etkileyeceği açıktır. Her iki problemi ayrı ayrı inceleyen çalışmalar olmasına karşın iki problemi birlikte ele alan az sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmada uçak rotalarının belirlenmesi yani rotalama probleminin bakım gereksinimleri ile birlikte ele alınması, böylece uçakların etkin kullanımının yanısıra bakım maliyetlerinin enküçüklenmesi hedeflenmiştir. Belirtilen hedef doğrultusunda, uçakların bakıma girmeden önceki yasal kullanılabilir uçuş zamanlarını da enküçükleyen bütünlük çok-amaçlı karma tamsayılı doğrusal bir modelleme yaklaşımı önerilmiştir. Yaklaşım, uçuş sayılarını ve/veya sürelerini de karar vericinin öncelikleri doğrultusunda dengelemekte, böylece uçak kullanım oranları ve bakım maliyetlerinin olabildiğince eşit tutulmasını sağlamaktadır. Uçakların günlük uçuş sayı ve sürelerinin dengelenmesi, mürettebat çizelgeleme problemlerinde karşılaşılabilecek bazı güçlükleri ortadan kaldırmaktadır. Önerilen yaklaşım karar vericiye hedefleri doğrultusunda önceliklerini güncelleme ve karşılıklı etkileşimli olarak yeniden-belirleme olanağı sunan bir karar destek sistemidir. Yaklaşımın geçerliliğinin sınanması aşamasında, iki havayolu işletmesinin gerçek verilerinden yararlanılarak oluşturulan problemler, CPLEX/GAMS karma tamsayılı doğrusal program çözücü yazılımı kullanılarak çözülmüş ve sonuçlar yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hedef Programlama, Uçak Bakım Planlaması, Uçak Rotalama, Sivil Havacılık Yönetimi, Karma Tamsayı Modelleme, Karar Destek Sistemi

ABSTRACT

Ph.D. Dissertation

A DECISION SUPPORT APPROACH TO AIRCRAFT MAINTENANCE PLANNING OPTIMIZATION

İlkay ORHAN

**Anadolu University
Graduate School of Sciences
Civil Aviation Program**

**Supervisor: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ
Co-Supervisor: Assist. Prof. Dr. Muzaffer KAPANOĞLU
2007, 132 pages**

The aviation industry has increased at 5% in worldwide, while at 30% in Turkey in the last 5 years. This rapid increase has also brought the competitions and opportunities. 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. Considering defining the aircraft routes and the aircraft maintenance costs which form 18-23% of the direct operation costs, solving these two problems with integrated methods, it is obvious that the opportunities gained will affect the competition power of the airlines positively. Although there are some studies which investigate these two problems separately, there are also few studies which deal with both these problems. In this study, defining the aircraft routes with maintenance requirements, either the effective usage of aircrafts and minimizing the maintenance costs has been aimed. At the direction of these goals, an approaching combined multi-objective mixed integer linear model is proposed which minimize the legal available flight durations of the aircrafts before maintenance. This approach has balanced the flight numbers and/or flight durations at the direction of decision maker, thus it has provided the aircraft usage ratio and maintenance costs as possible as equal. Compensating the daily flight number and durations of aircrafts, it has eliminated the difficulties which one could encounter at the crew scheduling problems. The proposed approach is decision support system which provides priority updates and interactive re-defines towards to the goal for the decision maker. During the proofing of the availability of the approach, the problems created by the real data of two airlines, have been solved by the software of CPLEX/GAMS mixed integer linear program and interpreted.

Keywords : Goal Programming, Aircraft Maintenance Planning, Aircraft Routing, Civil Aviation Management, Mixed-Integer Programming, Decision Support System.

TEŞEKKÜR

Doktora Tez Danıőmanlarım, Sayın Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ ve Sayın Yard. Doç. Dr. Muzaffer KAPANOĞLU'na çalıőmalarım süresince göstermiő oldukları yakın ilgi, değerli önerileri, ayırdıkları değerli zamanları, büyük yardımları ve destekleri için teşekkür ediyorum.

Havacılık ile ilgili konularda zaman zaman danıőtıđım Sayın Prof. Dr. Mustafa CAVCAR'a katkı ve destekleri için teşekkür ediyorum. Ben ve diğer doktora tez arkadaşlarıma verdiği destekler için Sayın Nimet KARAKOÇ'a teşekkür ediyorum.

Tezi okuyarak önerilerini paylaşan ve değerli katkılarından dolayı Enis TURHAN TURGUT'a ve Önder TURAN'a, Önder ALTUNTAŐ'a ve Yılmaz YÖRÜ'ye teşekkür ediyorum.

Her zaman desteklerini arkamda hissettiğim ve sıkıntılarımnda yanımda olan en büyük moral ve motivasyon kaynağım olan annem, babam, kardeőim, amcam ve aileme teşekkür ediyorum.

İlkay ORHAN

Ekim, 2007

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Türk Sivil Havacılığına Genel Bakış	2
1.2. Tezin Amacı	3
2. HAVAYOLU ENDÜSTRİSİNDE PLANLAMA ve ÇİZELGELEME	
PROBLEMLERİ	9
2.1. Uçuş Tarifesinin Tasarımı	10
2.1.1. Uçuş programı açısından serim yapısı.....	12
2.1.2. Matematiksel model açısından serim yapısı.....	14
2.1.2.1. Zaman hattı serim yapısı.....	15
2.1.2.2. Bağlantı serim yapısı	17
2.2. Uçak Çizelgeleme	18
2.2.1. Filo atama problemi.....	19
2.2.2. Uçak rotalama problemi	22
2.2.2.1. Havacılıkta bakımın önemi ve amacı	23
2.2.2.2. Uçak bakım gereksinimi	25
2.3. Mürettebat Çizelgeleme Problemi.....	28
2.3.1. Mürettebat uçuş programı.....	28
2.3.2. Aylık mürettebat ataması.....	30
2.4. Havayolu Çizelgelemesinde Düzensiz Olayların Yönetilmesi	31
2.4.1. Uçuş-uçak yeniden çizelgeleme	32
2.4.2. Mürettebat yeniden çizelgeleme.....	33

3. MATEMATİKSEL MODELLER ve ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI	35
3.1. Literatür Araştırması	35
3.2. Çok Ürünlü Serim Akış Modeli	56
3.3. Çok Amaçlı Programlama	58
3.3.1. Pareto-en iyi çözümler.....	60
3.4. Hedef Programlama	61
3.4.1. Ağırlıklı hedef programlama	63
3.4.2. Öncelikli hedef programlama	64
3.5. Sütun Türetme	65
3.6. Dantzig-Wolfe Ayırıştırması	66
3.7. Bender Ayırıştırması	70
4. UÇAK BAKIM ve ROTA PLANLAMASINA YÖNELİK	
ÖNERİLEN KARMA TAMSAYILI MODELLER	72
4.1. Uçuş Bacak Kapsam Kısıtı	73
4.2. Uçak Kapsam Kısıtı	73
4.3. Akış Koruma Kısıtı	74
4.4. Rota ve Öncelik Kısıtı	74
4.5. Yasal Kalan Uçuş Saati Kısıtı	76
4.6. Gün Sayısı Üzerinden Bakım Kısıtı	76
4.7. Kesintisiz Uçuş Kısıtı.....	77
4.8. Bütünleşik Uçak Bakım ve Rota Planlama Modeli.....	77
4.9. Çok Amaçlı Bütünleşik Uçak Bakım ve Rota Planlama- Uçuş Sayılarını Dengeleyen Model	80
4.10. Çok Amaçlı Bütünleşik Uçak Bakım ve Rota Planlama- Uçuş Sürelerini Dengeleyen Model	83
4.11. Çok Amaçlı Bütünleşik Uçak Bakım ve Rota Planlama- Uçuş Sayılarını ve Sürelerini Dengeleyen Model	86
4.12. Çok Amaçlı Bütünleşik Uçak Bakım ve Rota Planlama- Uçuş Sürelerini ve Sayılarını Dengeleyen Model	89

5. YAKLAŞIMIN UYGULANMASI ve ÇÖZÜMLERİN DEĞERLENDİRMESİ.....	93
5.1. 26 Uçuşlu Problem Seti.....	94
5.2. 75 Uçuşlu Problem Seti.....	99
5.3. 164 Uçuşlu Problem Seti.....	104
6. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	107
KAYNAKLAR	111
Ek-1 GAMS En İyileme Programı	119
Ek-2 GAMS’de Örnek Uygulama	123
Ek-3 GAMS’de Örnek Uygulamanın Sonuçları	131

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
1.1 Havayolu işletmelerinde kullanılabilir örnek bir karar destek sisteminin akış şeması	7
2.1. Havayolu işletmelerinde çizelgeleme ve planlama süreci	9
2.2. Uçuş tarifesinde birbiriyle çelişen amaçlar	11
2.3. THY'nın iç hat uçuş tarifesinin topla-dağıt uçuş şebekesinde gösterilmesi	14
2.4. Zaman hattı serim yapısı	17
2.5. Bağlantı serim yapısı.....	18
2.6. Merkez üssü İstanbul olan mürettebat için iki günlük uçuş programı	29
3.1. İki amaçlı problem için Pareto sınır bölgesi	61
4.1. Uçağın yasal kullanılabilir uçuş saati.....	78
5.1. 26 uçuş için bütünlük uçak bakım ve rota planlamasında uçaklara atanan uçuş süreleri ile uçakların kullanılabilir yasal uçuş sürelerinin karşılaştırılması.....	95
5.2. 26 uçuş tarifeli çok amaçlı bütünlük uçak bakım ve rota planlaması- uçuş sayılarını dengeleyen modelde uçaklara atanan uçuş süreleri ile uçakların kullanılabilir yasal uçuş sürelerinin karşılaştırılması	96
5.3. 26 uçuş tarifeli çok amaçlı bütünlük uçak bakım ve rota planlaması- uçuş sürelerini dengeleyen modelde uçaklara atanan uçuş süreleri ile uçakların kullanılabilir yasal uçuş sürelerinin karşılaştırılması	97
5.4. 22 uçuş tarifeli çok amaçlı bütünlük uçak bakım ve rota planlaması- uçuş sayılarını ve sürelerini dengeleyen modelin sonuç grafiği	98
5.5. 22 uçuş programı için çözülen beş modelin çözüm zamanları arasındaki ilişki	99
5.6. 75 uçuş için bütünlük uçak bakım ve rota planlamasında uçaklara atanan uçuş süreleri ile uçakların kullanılabilir yasal uçuş sürelerinin karşılaştırılması	100

5.7. 75 uçuş için çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlaması- uçuş sayılarını dengeleyen modelin sonuç grafiği	101
5.8. 75 uçuş-11 uçak için bütünleşik uçak bakım ve rota planlaması modeli ile çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlaması- uçuş sayılarını dengeleyen modelin sonuçlarının karşılaştırılması.....	102
5.9. 75 uçuş-11 uçak için bütünleşik uçak bakım ve rota planlaması modeli ile çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlaması- uçuş sürelerini dengeleyen modelin sonuçlarının karşılaştırılması.....	102
5.10. 75 uçuş-11 uçak için çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlaması-uçuş sürelerini dengeleyen modelin birinci amaç fonksiyonun iyileştirilmesi ve çözüm zamanı arasındaki ilişki	103
5.11. 164 uçuşlu programın uçak sayısını ile çözüm süresi arasındaki ilişki	104
5.12. 164 uçuşlu programda kesintisiz uçuş sayısı ile çözüm süresi arasındaki ilişki	105

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
2.1. Örnek bir uçuş tarifesi (IST=İstanbul Atatürk Hava Alanı, TZX = Trabzon Hava Alanı, ESB = Ankara Esenboğa Hava Alanı)	10
2.2. Örnek uçuş tarifesi	16
2.3. Uçaklara uygulanan bakım kontrolleri.....	26
3.1. Hedef Programlamada hedef kısıtlayıcıları.....	62

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

MPD	: Bakım Planlama Dökümanları (Maintenance Planning Document)
AMM	: Uçak Bakım El Kitapları (Aircraft Maintenance Manual)
CMM	: Parça Bakım El Kitapları (Component Maintenance Manual)
SBs	: Servis Bültenleri (Servis Bulletins)
SLs	: Servis Notları (Service Letters)
FAA	: Federal Havacılık Yönetimi (Federal Aviation Administration)
MEL	: Minimum Ekipman Listesi (Minimum Equipment List)
GAMS	: Genel Cebirsel Modelleme Sistemi (General Algebraic Modeling Systems)
A380	: Airbus 380 uçağı
B737	: Boeing 737 uçağı
N	: Uçuş bacakları (düğümler)
B	: Bağlantı arkları
$G = (N, B)$	: Bağlantı şebekesi
N_{th_u}	: Kesintisiz uçuş yapılacak uçuş bacakları kümesi ($N_{th_u} \subset N$).
$f(i)$	: Yapay ilk uçuş numarası “o” yu gösterir. ($f \subset i$).
$l(i)$	: Yapay son uçuş numarası “t” yi gösterir. ($l \subset i$).
K	: Uçak kümesi.
$KM(k)$	: Bakıma girecek uçak kümesi ($KM(k) \subset K$).
$KMc(j)$	: Bakım merkezinin bulunduğu hava alanına olan uçuşlar ($KMc(j) \subset i$)
MT	: Bakım tipleri kümesi.
w	: Takvim gün üzerinden uygulanacak bakım
a	: Uçuş süresi üzerinden uygulanacak bakım
$KMw(k)$	: Takvim zamanı üzerinden bakım uygulanacak uçak kümesi
$KMa(k)$	: Uçuş süresi üzerinden bakım uygulanacak uçak kümesi
C	: Hava alanları kümesi.
$mc(c)$	: Bakım yapılabilen hava alanları kümesi ($mc \subset c$).
OWNc	: Uçakların geceleyebileceği hava alanları kümesi

- OWNc(k) : c şehrinde geceleleyen uçaklar
- DFFc(i) : c şehrinde başlayan uçuşlar
- r(k) : k uçağının yasal kullanılabilir uçuş süresi (dakika).
- A(mt,k) : $\begin{cases} 1 & \text{Eğer k uçağının mt tipi bakıma ihtiyacı varsa,} \\ 0 & \text{Diğer durumlarda.} \end{cases}$
- Ca(i,c) : $\begin{cases} 1 & \text{Eğer i uçuş bacağına varış şehri c ise,} \\ 0 & \text{Diğer durumlarda.} \end{cases}$
- Cd(j,c) : $\begin{cases} 1 & \text{Eğer j uçuş bacağına ayrılış şehri c ise,} \\ 0 & \text{Diğer durumlarda.} \end{cases}$
- KC(k,c) : $\begin{cases} 1 & \text{Eğer k uçağının günün ilk uçuş başlangıç şehri c ise,} \\ 0 & \text{Diğer durumlarda.} \end{cases}$
- Cmt(mt,c) : $\begin{cases} 1 & \text{Eğer uçağın geceleyeceği c şehrinde mt tipi bakım} \\ & \text{yapılabiliyorsa,} \\ 0 & \text{Diğer durumlarda.} \end{cases}$
- X(i,j,k) : $\begin{cases} 1 & \text{Eğer k uçağı ve j uçuş bacaklarını ardışık olarak uçuyorsa,} \\ 0 & \text{Diğer durumlarda.} \end{cases}$
- $SS^+(k)$: k. uçağın eşit olması istenilen uçuş sayısını aşan değeri.
- $SS^-(k)$: k. uçağın eşit olması istenilen uçuş sayısının altındaki değeri.
- $SSS^+(k)$: k. uçağın eşit olması istenilen uçuş süresini aşan değeri.
- $SSS^-(k)$: k. uçağın eşit olması istenilen uçuş süresinin altındaki değeri.
- T(i,j) : (i,j) bağlantısının süresi (i bacağına uçuş süresine eşittir).
- Ck(r) : k uçağı ile ilgili maliyet.
- Ts(i) : i uçuşu sonunda uçağın bir sonraki uçuş için hazırlanma süresi (dakika)
- Td(i) : i uçuş bacağına ayrılış zamanı (dakika).
- Tdt(t,k) : k uçağının yapay "t" havuz düğümünden ayrılış zamanı (dakika).
- Tdo(o,k) : k uçağının yapay "o" havuz düğümünden ayrılış zamanı (dakika).
- z1 : Bütünleşik uçak bakım ve rota planlama modelinin en iyi değeri
- z2 : Bütünleşik uçak bakım ve rota planlama-uçuş sayılarını eşitleyen modelin en iyi değeri.
- z3 : Bütünleşik uçak bakım ve rota planlama-uçuş sürelerini eşitleyen modelin en iyi değeri.
- M : Yeterince büyük bir sayı.
- FNV : Uçakların gün içerisinde eşit oranda uçuşması istenilen uçuş sayı değeri.

FHV	: Uçakların gün içerisinde eşit oranda uçuşması istenilen uçuş süre değeri(dakika).
SP	: Alt problem.
RMP	: Sınırlandırılmış alt problem.
c^I	: Karar değişkeninin maliyet katsayısı.
P_k	: k. hedefin önceliğini.
a_{ik}^+, a_{ik}^-	: k önceliğine sahip i. hedefe ilişkin sapma değişkeninin ağırlığı.
S_i^+, S_i^-	: i. hedefe ilişkin negatif ve pozitif sapma değerleri.
t_{ij}	: i. hedef ve x_j ile ilişkili teknoloji katsayısı.
b_i	: i. hedef düzeyi.
$f_i(x)$	: Amaç fonksiyonu
G_i	: i. hedef program/amaç fonksiyonu
P_i	: i. hedefin önceliği
$r^{(i)}$	: Uç yön
$x^{(i)}$	: Uç nokta
w	: Ağırlık katsayısı
A_j	: Teknik katsayıların oluşturduğu matrisin sütun değeri
F^*	: Amaç fonksiyonunun en küçük değeri
λ	: Uç noktaların katsayı değeri
μ	: Uç yönlerin katsayı değeri
max	: Maksimum
min	: Minimum
D	: Uygun çözüm alanı
RMP	: Sınırlandırılmış Temel Problem (Relaxed Master Problem)
SP	: Alt problem (Sub problem)
MILP	: Karma tamsayı doğrusal program (Mixed Integer Linear Program)
LP	: Doğrusal program (Linear Program)
H	: Düğüm kümesi
E	: Ark kümesi

Alt ve Üst İndisler

- i ve j : Uçuş bacaklarını (düğümleri) gösteren indisler.
- u : Kesintisiz uçuş yapılacak uçuş bacakları indis kümesi
- 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 ($t \in N$).
- k : Uçakları gösteren indis.
- mt : Bakım tipini gösteren indis (Uçuş-saati, haftalık, aylık, 3 aylık vb.).
- c : Hava alanlarını gösteren indis.

1. GİRİŞ

Orville ve Wilbur Wright'ın ilk uçuşundan bu yana 100 yıllık süreç içerisinde havayolu taşımacılığı global endüstri içerisinde büyüyen en büyük sektörlerden biri olmuştur. Daha önemlisi havayolu taşımacılığı, ülkeler ve insanlar arasındaki ekonomik ve kültürel bağları korumak ve geliştirmek için önemi artan bir araç olmaya başlamıştır. Örneğin havayolu işletmeleri, sadece 2002 yılında 300 milyar dolar gelir elde etmiş ve yaklaşık olarak 16 milyar yolcu taşımıştır. Önümüzdeki 20 yıllık süreç içerisinde en son yapılan tahminlere göre havacılık sektörünün yılda %4-5 arasında veya üzerinde bir oranda büyüyeceği tahmin edilmektedir. Havayolu taşımacılığı, dolaylı ve doğrudan olmak üzere 28 milyon kişiye iş imkanı sağlamaktadır. Dünyadaki eşya, değerli ürün gibi ticaretin %40'ı havayolu taşımacılığı ile gerçekleştirilmektedir (Barnhart ve ark. 2003a). Günümüzde (2007) havacılık, dünya ekonomisine %8 oranında katkı sağlamaktadır (http-1).

Havayolu sektöründe yöneylem araştırmasının kullanılmasının en önemli nedenlerinden biri, yöneylem araştırmasında kullanılan teknik ve modellerin havacılık sektöründeki problemlerin çözümüne yönelik bir uygulama sahası oluşturmasıdır. İkinci neden, havayolu sektörünün bilgi teknolojilerinin kullanılmasında lider olması ve yoğun bilgisayar kullanımı gerektiren bir sektör olmasıdır. 1950'li yıllardan bugüne havayolu taşımacılığı ile ilgili olarak binin üzerinde yayın çalışması yapılmıştır. Yöneylem araştırmasının önemli oranda katkı yaptığı alanlar; havacılık güvenliği ve emniyeti, havayolu filo planlaması, havayolu personel ataması ve planlaması, uçak bakım planlaması, uçak doluluk oranı, uçağın yerde gecikme problemleri ve uçakların hava alanlarında körük veya uçuş kapılarına ataması yapılırken kullanılan karar destek araçları şeklinde sayılabilir (Barnhart ve ark. 2003a; Yu ve Thengvall 2002).

Havayolu endüstrisinde çizelgeleme, rotalama ve mürettebat ataması gibi klasik problemler, büyük ölçekli kesikli en iyileme (optimisation) yaklaşımlarının kullanılmasını gerektirir. Havayolu işletmeleri, 1980'li yıllardan beri, havayolu gelir/kazanç yönetimi ve serim (networks) gelirlerinin enbüyüklenmesi konusunda stokastik ve en iyileme yöntemlerini bir arada kullanarak ek gelir elde etmişlerdir.

Ayrıca, hem stokastik hem de deterministik en iyileme yöntemlerinin yoğun bir şekilde kullanıldığı hava trafik akış yönetimi içerisinde kapasite, gecikme ve uçuş güvenliğini dikkate alan çalışmalar yapılmıştır. Havayolu sektöründeki planlama ve operasyonel problemleri çözmek için oluşturulan modeller gittikçe daha karmaşık hale gelmeye başlamıştır. Büyük ölçekli modeller, günümüzdeki algoritmalar ile bilgisayar donanım ve yazılımlarındaki gelişmeler sayesinde hesaplanabilir hale gelmiştir (Barnhart ve ark.2003a; Gopalan ve Talluri 1998; Klabjan 2005).

1.1. Türk Sivil Havacılığına Genel Bakış

2002 yılından sonra Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü, atıl durumda bulunan hava alanlarının kullanımını sağlayabilmek, bölgesel turizme ve ülke ekonomisine kazandırmak için tarifeli iç hat yolcu taşımacılığı ile ilgili kısıtlamaları kaldırarak, iç hat tarifeli taşımacılığının THY'nın dışındaki özel havayolu işletmeleri tarafından da yapılabilmesine imkan sağlamıştır. 2002-2006 yılları arasında Türk Sivil Havacılık sektöründeki gelişmeler rakamsal olarak aşağıda verilmiştir.

- 2002 yılında havayolu taşımacılığı yapan şirket sayısı 13 iken, bu sayı Nisan 2006 tarihi itibarıyla, ikisi kargo taşımacılık işletmesi olmak üzere toplam 19'a yükselmiştir. Ayrıca dört havayolu işletmesine de ön izin verilmiştir (http-2; http-3).
- 2002 yılında 150 hava aracı mevcut iken, 2006 yılında sadece havayolu işletmelerinin bünyesindeki büyük gövdeli uçak sayısı 259'a ulaşmıştır. Bu uçakların 23 adedi kargo amaçlı taşımacılık için kullanılmaktadır (http-1; http-3).
- Son dönemlerde sivil havacılığın dünyadaki büyüme oranı %5 iken bu oran Türkiye'de %30 olmuştur (http-2; http-3; http-4).
- 2002 yılına göre 2006 yılında taşınan yolcu sayısında, iç hatlarda %239'luk, dış hatlarda ise %31'lik bir artış kaydedilmiştir (http-3; http-4).

- 2002’de uçuş ve yolcu trafiği bakımından aktif olan yurt içi hava alanı sayısı 8 iken, bu sayı 2006’da 38’e yükselmiştir. Aynı süreçte yurt dışındaki hava alanlarına yapılan uçuşlarda ise 78’den 103’e bir artış meydana gelmiştir (http-2; http-3).
- 2002 yılında iç hatlarda taşınan yolcu sayısı 8 milyon 500 bin düzeyindeyken, bu sayı 2006 yılında 28 milyon 799 bine ulaşmıştır. Dış hat yolcu sayısı ise 25 milyon 54 binden, 32 milyon 884 bine çıkmıştır (http-4; http-3).
- 2002 yılında iç hatlarda 157 bin 415 olan uçak trafiği, 2006 yılında 343 bin 956’ya çıkmıştır. Anılan yıllar arasında dış hatlarda 218 bin 626 olan dış hat uçak trafiği de 286 bin 713’e ulaşmıştır (http-4).
- Türk havayolu işletmelerinin yurtdışına yolcu taşıma payı 2002 yılında yüzde 18 düzeyinde bulunurken, bu oran 2005 yılı sonunda yüzde 56’ya yükselmiştir (http-4).

Türkiye için 2015 yılında öngörülen toplam trafik artışı 2006 yılında yakalanmış bulunmaktadır. Havacılık sektörünün canlanmasıyla birlikte daha önce kapatılan ya da uçuş olmayan Tokat, Uşak, Sivas, Siirt, Çanakkale, Kahramanmaraş, Adıyaman, Balıkesir Merkez hava alanları yeniden hizmete açılmıştır. Atatürk Havalimanı 3 milyar dolar, Esenboğa 250 milyon dolar, Antalya (bu ilde bulunan her iki terminal) 3.2 milyar dolar olmak üzere toplam 6.5 milyar dolara özel sektöre işletilmek üzere devredilmiştir (http-4).

Boeing’in Türkiye pazarına bakış raporunda, Türk Sivil Havacılığı’nın gelecek 10 yıl içerisinde %4.5-5 oranında büyüyeceği, değeri 12 ile 16 milyar doları bulan 150 ile 190 yeni uçağa ihtiyaç duyacağı açıklanmıştır. Ayrıca, Türkiye’de 70 milyondan fazla nüfusun sadece %5’inin havayolunu kullandığı vurgulanmış ve bu rakamın önümüzdeki dönemde daha da büyüyeceği ifade edilmiştir (http-1; http-5).

1.2. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında, havayolu işletmesinin uçak bakım planlaması uçuş rota planlamasına entegre edilerek, işletmelerin direkt işletme maliyetlerinin %18-

23 oranını (Radnoti 2002) oluşturan bakım maliyetlerini enküçükleyen bütünleşik uçak bakım ve rota planlamasına yönelik matematiksel modeller önerilmiştir. Büyük ölçekteki problemlerin çözümünde neler yapılacağından çok, pratikte havayolu sektöründe karar vericinin farklı amaçların üstesinden başarılı bir şekilde nasıl gelebileceği ile uygulamaya yönelik özellikler üzerinde durulmuş ve farklı amaçların üstesinden gelebilecek çok amaçlı modeller hazırlanmıştır. Matematiksel modeller, uçakların uçuş sayılarını, uçuş sürelerini veya sırasıyla uçuş sayı ve uçuş sürelerini ya da uçuş süre ve uçuş sayılarını dengeleyen çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlama modelleri olarak geliştirilmiştir.

Havayolu sektöründe, uçak satın alma ve işletme maliyetlerinin çok yüksek olması nedeniyle, işletmeler mevcut rekabetçi ortamda maliyetlerini düşürmeye çalışmaktadır. Uçak satın alım maliyeti düşürülemeyeceğinden, daha çok uçak işletme maliyetlerine odaklanılmaktadır. Havayolu işletmelerinin, yakıt maliyeti ve hava alanı meydan kiralari gibi işletme maliyetlerini doğrudan kontrol etmesi mümkün değildir. İşletme maliyetleri arasında kontrol edilebilen tek maliyet, uçak bakım maliyetleridir. Bir uçağın kullanım süresi içindeki bakım maliyeti, ilk alış maliyetinin 1.5-2 katı arasında değişmektedir (Gerede 1998). Örneğin Airbus A380'nin satış fiyatının 280 milyon dolar ([http-7](http://7)) olduğu düşünüldüğünde, 25 yıllık kullanım ömrü olan uçağın bakım maliyetini ilk alış fiyatının 1.5 katı civarında tutabilen şirket, uçağın kullanım ömrü içerisinde 140 milyon dolarlık bir tasarruf sağlayabilir. Bunun yıllık bazda doğrusal dağıldığı kabul edilirse işletme, yıllık 5.6 milyon dolar tasarruf sağlamış olacaktır.

Havayolu işletmeleri bakım programlarını, uçak üreticilerinin bakım planlama dökümanları (MPD: Maintenance Planning Document), uçak bakım el kitapları (AMM: Aircraft Maintenance Manuel), parça bakım manüelleri (CMM: Component Maintenance Manual), servis bültenleri (SBs: Servis Bulletins) ve servis notları (SLs: Service Letters) gibi üreticilerin dökümanlarını referans olarak hazırlamaktadır (Kinnison 2004). Hazırlanan programlar, ülkelerin sivil havacılık otoriteleri tarafından yeterli görülürse uygulanabilmektedir. Kullanılmakta olan bazı uçakların bakım periyotları, A, B, C ve D gibi harf kodlu kontrol periyotlarına göre uygulanmaktadır. Uçak üzerindeki parça ve komponentler, bakım periyotları dikkate alınarak harf kodlu kontrol paketlerine atanır ve bu

şekilde gerekli bakımların yapılması sağlanır. Bununla birlikte, günümüzde B737-600/700/800/900 gibi en son üretilen yeni nesil uçaklar için harf kodlu bakım uygulamaları artık üretici firma tarafından bakım planlama dökümanlarında referans olarak önerilmemektedir (Boeing 2005). Üretici firmalar bakım aralıklarını, uçak uçuş saati, uçak iniş sayısı (çevrim sayısı), yıl-ömür limiti gibi ölçütler referans olarak kullanıcılara vermektedir. Havayolu işletmeleri, bakım paketlerinin çoğunu oluşturan parça ve komponentlerin bakım aralıklarını uçuş saati üzerinden dikkate alarak daha uygun bir periyot içerisinde, yönetmeliklere uygun bir şekilde uçak bakımlarını gerçekleştirebilir. Sonuç olarak bakım uygulamaları, uçakların günlük ortalama uçuş süreleri dikkate alınarak gün sayısı üzerinden planlanan bakım yaklaşımlarının yerine, uçakların gerçek zamanlı uçuş saatleri dikkate alınarak yapılabilir. Böylece uçaklara kullanım oranlarına bağlı olarak limit değerlerinde veya buna çok yakın değerlerde bakım uygulanarak, uçakların yıl içerisinde daha az bakıma girmeleri sağlanabilir. Örneğin A310'un A bakım aralığı 400 uçuş saattir. Bir A310 uçağına ortalama 360 uçuş saati yerine limit değeri olan 400 uçuş saatinde bir bakım uygulanarak, on birinci bakım maliyeti önlenebilir. Ayrıca uçuş süresi dikkate alınarak kullanılan modeller, bakım sürecine denk gelecek süreçte uçağın uçuşta veya uçuşa hazır durumda olmasını ve bakım alanı ile teknik iş gücünün en iyi şekilde kullanılmasını sağlayarak havayolu işletmesine katkı sağlayacaktır.

Bu tez kapsamında önerilen matematiksel modellerin yapılan çalışmalardan farklı olduğu noktalar aşağıdaki gibidir:

- Uçak ortalama ve bakım planlama problemlerini ayrı ayrı ele alan çalışmalardan farklı olarak iki problem bütünleşik olarak çözülmüştür. Uçakların kullanılabilir yasal uçuş süreleri enküçüklenerek bakım kısıtlarını sağlanacak şekilde uçaklar için uygun rota planları oluşturulmuş ve bakım maliyetlerinin enküçüklenmesi sağlanmıştır.
- Kesintisiz uçuş olarak adlandırılan iki nokta arasındaki uçuşun merkezi bir hava alanına bağlantılı olarak gerçekleştirilmesini sağlayacak şekilde bütünleşik uçak bakım ve rota planları oluşturulmuştur.

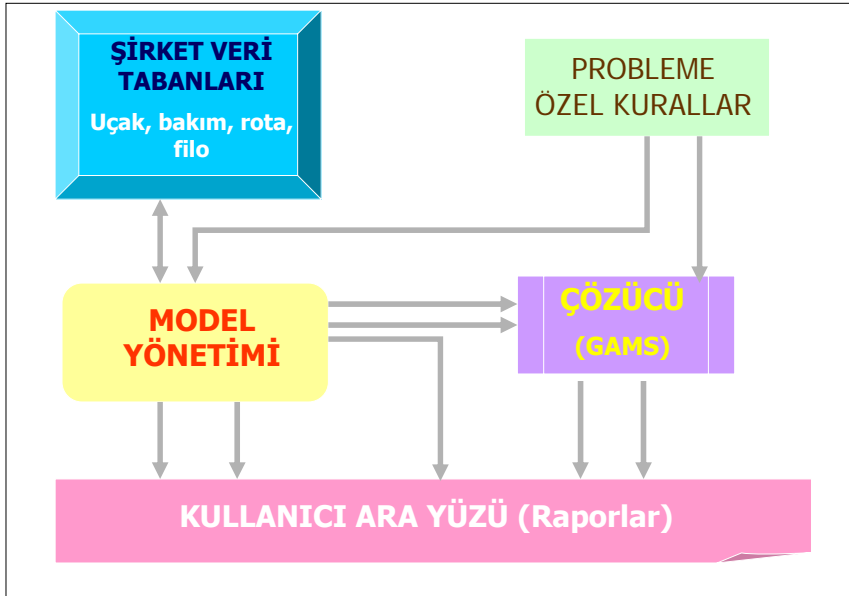
- Uçakların uçuş sayılarını, uçuş sürelerini, sırasıyla uçuş sayı ve uçuş sürelerini ya da uçuş süre ve uçuş sayılarını dengeleyen çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlama modelleri, önceden belirlenmiş kesintisiz uçuşların gerçekleşmesini sağlayacak şekilde oluşturulmuştur.
- Bakım periyotları, üretici firmalar tarafından gün sayısı olarak verilen uçakların bakımları uçuş süresi dikkate alınarak önerilen modellere entegre edilmiş ve uçakların gerekli bakımları için gün sonunda uygun hava alanlarında olmaları sağlanmıştır. Böylece, uçuş süresi ve gün sayısı yaklaşımı bir arada kullanılmıştır.

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 hava alanlarına gün içinde son uçuşları gerçekleştirilmesi sağlanarak, rotalara atama yapılmıştır. Her uçak, belirli bir gün sayısı sonunda uygulanması gereken bakımlar için uygun hava alanlarına atanması gerekmiştir. Günlük uçuş rota atama planları önceden oluşturulduğu için bazı durumlarda uçakların uçuş tarifesinde zorunlu olarak değişiklik yapılmıştır. Uçuş tarifesindeki değişiklik, gelir kaybına veya işletme maliyetlerinde artışa ve bakım koşullarını sağlayan en iyi 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 yasal kalan uçuş süreleri enküçüklenerek günlük olarak bütünleşik bir şekilde çözülmüş ve çok amaçlı modeller ortaya çıkarılmıştır.

Uçaklara, çeşitli periyotlarda uygulanan ve içerikleri birbirinden farklı olan harf kodlu bakım yaklaşımları uygulanmaktadır. Örneğin, A310'a her 400 uçuş saatinde bir uygulanan A kontrol paketinin içeriği, her periyotta uygulanan temel kontroller dikkate alınmazsa genellikle birbirinden farklılık gösterir. Bununla birlikte, kontroller sırasında fark edilen arızalar, uçağın yerde kalacağı süre dikkate alınarak bakım paketine eklenir. Eğer ortaya çıkan yeni bakım

ihtiyacı uçağın yerde kalacağı süre içerisinde tamamlanamayacaksa ve arıza minimum ekipman listesindeki (MEL: Minimum Equipment List) yönetmelik limitlerine uygunsuzsa bir sonraki bakıma ertelenir. MEL, bakımın güvenlik nedeniyle yapılmasını zorunlu tutuyorsa, uçak istisnasız gerekli bakım yapıncaya kadar yerde tutulur. Bu süreçte, uçaklara günlük olarak uygulanan bakım maliyetlerini tanımlamak ve hesaplamak oldukça zordur. Bu nedenle bu çalışmada, bakım maliyetlerinin hesaplanması yerine uçakların bakım periyotları arasındaki yasal olarak kullanılmamış uçuş saatleri enküçüklenerek, belirli bir periyot içerisindeki uçuş saatine başına düşen bakım maliyetleri enküçüklenmiştir.

Bir karar destek sistemi, kullanıcı ara yüzü, model yönetimi, eniyileme çözücüsü ve arka planda veri tabanlarından oluşur. Şekil 1.1’de havayolu işletmelerinde kullanılabilecek örnek bir karar destek sisteminin akış şeması gösterilmiştir. Veri tabanı, uçakların bakım zamanlaması, filo, rota, uçuş tarifesi, teknik personel, mürettebat gibi bilgileri içerir. Model yönetimi, veri tabanından belirli bilgileri alarak karar vericinin tercihinin göre bir modeli çalıştırır ve model sonuçlarını kullanıcı ara yüzü ile karar vericiye sunar. Karar verici, GAMS gibi çözücülerden aldığı sonuçları değerlendirir ve sonuçlardan memnun oluncaya kadar farklı modelleri çalıştırır. Sonuçların uygun olduğuna karar verdiğinde, karar destek sisteminden ayrıntılı bir rapor olarak modelin çözümlerini uygular.



Şekil 1.1. Havayolu işletmelerinde kullanılabilecek örnek bir karar destek sisteminin akış şeması

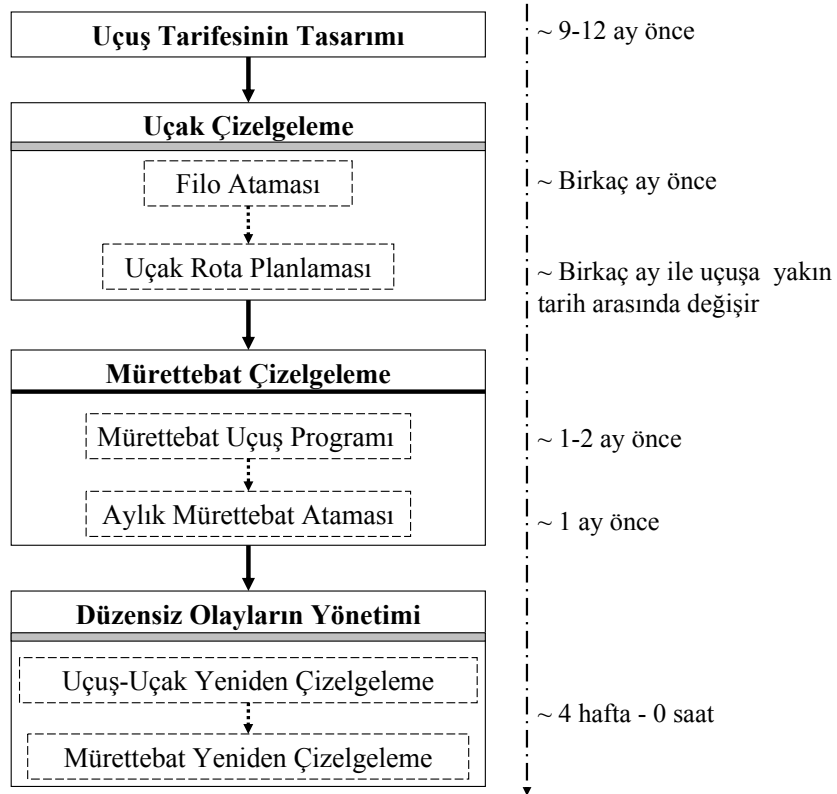
Bu çalışmada model yönetimi aşamasında karar vericinin kullanabileceği karar modelleri tasarlanmıştır. Model yönetiminin, kullanıcı ara yüzü ve veritabanı ile etkileşimi kullanıcılara bırakılmıştır.

Bu bölümde, genel olarak yöneylem araştırmasının havacılık sektörüne katkısı, Türk Sivil Havacılığı son beş yıldaki gelişimi ve tezin amacı hakkında bilgi verilmiştir. Tez, altı bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde, havayolu endüstrisindeki planlama ve çizelgeleme problemleri ayrıntılı bir şekilde incelenerek, uçak rotalama probleminin diğer süreçlerle olan ilişkisi ve havacılıkta bakımın önemi ortaya konulmuştur. nc bölümde, literatür araştırması yapılmış, literatürde kullanılan ve önerilen modeller için çözüm yaklaşımları hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde önerilen matematiksel modellerdeki amaç fonksiyonları ve kısıtlar ayrıntılı bir şekilde, avantajları ve tercih nedenleriyle açıklanmıştır. Beşinci bölümde, havayolu işletmelerinin verilerinden yararlanılarak oluşturulan problemler çözülmüş ve yorumlanmıştır. Altıncı ve son bölümde ise bu çalışmayla ilgili genel bir değerlendirme yapılmış ve öneriler verilmiştir.

2. HAVAYOLU ENDÜSTRİSİNDE ÇİZELGELEME ve PLANLAMA PROBLEMLERİ

Bir havayolu işletmesinde çözülmesi gereken dört temel çizelgeleme ve planlama problemi bulunmaktadır. Havayolu endüstrisindeki çizelgeleme ve planlama problemlerinin süreci ve bir biriyle olan etkileşimi Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Bu problemlerden birincisi, hangi uçuş noktalarına hangi sıklıkla uçuş hizmeti verileceği ve bu sıklığı karşılamak için uçuşların nasıl planlanması gerektiğini tanımlayan uçuş tarifesinin tasarımıdır.

İkinci problem, uçak çizelgeleme problemidir. Bu problem, bir dizi karar sürecinden oluşur. İlk olarak, filoların uçuş rotalarına atanması gerçekleştirilir. Daha sonra, her uçak için uçağın bakım kısıtları dikkate alınarak uçuş rota planları oluşturulur.



Şekil 2.1. Havayolu işletmelerinde çizelgeleme ve planlama süreci

Üçüncü problem, her uçuş için pilot ve uçuş görevlisi olarak adlandırılan mürettebat üyelerinin belirlenmesini içeren mürettebat çizelgeleme problemidir.

Günlük operasyonlarda uzun dönemli oluşturulmuş uçak çizelgeleme ve mürettebat planları, uçak mekanik arızası ve kötü hava koşulları veya mürettebat eksikliği gibi hiç biri önceden planlanamayan bozucu olaylar nedeniyle programlandığı gibi gerçekleştirilemeyebilir. Bu durum, havayolu sektöründe düzensiz operasyon problemi olarak adlandırılır. Bu aşamada, uçakların yeniden rotalanması ve mürettebatın yeniden çizelgelemesi yapılır.

2.1. Uçuş Tarifesinin Tasarımı

Uçuş tarifesinin tasarımı, havayolu işletmesinin planlama ve operasyonlarının başlangıç noktasıdır. Uçuş tarifesinin tasarım çalışmaları, uçuş operasyonlarından 12 ay önce başlar ve 9 ay önce tamamlanır. Uçuş tarifesi, her uçuş bacağına ayrılış-varış zamanını, uçuş noktalarını ve uçuşların haftanın hangi gün gerçekleştiğini, uçuş numarasını ve uçuşta kullanılacak filo tipini gösterir. Program, genellikle üç aylık veya altı aylık periyotlar için hazırlanır. Programlarda aydan aya küçük değişiklikler olabilir. Çizelge 2.1’de bir havayolunun örnek uçuş tarifesi gösterilmiştir. Çizelgedeki 301 numaralı uçuşu gerçekleştirecek uçak, 08:30’da İstanbul Atatürk Hava Alanı’ndan uçuşa başlayacak ve 10:15’de Trabzon Hava Alanı’nda uçuşunu tamamlayacaktır. 301 numaralı uçuş, Perşembe hariç haftanın her günü gerçekleştirileceği günler bölümünde gösterilmektedir (Yu ve Thengvall 2002; Gopalan ve Talluri 1998; Klabjan 2005).

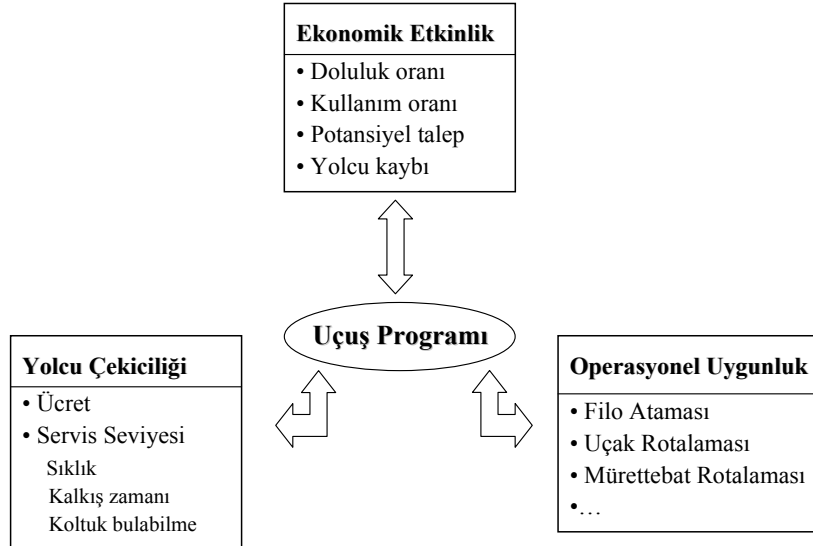
Çizelge 2.1. Örnek bir uçuş tarifesi (IST=İstanbul Atatürk Hava Alanı, TZX = Trabzon Hava Alanı, ESB = Ankara Esenboğa Hava Alanı) (Gopalan ve Talluri 1998)

Uçuş Numarası	Kalkış Yeri	Varış Yeri	Kalkış Zamanı	Varış Zamanı	Günler	Filo Tipi
301	IST	TZX	08:30	10:15	123.567	B737
102	ESB	TZX	09:00	10:30	12..56.	B737
...

Uçuş tarifesi, aynı zamanda havayolu işletmesinin rekabet edilen uçuş noktaları arasında rekabet gücünü ve konumunu tanımlar. Bu yüzden, havayolu işletmesinin karlılığında anahtar bir belirleyicidir. Uçuş tarifesi, temel olarak havayolunun ve rakip havayollarının uçak ve mürettebat planlama kararlarından etkilenir ve alınmış kararları etkiler. Uçuş tarifesi tasarım çalışmalarında;

sektördeki çeşitli talepler, rakip firmalar tarafından sunulan program ve kaynak kullanılabilirlik kısıtları, pazar tahminleri gibi faktörler dikkate alınır. Havayolu çizelgelemede kısıtlı olan kaynaklar uçak, mürettebat, bakım tesisi, bakım personeli vb.'dir. Bununla birlikte, uçuş tarifesinin tasarımı için uçuş hatlarındaki yolcu talebinin doğru tahmini, havayolu filosunun kapasitesi, uçağın kapasitesi nedeniyle reddedilen (elde edilemeyen) gelir olan bozulma (spill) maliyeti ve reddedilen yolcuların yeniden geri kazanım oranlarının bilinmesi gereklidir. Bu yüzden uçuş tarifesinin tasarımı, havayolu işletmesinin karlılığını ve işletmenin devamlılığını sağlayabilmesini önemli oranda etkilediği için kritik bir süreçtir (Chang 2001; Barnhart 2003a; Liu 2003; Qi ve ark. 2004; Sriram ve Haghani 2003; Gopalan ve Talluri 1998; Clarke ve ark. 1996).

Uçuş tarifesi, yolcuların bir havayolunu tercih etmesinde öncelikli bir faktördür. Uçuş tarifesinin tasarımı, uçuşların yolcular tarafından tercih edilmesinin sağlanabilmesi, uçuşun ekonomik etkinliği ve operasyonel fizibilitesi gibi birbirleriyle çelişen amaçların dengelenmesi gerekli olduğu için karmaşık bir süreçtir. Şekil 2.2'de havayolunun program geliştirme sürecinde dengelenmesi gerekli olan fakat birbirleriyle çelişen amaçlar gösterilmektedir. Her amaç, karşılıklı olarak birbirleriyle çelişen alt parçalardan oluşmaktadır (Chang 2001).



Şekil 2.2. Uçuş tarifesinde birbirleriyle çelişen amaçlar (Chang 2001)

2.1.1. Uçuş tarifesi açısından serim yapısı

Havayolu işletmelerinin kullandıkları uçuş serim (networks) tipinin havayolu planlama ve çizelgeleme problemlerinin üzerinde etkisi vardır. Uçuş serimi, bir havayolu işletmesinin uçuş tarifesindeki uçuşlar vasıtasıyla oluşturulmuş coğrafi serim için resmi olmayan bir isimdir. Uçuş tarifesi açısından üç tip havayolu uçuş serimi bulunmaktadır. Bunlar, doğrusal uçuş serimi, noktadan-noktaya uçuş serim ve topla-dağıt uçuş serimi olarak sınıflandırılırlar (Grönkvist 2005). Bu serim tipleri ile ilgili bilgiler aşağıda verilmiştir:

- Doğrusal serimde, bütün hava alanları tek bir tur ile bir birine bağlanır.
- Noktadan-noktaya uçuş seriminde, herhangi bir hava alanından diğer herhangi bir hava alanına tek bir uçuşla uçmak mümkündür. Noktadan noktaya uçuş serim yapısına örnek olarak uzun mesafeli uluslararası uçuşlar verilebilir (Grönkvist 2005; Barnhart 2003a).
- Topla-dağıt uçuş serim yapısında, merkezi bir hava alanını ikincil hava alanı grupları çevreler. Topla-dağıt seriminde, bütün uçuşlar merkezi bir hava alanından ve merkezi hava alanına bağlantılı olarak gerçekleştirilir. Farklı noktalardaki ikincil hava alanları arasında uçuş gerçekleştirmek için öncelikli olarak merkezi bir hava alanına uçulması gerekir. Daha sonra, merkezi hava alanında havayolu işletmesinin uçak çizelgelemesine bağlı olarak ya uçak değiştirilerek farklı bir uçakla ya da aynı uçakla ikincil hava alanına uçuş gerçekleştirilerek tamamlanır (Grönkvist 2005; Lee 1999).

Gerçekte bir havayolu işletmesinin uçuş serimlerinden yalnızca bir tanesinin kullandığı durum çok nadirdir. Bazı havayolları, ana bakım tesislerine ve mürettebat merkezlerine ev sahipliği yapan birkaç çeşit merkezi hava alanına sahiptir. Çoğu topla-dağıt uçuş seriminde birden fazla merkezi hava alanı bulunmaktadır. Ayrıca, ikincil hava alanları arasında direkt uçuşlar da yapılmaktadır.

Havayolu işletmeleri, uçuş operasyonlarını merkezi bir hava alanından gerçekleştirerek işletme maliyetlerinde tasarruf sağladığı için topla-dağıt uçuş

serimini kullanmaya başlamıştır. ABD’de uçuşların hemen hemen %95’i merkezi bir hava alanında başlar veya biter (Grandeau 1995). Günümüzde, sırf noktadan noktaya uçuş serim yapısı yalnızca düşük maliyetli havayolu işletmeleri tarafından kullanılmaktadır. Düşük maliyetli havayolu işletmeleri, noktadan noktaya uçuş serimini çoğunlukla uçuş trafiğinin yoğun ve alan kullanım maliyetlerinin pahalı olduğu büyük hava alanlarından uzak durmak için fırsat olarak görmektedir (Grönkvist 2005). Bu havayolu işletmeleri, yerel operasyonel problemler nedeniyle ortaya çıkacak büyük aksamaların oluşturacağı ekstra risklerin sonuçlarına katlanmayı göze almıştır. Çok yaygın olarak kullanılmayan doğrusal serim, zaman zaman örneğin özel olarak kiralanmış ucuz tarifeli havayolu işletmelerinde rastlanabilir.

Havayolu sektöründe topla-dağıt uçuş serimi ile ilgili çok fazla çalışma bulunmaktadır. Çalışmaların çoğu, topla-dağıt uçuş seriminin olası dezavantajlarını ortaya koymuştur. Operasyonel açıdan topla-dağıt uçuş serimi, ayrılış ve varışın en yoğun olduğu zaman aralıklarında, merkezi hava alanlarında ve uçuş rotalarında tıkanıklıkların oluşmasına neden olur. Bu durum, çok kısa zaman periyodunda büyük hacimli trafiğin üstesinden gelinebilmesi için ilave tesislerin gerekliliğini ortaya koymuştur. Ayrıca yolcu açısından, bazı uçuş noktaları arasındaki uçuş sürelerinin artmasına neden olmuştur. Çünkü ikincil hava alanları arasında uçuş gerçekleştiren yolcuların, öncelikli olarak merkezi bir hava alanına uçması ve burada uçak değiştirerek yolculuklarına devam etmesi gerekmiştir. Yolcu açısından topla-dağıt uçuş seriminin temel dezavantajı, ardışık olarak gerçekleştirilecek varış ve kalkış uçuşları arasındaki kısa bir zaman aralığı içinde, merkezi hava alanında uçak değişikliğindeki negatif bir durumun oluşma ihtimalidir. Buna karşın topla-dağıt uçuş seriminin en önemli avantajları; sistem yapısının uçuş tarifesi oluşturma maliyetlerini azaltmış ve basitleştirmiş olması, uçakların kontrolünün ve sınıflandırılmasının tek bir merkezden gerçekleştirilmesine ve uçuşların birleştirilmesiyle ekonomik ölçekteki işletmelerin avantaj sağlamasına imkan vermesi şeklinde ifade edilebilir. Merkezi hava alanlarındaki uçuş trafiğinin %50 ile %70 arasında olması durumunda, bu havaalanlarında gerçekleştirilen bağlantılardan maksimum verim elde edildiği görülmüştür (Clark 2001; Liu 2003; Grönkvist 2005; Lee 1999).

Topla-dağıt uçuş serimi, herhangi bir uçuş seçeneğinin kullanılarak uçuş noktaları arasında daha yüksek oranda bir bağlantı imkanı sağladığından, havayolunun yolcu başına işletme maliyetlerini hemen hemen %10 civarında azaltmıştır (Scwieterman ve Spencer 1986). Merkezi hava alanları arasında daha büyük yolcu uçaklarının kullanılması mil başına koltuk işletme maliyetlerini azaltmıştır. Ayrıca topla-dağıt uçuş serim yapısında, pilot ve uçuş mürettebat planlanması daha verimli bir şekilde yapılmıştır. Topla-dağıt uçuş serim yapısının bir diğer avantajı, noktadan noktaya uçuş serimine göre gereken uçak sayısını azaltmış olmasıdır (Liu 2003; Lee1999; Weidner 1996; Scwieterman ve Spencer 1986; Bazargan 2004).

Şekil 2.3'te Ankara ve İstanbul'u merkezi hava alanı olarak kullanan THY'nin iç hat uçuş tarifesi, topla-dağıt uçuş seriminde gösterilmektedir.



Şekil 2.3. THY'nin iç hat uçuş tarifesinin topla-dağıt uçuş seriminde gösterilmesi (Dursun 2007)

2.1.2. Matematiksel model açısından serim yapısı

Filo atama ve uçak bakım rotalama problemleri, havayolu işletmesinin uçuş tarifesi temel alınarak karma tamsayı programı olarak formüle edilir. Uçuş serim yapısının matematiksel modeli oluşturulurken iki temel yaklaşımdan biri kullanılır. Bunlar, uçuş bacalarını temsil eden arkların kullanıldığı zaman-hattı serimi ve uçuş bağlantıları temsil eden arkların kullanıldığı bağlantı serimidir. Her iki yaklaşım da modelin temel kısıtlarını sağlar. Bunlar, her uçuş bacağının bir

uçak tarafından gerçekleştirilmesini sağlayan uçuş kısıtı, uçakların serim yapısında akış sürekliğini sağlayan akış denge kısıtı ve uçakların kullanılmasını kısıtlayan uçak sayı kısıtıdır. Bununla birlikte, bu iki serimde arklar farklı yorumlandığı için matematiksel modellerin formülasyonundaki kısıtlar bir parça farklıdır (Sherali ve ark. 2006).

Minimum dönüş zamanı, matematiksel model oluşturulurken zaman hattı ve bağlantı seriminden farklı bir şekilde dikkate alınır. Minimum dönüş zamanı, uçağın iniş zamanı ve sonraki kalkış zamanı arasındaki uçağın yerdeki bazı süreçleri için gerekli minimum zamandır. Bu süre, uçağın etrafında teknik bir görsel kontrol için gerekli zamanı, bir sonraki yolculuk için uçağın temizlenmesini, yakıt ikmalini, yolcuların inmesini, bağajların boşaltılmasını, mürettebat değişimini ve pistte uçağın hareket ettiği zaman gibi süreçleri içerir. Uçuş trafiğinin yoğun olduğu hava alanlarında, uçuş aktiviteleri arasında uyum araştırılırken minimum dönüş zamanı dikkate alınır. Bu süre, genellikle uluslararası uçuşlarda iç hat uçuşlarından daha fazla zaman alır. Minimum dönüş zamanı, uçak tipi ve hava alanına bağlıdır ve tipik olarak iç hat uçuşu için 30 - 45 dakika, uluslararası uçuşlarda 45-60 dakika arasında değişir (Grönkvist 2005; Sherali ve ark. 2006).

2.1.2.1. Zaman-hattı serim yapısı

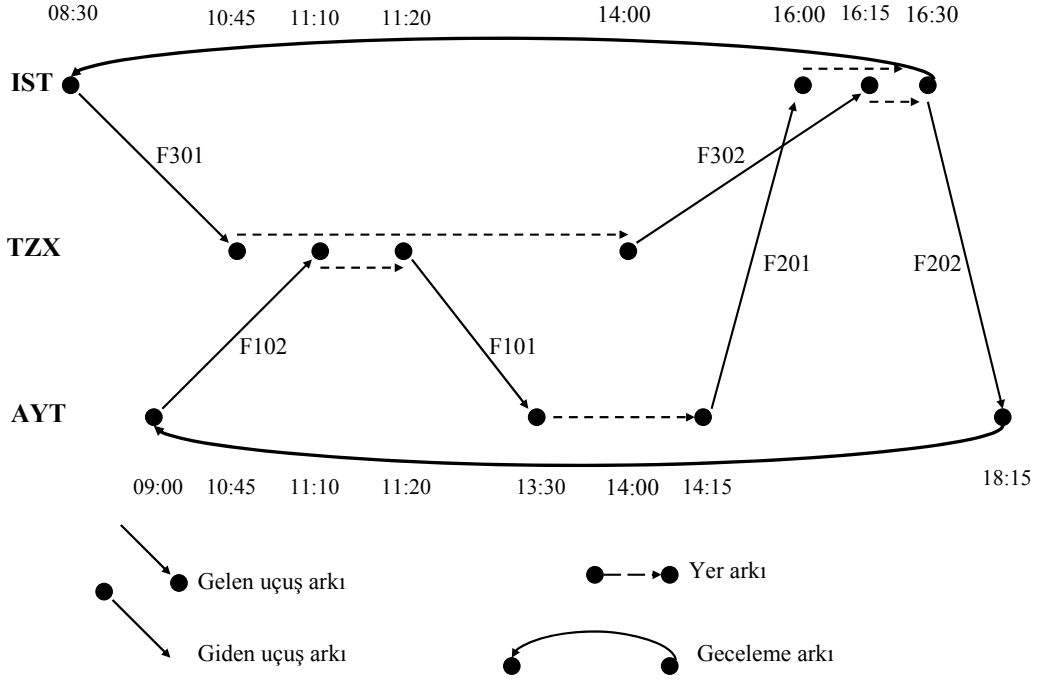
Zaman hattı seriminde düğümler, şehirleri ve düğümler arasındaki arklarda, şehirleri birbirine bağlayan uçuş bacaklarını temsil eden uçuş-bacak serimini gösterir. Zaman-hattı seriminde, uygun uçak bağlantılarını mümkün kılabilmek için varış düğümü, uçağın bir sonraki uçuş için hazır olduğu zaman noktasına yerleştirilir. Uçağın uçuşa hazır zamanı, uçağın varış zamanı ile minimum dönüş zamanının toplamı olup uçağın kalkışa hazır olduğu zamandır. Zaman hattı seriminde, her uçak için üç tip ark vardır. Bunlar, zamanın belirli periyodu için aynı istasyonda bekleyen uçakları temsil eden yer arkları; uçuş bacaklarını temsil eden uçuş arkları ve günlük uçuş tarifesinin aynı olması nedeniyle izleyen günün birinci olayı ile günün son olayını bağlayan geceleme arkları olarak sayılabilir. Geceleme arkı günlük uçuş tarifelerinde uçak atamasının

sürekliğini sağlar. Zaman hattı seriminde bir eksen zamanı, diğeri uzay veya istasyonların konumlarını gösterir. Serimdeki düğümler, zamanın belirli bir sürecinde istasyona gelen veya giden uçuş aktivitesini ifade eder. Serim, zaman eksenli olduğu için düğümler aktivitelerin gerçekleştiği zamana göre oluşturulur. Bir düğüme yönelmiş ark, programlı bir uçuş için özel bir zaman sürecinde uçağın gelişini ifade eder. Belli bir uçuşu temsil eden düğümden çıkan ark, düğümdaki kullanılabilir bir uçağın uçuş yaptığını gösterir (Argüello1997; Argüello ve ark.1998; Sherali ve ark. 2006).

Zaman hattı seriminin boyutu, bağlantı serimine göre daha az yer tutar. Çünkü uçuş bacak sayısı, olası bağlantı sayısından azdır. Zaman hattı seriminde, gelen ve giden uçuşları gösteren düğümler belirli bir zaman aralığında birbirini takip ederse, düğümler serim yapısını küçültmek için bir arada toplanabilir. Buna karşın, zaman hattı seriminde geliş ve gidiş aktiviteleri bir araya toplandığında iç hat uçuşları ile iç ve dış hatlar arasındaki minimum dönüş zamanı doğru bir şekilde modellenemeyebilir. Belirli zaman dilimlerinde bir araya toplanan uçuş aktivitelerinin oluşturduğu düğümlerde, yerde bekleyen uçak olmadığında zaman-uzay seriminde adacıklar oluşturulur. Bu adacıklarda bulunan uçakların birbirinden ayrımı yapılamamaktadır. Şekil 2.4'te, Çizelge 2.2'deki verilerden yararlanılarak oluşturulan zaman hattı serimi gösterilmektedir. Minimum dönüş zamanı 30 dakika olarak kabul edilmiştir (Hane ve ark.1995; Sherali ve ark. 2006; Grönkvist 2005).

Çizelge 2.2. Örnek uçuş tarifesi (IST=İstanbul Atatürk Hava Alanı, TZX = Trabzon Hava Alanı, ESB = Ankara Esenboğa Hava Alanı)

Uçuş Numarası	Kalkış	Variş	Kalkış Saati	Variş Saati	Uçuş Süresi
F301	IST	TZX	08:30	10:15	105'
F102	AYT	TZX	09:00	10:40	100'
F101	TZX	AYT	11:20	13:00	100'
F302	TZX	IST	14:00	15:45	105'
F201	AYT	IST	14:15	15:30	75'
F202	IST	AYT	16:30	17:45	75'

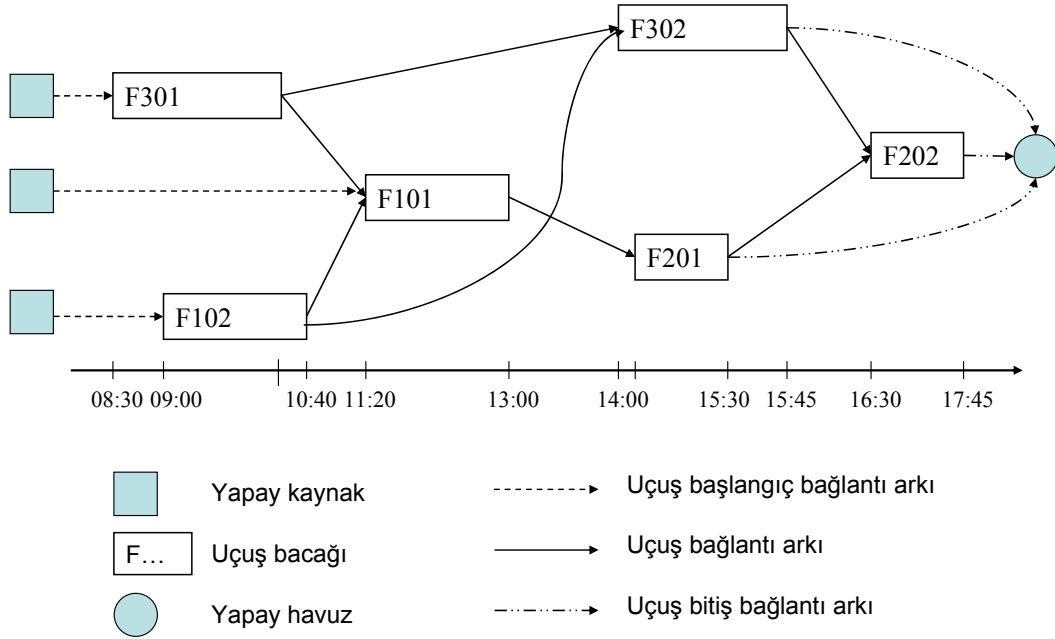


Şekil 2.4. Zaman hattı serim yapısı

2.1.2.2. Bağlantı serim yapısı

Bağlantı tabanlı serim yapısı kullanılan modelde, düğümler uçuş bacaklarını, arklar ise uçuş bacakları arasındaki uygun bağlantıları göstermektedir. Günün bittiğini ve başladığını dikkate almak için hayali olarak yapay havuz ve yapay kaynak düğümleri oluşturulur. Bağlantıların uygun olabilmesi için “i” düğümünün uçuş varış noktasının, “j” düğümünün uçuşa başlangıç noktası olması ve “i” düğümünü varış zamanı ile minimum dönüş zamanı toplamının, “j” düğümünün uçuşa başlangıç zamanından küçük olması gerekir. Bağlantı tabanlı serim yapısında, farklı bağlantıları temsil eden üç tip ark vardır. Bunlar, uygun uçuşları birbirine bağlayan uçuş bağlantı arkı, uçağın varış noktasını ve günün geri kalanını istasyonda geçirdiğini göstermek için varış düğümünü yapay havuz düğümüne bağlayan uçuş bitiş bağlantı arkı ve yapay kaynak düğümünü ayrılış düğümüne bağlayan, uçağın günün başlangıcında bulunduğu istasyonu gösteren uçuş başlangıç arkı şeklinde yazılabilirler. Şekil 2.5’de, Çizelge 2.2’deki

verilerden yararlanılarak oluşturulan bağlantı serim hattı gösterilmektedir (Sheralive ark.2006;.Abara 1989; Grönkvist 2005).



Şekil 2.5. Bağlantı serim yapısı

Zaman hattı seriminde, uygun uçuş bağlantıları araştırılırken yalnızca zaman uyumu aranırken, bağlantı seriminde hem zaman hem de hava alanı uyumu dikkate alınmaktadır. Bağlantı seriminde, maliyetlerin serimin arklarına dağıtılması mümkündür. Bu yüzden bağlantı hattı serimi, zaman hattı serimine göre daha fazla modelleme imkanı vermektedir. Sonuç olarak, bağlantı seriminin modelleme avantajı zaman hattı seriminin sayısal hesaplama avantajına göre daha etkindir (Barnhart ve ark. 1998; Grönkvist 2005).

2.2. Uçak Çizelgeleme

Havayolu işletmeleri, uçuş tarifesi tasarımını tamamladıktan sonra uçak çizelgeleme olarak adlandırılan filo atama ve uçak rotalama problemlerini çözer.

Filo atamasında, uçuş serimindeki bacaklara minimum maliyetle uçak tipleri yani filolar atanır. Uçak çizelgelemesinin son adımında belli bir filo içerisindeki her uçak, filo atama aşamasında filo için belirlenmiş uçuş rotalarına

atanır. Uçuş çizelgeleme çalışmaları, uçuş operasyonlarının birkaç ay öncesinde başlar ve uçuşun gerçekleştiği an son bulur.

2.2.1. Filo atama problemi

Filo atama probleminde uçakların özellikleri, kullanılabilirlikleri, operasyonel maliyetleri ve potansiyel gelirleri temel alınarak farklı kapasitedeki uçak tiplerinin uçuşlara atanması planlanır. Filo atama modelinde amaç, uçuş rotasındaki işletme maliyetleri ile bir uçuş bacağına atanan uçağın koltuk kapasitesinin talebi karşılayamadığı durumdaki gelir kayıplarının oluşturduğu maliyetlerin toplamını enküçükmektir. Uçuş işletme maliyeti, belirli bir uçak tipinin uçuş bacağındaki uçuş maliyetini temsil eder. Her uçak tipi için uçuş operasyon maliyeti her uçuş bacağına göre ayrı ayrı belirlenir (Liu 2003; Sherali ve ark. 2006; Rosenberger 2001; Barnhart ve ark. 2003a).

Bir havayolu işletmesinin temel ürünü, uçaktaki koltuklardır. Havayolu işletmesi için daha yüksek kapasiteli uçağa sahip olunması veya ekstra uçağın hazır olarak bulundurulması, daha yüksek işletme maliyetleri anlamına gelir. Diğer taraftan uçak koltukları bozulabilir bir üründür. Bir uçak hava alanından ayrılmadan önce satılmamış koltuklar çöpe giden ürün gibi kabul edilir. Bu yüzden ideal strateji, sadece yolculara doğru fiyattan doğru sayıda koltuk sağlamak olmalıdır (Sherali ve ark. 2006).

Bir uçuşa koltuk kapasitesi küçük bir uçağın atanması, yetersiz kapasite nedeniyle müşterilerin istenilmeden reddedilmesine ve sonuç olarak gelir kayıplarına neden olur. Buna karşın, yolcu talebinden daha büyük kapasitede bir uçağın uçuşa atanması durumunda koltukların hepsi kullanılmayacaktır. Ayrıca, kapasitesi doldurulamayan büyük uçak tercih edildiği için daha yüksek işletme maliyetleri oluşacaktır. Bu nedenle, filo atama problemi, havayolu işletmesinin tüm programlama sürecinin önemli bir parçasını oluşturur. Her gün çok sayıda uçuş programlandığından uçuş sayısı, büyük bir havayolu işletmesinde kolayca binlere ulaşabilir. Filo ataması, uçuş tarifesinin tasarımı, mürettebat programlaması, uçak rota ataması, bakım planlama ve gelir yönetimi gibi havayolu işletmesinin diğer karar süreçlerini etkiler ve bu süreçlerde alınan

kararlardan etkilenir. Bu yüzden, filo atama problemini çözebilmek, havayolu işletmeleri için her zaman zorlu bir süreç olmuştur. Uçakların kapasite sınırı nedeniyle yolcuların kabul edilememesi genellikle kayıp olarak kabul edilir. Gerçekte yolcular, uçuşa başlangıç-varış noktaları ve zaman periyodu açısından alternatif bir uçuş tarifesi kullanarak uçuşlarını gerçekleştirebilirler. Böylelikle, yolcular yeniden havayolu işletmesinin bir yolcusu olarak geri kazanılabilir (Liu2003; Sherali ve ark. 2006; Rosenberger 2001; Gopalan ve Talluri 1998).

Uluslararası ve iç hat uçuşu gerçekleştiren büyük havayolları genellikle birden fazla filoya sahiptirler. Filo, kapasitesi ve operasyonel özellikleri aynı olan uçak kümesine verilen isimdir. Bir havayolunun filo tipi genellikle Boeing 737, Boeing 757, Fokker 100, Airbus 320 vb. 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 mürettebat sayısı ve uçağın hava alanına inmesiyle birlikte bir sonraki uçuşa hazırlanabilmesi için yapılması gereken işlerin tamamlanabileceği minimum dönüş zamanı örnek olarak verilebilir. Ayrıca, operasyonel özellikler içerisinde uçuş bacağına atanan uçak tipine bağlı olarak değişen farklı uçuş maliyetleri ve uçak ağırlığına bağlı olarak hava alanına ödenen ücretler yer alır. Aynı filo tipindeki iki uçak farklı yolcu kapasitelerine sahip olabilir. Örneğin, Boeing 737-400 uçağı 150, Boeing 737-800 uçağı 165 yolcu kapasitesine sahiptir ([http-7](http://7)). Filo atama modelleri bakım gereksinimi, gürültü kısıtlamasını ve hava alanı kapı kullanılabilirliğini dikkate alan ilave kısıtları da içerebilir (Gopalan, ve Talluri 1998; Rosenberger 2001; Liu 2003).

Filo atama probleminde temel olarak kullanılan veriler; uçuş numaralarının kalkış-varış noktaları ve zamanları, filo tipleri, filo türüne göre uçuş bacağının uçuş maliyeti, uçağın varışından sonra uçağın bir sonraki uçuşunun hazırlığı için gerekli minimum zamanı tanımlayan her filo türü için her istasyondaki dönüş zamanından oluşur. Ayrıca, yolcu başına gelir, talebin fonksiyonu olarak doluluk oranları ve uçak kapasite bilgileri, uçuş gelirlerini hesaplamak için kullanılan diğer parametrelerdir (Barnhart ve ark. 1998; Smith 2004).

Filo atama problemi genel olarak üç temel kısıtı içerir. Bunlar, uçuş kapsam kısıtı, uçak sayı kısıtı ve uçuş denge kısıtıdır. Uçuş kapsam kısıtı, her uçuş bacağına tam olarak bir tane uçak tipinin atanmasını sağlar. Uçak sayı kısıtı, uçuş serimine yalnızca kullanılabilir uçakları atar. Uçuş denge kısıtı, bir istasyona gelen uçuş sayısı giden uçuş sayısına eşit olacak şekilde atanmasını sağlar. Bir “T” zaman ölçütünde her “T” değeri için uçuş düzeni tekrarlanır.

Etkileyici sonuçlara karşın, filo atamada çeşitli kritik zorluklar hala bulunmaktadır. Bu zorlukların çoğu modelleme kabullerinden kaynaklanmaktadır. Bunlar (Barnhart ve ark. 1998; Sherali 2006);

- Çoğu filo atama modelinde, havayollarının büyük bir kısmı hafta sonları farklı uçuş tarifesi gerçekleştirmesine rağmen, uçuş tarifelerinin günlük olarak tekrar ettiği kabul edilir.
- Çoğu filo atama modelinde, uçuş noktalarındaki taleplerin bilindiği ve haftanın her günü için aynı olduğu kabul edilir. Fakat tarihsel veriler, talebin gün ve gün değiştiğini göstermektedir. Haftanın farklı günlerinde talepler değiştiği için, haftanın her günü için farklı filo atamasının yapılmasıyla daha yüksek gelir elde edilebilir. Bununla birlikte, bu ekstra esneklik, filo atama aşamasında sayısal karmaşıklığı önemli oranda arttırır.
- Filo atama modelinde, taksi sürelerinin genel olarak kararlı olduğu kabul edilir. Bununla birlikte, uçuş rotaları ve hava alanlarındaki yoğunluk, hava durumu koşulları ve yeni güvenlik uygulamaları, uçuş ve taksi sürelerinde büyük değişikliklerin oluşmasına neden olur.
- Çoğu filo atama modelinde, uçuş tercihini değiştiren yolcu sayısı ve bunun oluşturduğu maliyetlerin uçuş bacak seviyesinde hesaplanabileceği kabul edilir. Gerçekte yolcu talebi, uçuş tercihini değiştiren yolcu sayısı ve her yolcudan elde edilebilecek gelir, yolcunun uçuş programına özeldir, uçuş bacağına özel değildir. Sonuç olarak, uçuş bacağına özel oluşan maliyetler, yalnızca yaklaşık olarak tespit edilebilir. Örneğin, bir yolcu Trabzon’dan Roma’ya İstanbul aktarmalı uçmayı planlıyor. Yolcu, Trabzon-İstanbul arasında yer bulamadığında farklı bir havayolu işletmesini seçebilir. Bu durumda

kaybolan gelir, daha yüksek fiyattan satılan İstanbul-Roma uçuş bedelidir.

Klasik filo atama modelinin diğer eksik yönü, kesintisiz uçuşu tercih eden yolculardan elde edilecek gelirin dikkate alınmamasıdır. Yolcunun, iki hava alanı arasındaki uçuşu, uçağın bir merkezi hava alanına uğraması ve bu kesintinin uçak değiştirmeden yapılması şeklinde olması durumunda kesintisiz/direk uçuş olarak adlandırılır. Direk uçuş, ekstra gelir sağlayabilir. Çünkü, yolcular hava alanlarında uçak değiştirmek yerine, ekstra ücret ödeyerek aynı uçakta kalmayı ve uçuşlarını tamamlamayı tercih edebilirler. Klasik filo atama modelinde, her uçak için uçuş ataması yapılmadığında uçak için gerçek bağlantılar belirlenmemektedir. Bu yüzden, direkt gelirler çoğunlukla göz ardı edilmektedir.

Bir bağlantının kesintisiz değeri, aynı zamanda ara uçuşta uçağın hava alanına inişi ve tekrar kalkışı arasında yerde geçirdiği zamana da bağlıdır. Havayolu işletmeleri genellikle uçak yerde bir buçuk saatten fazla zaman geçirdiğinde, kesintisiz uçuş değerini sıfır olarak atarlar. Çünkü, uzun bağlantı zamanları yolcular için çekici değildir (Barnhart ve ark. 1998; Clarke ve ark.1997).

Filo atama problemlerinde, uçaklar tek olarak değil aynı özellikteki uçakların oluşturduğu küme dikkate alınarak çözüldüğünden, her bir uçak için uygun rota programı oluşturulamamaktadır. Ayrıca bu tür filo atama çözümlerinde, bakım gereksinimi tam olarak modellenememektedir. Bunun yerine, minimum sayıda bakım fırsatı sağlayan toplam bakım kısıtı kullanılır. Eğer uçak bir bakım istasyonunda yeterli bir zaman aralığında durabiliyorsa, bakım fırsatına sahip olur. Fakat filo atamasında, bakım fırsatının her bir uçak arasında eşit bir şekilde dağıtılması garanti edilemez. Bir uçak gereğinden daha fazla bakım fırsatına sahip olurken, başka bir uçağın böyle bir şansı olmayabilir (Barnhart ve ark. 1998).

2.2.2. Uçak rotalama problemi

Filo atama probleminde, uçuş bacalarında hangi tip filonun uçağına karar verilir. Uçak rotalama probleminde ise, bir filo içindeki her bir uçağın ardışık olarak gerçekleştireceği uçuş bacaları tespit edilir. Aynı zamanda, ülkelerin ulusal sivil havacılık otoriteleri ve uçak üreticileri tarafından zorunlu

tutulan farklı seviyelerdeki bakımların her bir uçağa nerede ve ne zaman uygulanacağına da karar verilir. Bu yüzden uçak rotalama problemi, uçak bakım rotalama problemi olarak da adlandırılır. Uçak bakım rotalamada temel amaç, kısıtları göz önünde bulundurarak işletme maliyetlerini enküçüklemektir (Clarke ve ark.1997; Qi ve ark. 2004; Bazargan 2004; Sriram ve Haghani2003).

Uçak rotası, uçuş bacalarının oluşturduğu bir seridir. Seri içindeki bir uçuş bacağına varış noktası, bir sonraki uçuş bacağına başlangıç noktasıdır. Döngü, aynı merkezde başlayan ve son bulan uçuş rotalamasıdır. Her uçağın döngüsü, düzenli aralıklarla bakım istasyonunu ziyaret edecek şekilde tamamlanır. (Barnhart ve ark. 2003a).

Havacılık sektöründe rota planlamalarının oluşturulurken temel kısıt olarak karşılaşılan bakım ile ilgili olarak bilgi verilerek, bakımın havacılık güvenliği ve operasyonlar açısından önemi bir sonraki başlık altında açıklanmıştır.

2.2.2.1. Havacılıkta bakımın önemi ve amacı

Bir uçağın yapımından sonra kullanıcı tarafından hizmete alınmasından, hizmetten kaldırılmasına kadar imkanlar veya olanaklar çerçevesinde ilk günkü kadar yeni, iyi çalışır, temiz ve uçuşa elverişli bir durumda tutulabilmesi için yapılan tüm işlem ve faaliyetler uçak bakım-onarım olarak adlandırılmaktadır. Bu konuda yapılan işlemler zaman zaman birbirinden kesin sınırlarla ayrılmamakla birlikte temelde farklılıklar gösterir (Buğdaycı 2003).

Uçak bakımının kendine özgü, tüm dünyada kabul görmüş ve birbiriyle yakın ilişki içerisinde olan belirli amaçları bulunmaktadır. Bu amaçlar aşağıdaki gibidir (Gerede 1998):

- Uçuş faaliyetlerinde emniyetin sağlanması,
- Uçağın uçuşa hazır durumda bulundurulmasının sağlanması,
- Maliyetlerin, emniyet faktöründen ödün verilmeden azaltılması.

Havayolu işletmeleri, uçağın tüm kullanım ömrü boyunca dizaynı sırasında belirlenmiş ve onaylanmış performans değerlerini, motor ve güç sistemlerinin bütünlüğünü, parça ve sistemlerinin emniyet ve güvenilirliği gibi özelliklerini korumak zorundadır ve bunun sağlanması yasal bir zorunluluktur.

Emniyet faktörleri yeterince dikkate alınmadan yapılacak bakım, uçuş sırasında pilotun kontrol edemeyeceği ve sonucunda ölümlerin olabileceği kazalara neden olabilir. Meydana gelecek kaza, yolcu talebinin başka şirketlere kaymasına neden olacak ve işletmenin sektördeki pazar payının azalmasına yol açacaktır.

Bir havayolu işletmesinde en büyük maliyeti, işletmenin öz varlığı olan uçak oluşturur. Yolcu talebinin olduğu süreç içerisinde, teknik nedenler veya uçak bakım planlamasının uygun yapılmaması nedeniyle uçağın yerde kalması işletmeye oldukça maliyetli olmaktadır. Bu yüzden, bakımın gün içerisindeki zamanlaması ve uçuş tarifesi içerisindeki yeri en uygun zamana göre planlanması gerekir. Böylece, uçağı uçuşa hazır tutacak bakım belirlenen kurallar içerisinde yapılabilir.

Uçuşların gecikmesine ve/veya iptal edilmesine neden olan ve havayolu işletmelerinin kontrolü dışında olan faktörler meteorolojik şartlar, hava alanı kapasite sorunları, yer hizmetlerinden kaynaklanan sorunlar ve hava trafik faaliyetlerinden kaynaklanan sorunlar olarak sıralanabilir. İşletme tarafından kontrol altında tutulabilen faktör ise teknik nedenlerden kaynaklanan gecikme ve iptallerdir. Havayolu işletmeleri teknik nedenlerden kaynaklanan uçuş gecikme ve iptal oranlarını mümkün olduğunca düşük bir seviyede tutmayı temel amaçlarından birisi olarak görürler. Uçuşun zamanında yapılması müşteri memnuniyetini ve işletme karını olumlu yönde etkileyecektir.

Teknik nedenlerden dolayı oluşan gecikme veya iptaller ancak bakımın programlı ve kurallara uygun yapılmasıyla önlenir. Arızaların, güvenilirlik oranı yüksek bir şekilde giderilmesi gerekir. Bakımların uygun bir şekilde yapılmaması, işletmelere pahalıya mal olabilir ve uzun vadedeki hedefleri etkileyebilir. Boeing 747 gibi bir uçağın servis kaybının maliyeti, havayolu işletmesine yalnızca gelirden günlük 300 bin dolar gibi oldukça yüksek bir rakamdır. Ticari uçuşun vaktinde yapılamaması veya iptali yalnızca arızanın düzeltilme maliyeti ile ilgili değil, aynı zamanda ekstra mürettebat maliyeti, ilave yolcu transfer maliyeti ve yolcu gelir kaybı maliyetiyle de ilgilidir. Bu yüzden, bu durum havayolu işletmelerinin pazar paylarını, karlılığını ve işletmeler arasındaki

rekabetini etkilemiş olacaktır. “Uçak yerde” (aircraft on ground) belki de ticari havacılıkta en çok korkulan ifadedir (Kumar ve ark. 2000).

Havayolu işletmeleri, kullandıkları uçakların bakım faaliyetlerini yapabilmek için gerekli ve yeterli organizasyonları kurmak zorundadır. Bazı işletmeler, C ve D olarak adlandırılan büyük bakımları başka şirketlere yaptırmaktadırlar. Bakım faaliyetlerinin yürütülmesi, lisanlı teknisyen, bakım personeli, bakım atölyeleri, teçhizat, araç-gereç, yedek malzeme, uygun mekan ve altyapı gereksinimlerini gerektirir (Gerede 1998).

Bakım faaliyetleri, emniyetten ödün verilmeden maliyetleri minimum olacak şekilde programlanmalı ve gerçekleştirilmelidir. Motor bakımının prosedürüne göre yapılması yakıt tasarrufu sağlayacaktır. Uçak kazalarının az olması ise işletmenin güven imajını arttırarak sigorta primlerini düşürecektir (Gerede 2005).

2.2.2.2. Uçak bakım gereksinimi

Uçak bakımı, istisna olan programsız bakımlar ile birlikte büyük çaba gerektiren bir takım kontrollerden oluşur. Bu kontrollerin sıklığı, uçuş saatinin toplamı, kalkış-iniş sayısı, aylık, üç aylık, yıllık gibi farklı periyotlara bağlı olarak değişkenlik gösterir. Aynı zamanda bu kontroller, yalnızca yeterli bakım-onarım teçhizatı bulunan belirli hava alanlarında gerçekleştirilebilir. İşletmeler, farklı filolar için bakım merkezlerini tek bir noktada kurarak, kaynakların bir araya getirilmesiyle küçük tasarruflar elde edilebilirler.

Havayolu işletmeleri, uçak üreticileri ve ülkelerin sivil havacılık otoriteleri tarafından zorunlu tutulan ve onaylanan bakım programlarını uçaklara uygulamak zorundadır. Amerika’daki Federal Havacılık Yönetimi (FAA: Federal Aviation Administration), birkaç tür uçak bakım kontrolünü zorunlu tutmaktadır. A, B, C ve D olarak adlandırılan bu kontroller, kapsamlarına, sürelerine ve sıklıklarına göre değişmektedir. Eğer kontrol özel olarak tanımlanmış süre içerisinde gerçekleştirilmezse, ülkelerin sivil havacılık otoriteleri uçağın uçmasını yasaklayabilmekte ve yönetmeliklere uymayan işletmelere büyük cezalar

verebilmektedir. Uçaklara uygulanan bakım kontrolleri Çizelge 2.3'te gösterilmektedir (Bazargan 2004; Lee 1999).

Çizelge 2.3. Uçaklara uygulanan bakım kontrolleri (Lee 1999)

Kontrol Türleri	Yapılması gereken İşler	Sıklık	Gerekli İş Gücü
Periyodik Kontrol	Küçük görsel incelemeler	Uçuşlar arasında (uçak kullanılmadığında) veya geceleyin	2 adam-saat
A-Kontrol	Rutin bakım	Her 65 uçuş saati (~haftada bir defa)	10-20 adam saat
B-Kontrol	Baştan sona görsel inceleme + hareketli bütün parçaların yağlanması	Her 300 ile 600 uçuş saati arasında (~ayda bir defa)	Dar Gövdeli (DG): 100 adam-saat Geniş Gövdeli (GG): 200-300 adam-saat
C-Kontrol (Yalnızca DG)	Uçak servisten alınması	Yılda bir defa	2,100 adam saat: Gerçekleştirmek için 3 gün
D-Kontrol (Kapsamlı C-Kontrolü)	Uçağın servisten alınması; Büyük bakım	DG: Her 4C bakımda bir	20,000-30,000 adam saat Gerçekleştirmek için 3 -5 hafta
		GG: Her 15-18 ayda bir	10,000 adam-saat

FAA tarafından gerçekte zorunlu tutulan birinci temel kontrol A kontrolü olarak adlandırılmıştır. Her 65 uçuş saatinde bir gerçekleştirilir. A kontrolü, 10-20 adam-saat gerektirir ve 4 saatlik süreciyle en kısa süreli olan bakımdır. Bir çok durumda uçak bakım rotalaması yapılırken yalnızca A tipi kontrol dikkate alınır. Bunun başlıca nedeni, A tipi kontrol frekansının diğer kontrollerden daha sık olmasıdır. Havayolu sektöründe bakım uygulamaları, FAA kurallarının gerektirdiği zorunluluklardan daha sıkı bir titizlikle uygulanır. Pratikte, A kontrolü her 40-45 uçuş saatinde, uçağın günlük kullanım oranına bağlı olarak maksimum 3-4 takvim gününde bir gerçekleştirilir (Barnhart ve ark.1998; Sriram ve Haghani2003; Clarke ve ark.1996; Qi ve ark. 2004).

A kontrolü; uçağın görsel olarak incelenmesini, iniş takımları, motorlar ve kontrol yüzeyleri gibi bütün önemli sistemlerin ve uçağın minimum ekipman listesindeki (MEL: Minimum Equipment List) koşulları taşıyıp taşımadığının kontrolünü içerir. İstisna durumlar olmadıkça, uçakların kullanım oranlarını

yüksek tutabilmek için bakım ve onarım işleri gece gerçekleştirilir (Talluri 1998; Gopalan ve Talluri 1998).

İkinci temel bakım, B kontrol olarak adlandırılmıştır. Her 300-600 uçuş saati arasında gerçekleştirilir. B kontrolü, uçağın bakım hangarında 10-15 saat kalmasını gerektirir. Bakım süreci, 100-300 adam-saat gerektirir. B kontrolü, görsel olarak yapılan kontrollere ilaveten yatay stabilize ve kanatçıklar gibi bütün hareketli parçaların kontrolünü ve yağlanmasını gerektirir (Sriram ve Haghani 2003; Clarke ve ark. 1996).

B bakımı, bakım bölümü tarafından programlanır. Bakım departmanı, bakımın uçağa nerede yapılacağını ve gerekli bakım zaman penceresini filo planlayıcısına haber verir. Örneğin, B bakım planı bir B737'ye 19:00 ile 08:00 arasında 10 saat süreyle Antalya'da; bir B737 ve bir A320'ye 17:00 ve 05:00 arasında 12 saat içinde İstanbul'da yapılmak üzere program yapılabilir. Bu yüzden, filo planlayıcısı bakımın yapılabileceği zaman penceresi için bakım merkezinde uçağın servisten alınabileceği uygun bir periyot araştırmak zorundadır.

C ve D türü olarak adlandırılan en temel kontroller, sırasıyla her 1 ve 4 yılda bir yapılır. Bazı durumlarda uçağın 1 ay kadar servis dışı kalması gerekebilir. Bazı havayolları, C kontrolünü çeyrek C kontrolüne böler. Bu duruma dengeli kontrol denir. Böylece uçağa, her seferinde bakım yapılabilmesi için daha az zaman harcanır. Fakat, uçak, kontrol istasyonunu daha sık ziyaret eder. C ve D türü kontrolün gerçekleştirilmesi maliyetlidir. Özel teçhizat ve oldukça fazla insan gücü gerektirir. Sabit maliyetleri kapsaması nedeniyle, her filo tipi için C ve D türü kontrollerin gerçekleştirileceği bir bakım istasyonunun olduğu kabul edilir. Bazı havayolları, her filo için birden fazla C ve D türü bakım istasyonuna sahip olabilir. Fakat tipik olarak bu sayı küçüktür (Gopalan ve Talluri 1998; Clarke ve ark. 1997; Sriram ve Haghani 2003; Talluri1998).

C ve D türü kontrollere giren uçaklar, bu kontrollerin oldukça büyük aralıklarla gerçekleştirilmesi, kontrol sürecinin uzun olması ve sektörün dinamik yapısı nedeniyle uçuş planlamaları oluşturulurken bakımda kaldıkları süreç içerisinde yok gibi kabul edilir(Clarke ve ark. 1997).

2.3. Mürettebat Çizelgeleme Problemi

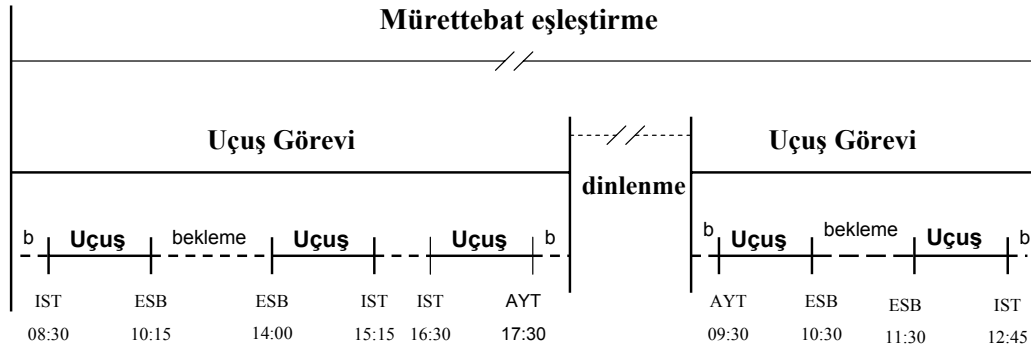
Mürettebat çizelgeleme probleminde, belli bir uçuş tarifesindeki her uçuş bacağına uçuş mürettebat gereksinimini karşılayacak şekilde mürettebat ataması yapılır. Programdaki her uçuş bacağı, belli bir hava alanından ayrılan ve bir diğerine varan bir uçağı temsil eder. Bir uçuş bacağı için mürettebat gereksinimi, uçak içinde gerekli olan pilot, yardımcı pilot, uçuş mühendisi, uçuş kabin görevlileri gibi havayolu personelini ifade eder. Uçuşlarda gereken uçuş mürettebat sayısı, uçağın boyutlarına, uçuş süresine, uçuşun gün içerisindeki başlama zamanına ve sunulacak servis seviyesine bağlı olarak değişir. Mürettebat çizelgeleme problemi, uçak çizelgeleme problemine benzer olarak mürettebat eşleme ve aylık mürettebat ataması olmak üzere iki ayrı adımda incelenir (Shaw 2003; Kohl ve Karisch 2004; Barnhart ve ark. 2003b; Lettovsky 1997; Qi ve ark. 2004).

2.3.1. Mürettebat uçuş programı

Mürettebat uçuş programı, mürettebat eşleme/eşleştirme (pairing) olarak da adlandırılır. Mürettebat uçuş programı, genellikle mürettebatın evinin bulunduğu şehirdeki hava alanından başlar ve son görev uçuşu başlangıç noktası olan hava alanında son bulur. Büyük havayolu işletmelerinde genellikle birden fazla mürettebat üssü vardır. Mürettebat uçuş programı, havayoluna bağlı olarak bir ile beş gün arasında değişebilir. Bu süreçte, mürettebat üyeleri ikamet ettikleri şehir dışındaki bazı şehirlerde genellikle geceyi dinlenerek geçirirler. Mürettebat uçuş programında, dinlenmeler arasındaki süre uçuş görevi olarak adlandırılır. Uçuş görevi, bir güne özel uçuş ataması olarak düşünülebilir. Bununla birlikte, uçuş görevi, bir kaç saat içinde son bulabilir ve dinlenme süresi gün ortasında da başlayabilir (Shaw 2003; Bazargan 2004; Cordeau ve ark. 2001).

Şekil 2.6'da, merkez üssü İstanbul olan mürettebat için oluşturulmuş iki günlük mürettebat uçuş programı gösterilmektedir. Birinci görev, üç uçuş bacağına, ikinci görev ise iki uçuş bacağına içerir. Mürettebat uçuş görevinde uçuş bacakları arasındaki süre, gün bağlantısı veya bekleme (sit) olarak adlandırılır.

Günlük uçuş görevleri arasındaki süre, gece bağlantısı veya dinlenme olarak adlandırılır. Briefing almak olarak bilinen (b olarak gösterilmiştir) ve briefing vermek olarak bilinen (b olarak gösterilmiştir) görevden önceki ve sonraki zaman periyodunda, mürettebat tarafından düzenlenmesi gereken evrak işleri tamamlanır (Shaw 2003).



Şekil 2.6. Merkez üssü İstanbul olan mürettebat için iki günlük uçuş programı (Shaw 2003)

Mürettebat uçuş programı hazırlanırken amaç, bütün uçuşları kapsayacak şekilde toplam mürettebat maliyetini enküçükmektir. Mürettebat uçuş programının maliyeti içinde toplam uçuş maliyeti, bağlantılar arasında beklerken oluşan konaklama, yemek, hava alanına ulaşım maliyetleri de yer alır. Problemden aynı zamanda mürettebatın uçuşta geçirdiği zamanın maksimum olması ve gün içerisindeki uçuşlar arasındaki bağlantı zamanlarının enküçük olması sağlanmaya çalışılır. Havayolu işletmeleri mümkün olduğu sürece birçok uçuş bacağına mürettebatı aynı uçakta tutmak için çaba gösterir. Böylece, farklı uçaklarda görev alacak mürettebatın iptal olan bağlantılı uçuş veya uçuş gecikmeleri gibi olaylar sonucunda görev uçuşuna yetişememesi durumundan kaynaklanacak problemlerle karşılaşma riski önlenir. Bu durumlar ile karşılaşıldığında mürettebatlar gelir getirmeyen yolcu statüsünde uçarak görev alacakları uçağa yetişirler (Bazargan 2004; Yu ve Thengvall 2002; Cordeau ve ark. 2001).

Mürettebat uçuş programı ve uçak rotalama problemlerinin çözümleri aynı olamaz. Uçaklar bakım kısıtları sağlandığı sürece gün içerisinde saat sınırlaması olmadan programda uygun uçuşlara atanarak bir günde istenildiği kadar kullanılabilir. Buna karşılık, mürettebatın uçak içerisinde en fazla 8 saat kalmasına izin verilir. İkinci olarak, mürettebat eşleme aynı şehirde başlayıp aynı şehirde son bulması gerekirken, uçak bakım kısıtlarını sağladığı sürece farklı

şehirlerde konaklayabilir. Son olarak mürettebat uçuş programında, mürettebatın bir uçaktan iner inmez bir sonraki uçuşa yetişmesi için gerekli minimum zaman dikkate alınmaz (Bazargan 2004; Yu ve Thengvall 2002).

Mürettebat uçuş programlarının yasal olarak uygulanabilmesi için ülkelerdeki sivil havacılık otoritelerinin, sendika ve havayolu işletmelerinin kurallarına uygun olarak hazırlanması gerekir. Bir görevin belli bir zamanı geçmesine izin verilmeyebilir veya uçuş saatinde veya uçuş tarifesinin içerdiği uçuş bacak sayısında ve mürettebatın ana üsten uzak olduğu sürede belli bir limit olabilir. Görevler arasında geçen minimum ve maksimum zaman veya uçuş bacakları arasında bekleme zamanının minimum ve maksimum periyodu belli olabilir. Bunlar, havayolu mürettebat çizelgeleme problemlerinde kullanılan kurallardan bazılarına birkaç örnektir. Bazı kurallar tamamen karmaşık olabilir. Örneğin, görev sonrası dinlenme periyodu, en azından görevde geçen maksimum zaman ve bazı sabit değerler olabilir. Bir diğer örnek, FAA'nın 24 saat içindeki 8 saat kuralıdır. Bu kural kümesi, eğer her hangi bir 24 saatlik periyot içinde 8 saatten az, 8-9 saat arası ve 9 saatten fazla uçuş saati için sırasıyla, 9, 10 ve 11 saatlik minimum dinlenme zamanları kural olarak uygulanır (Shaw 2003; Yu ve Thengvall 2002).

2.3.2. Aylık mürettebat ataması

Programdaki bütün uçuşları kapsayacak şekilde mürettebat uçuş programı oluşturulduktan sonra her bir mürettebat üyesi, mürettebat uçuş programlarına atanarak aylık olarak her bir mürettebatın görev çizelgelemesi oluşturulur. Mürettebatların aylık görev çizelgelerinin, çalışanın izin günlerini, eğitim süreçlerini, yasal düzenlemeleri ve diğer sözleşme mecburiyetlerini içermesi gerekmektedir. Temel amaçlardan biri mürettebatın yararlanma oranını en büyüklenmektir. Bu süreçte her bir mürettebat üyesi, oluşturulan mürettebat uçuş programına genellikle aylık süreç temel dikkate alınarak atanır. Bu problemi çözmek için iki farklı yaklaşım kullanılmaktadır. Birinci aylık mürettebat atama (rostering) yaklaşımında problem, mürettebatın ihtiyaçları ve tercihleri dikkate alındıktan sonra mürettebat üyeleri, eşit bir

yaklaşım içerisinde, hazırlanan bütün mürettebat uçuş programları kapsanacak şekilde uçuşlara atanır. Mürettebatın görev listesi oluşturulurken kullanılan ikinci mürettebat atama (bidline) yaklaşımında, her mürettebat üyesinin kıdemi göz önüne alınır. Yüksek kıdemli mürettebatın tercihleri öncelikli olarak sağlanır ve mürettebatın uçuş programına atanması bu şekilde gerçekleşir. Mürettebat görev listesi oluşturulurken kullanılan birinci yaklaşım Avrupa'da, ikinci yaklaşım ise Kuzey Amerika'da daha yaygın olarak kullanılır(Qi ve ark. 2004).

İkinci yaklaşımda, ilk olarak her bir mürettebatın seçebileceği şekilde uçuş programları oluşturulur. Daha sonra her mürettebat kıdemlerine göre bireysel uçuş programlarından birini seçer. Doğal olarak, bazı uçuş programları gece uçuşunun uzunluğu, zaman kuşağını çakışması gibi zorluklardan dolayı diğerlerine göre tercih edilirler. Sonuç olarak, kıdemli mürettebat üyeleri her zaman en ideal görevleri seçerken, yeni mürettebat istenmeyen görevleri almak zorunda kalır. Bu yüzden, bireysel uçuş programlarının oluşturulması sürecinde sistemden görev dağılımının adaletli yapılması beklenir.

Aylık mürettebat atama problemi, her homojen mürettebat üye grubu dikkate alınarak ayrı ayrı çözülür. Kokpit mürettebat üyesi yalnızca gerekli lisansa sahip olduğu belli bir filo tipinde uçmak için görevlendirilirken, kabin mürettebat üyeleri farklı uçak tiplerinde görev alabilecek şekilde eğitim aldıklarından farklı filolara atanabilir (Bazargan 2004; Yu ve Thengvall 2002).

2.4. Havayolu Çizelgelemesinde Düzensiz Olayların Yönetilmesi

Uçuş, uçak ve mürettebat programlarının hepsi havayolu planlama aşamasında önceden oluşturulur. Bununla birlikte, planlanan programlar gerçekleştirilirken meydana gelen çeşitli aksamalar, eğer değiştirilemezse program uygulanamaz duruma gelebilir. Amerika'da ortalama bir günde, bütün uçuş planlarının yaklaşık olarak %15 ile %20 arası on beş dakikadan fazla gecikmeli olarak gerçekleşir ve yaklaşık olarak tüm uçuşları %1-3' ü iptal edilir (Yu ve ark 2003). Olası aksamalar, öngörülemeyen uçak arızası, mürettebat hastalığı, kötü hava koşulları, hava trafik kontrol sınırlamaları vb.'den kaynaklanır. Bu olaylar ile karşılaşılan zaman belli olmadığı için problem, aksama yönetimi

veya düzensiz durumların operasyon yönetimi olarak adlandırılır. Düzensiz olaylar ile karşılaşıldığında orijinal operasyonel planlar, artık en iyi ve hatta uygun olmayabilir. Bu yüzden, orijinal planların revize edilip yeni koşullara uygun hale getirilmesi gerekebilir (Bazargan 2004; Qi, ve ark. 2004).

Bozucu olayların sonucunda operasyonel programın artık uygulanamaz hale gelmesinden sonra, mümkün olan en kısa zaman içerisinde en iyi plan şekline karar vermek bir zorunluluktur. Havayolunun önceden kararlaştırılmış bir planın yerine yeni planı uygulamaya koyması maliyetli olabilir. Bu yüzden, yeni planının belli bir zamandan sonra orijinal plana yakınsaması gerekir.

Havayolu ortamında, bütün planlama periyodunu kapsayacak ve bütün kaynak ve taahhütlerin dikkate alınarak çok kısa bir süre içerisinde çok kaliteli ve yeni bir planın üretimi bazen mümkün olmayabilir. Böyle durumlar ile karşılaşıldığında, havayolu ilk olarak çok acil ve çok önemli kararı alacak şekilde kısmi çözümler oluşturabilir. Kısmi çözümün uygulama aşamasında, kısmi çözümden uzun dönemli planlara geçiş yapılabilecek daha uygun çözümler araştırılır (Qi ve ark. 2004).

Düzensiz operasyonların yönetilmesi, uçuş-uçak yeniden çizelgelemesi ve mürettebat yeniden çizelgelemesi olarak ardışık olarak çözülür.

2.4.1. Uçuş-uçak yeniden çizelgeleme

Beklenmeyen bir durumla karşılaşıldığında uçuş, uçak ve mürettebat üyelerinin hepsinin yeniden çizelgelenmesi gerekebilir. Pratikte ilk olarak, uçuş ve uçak yeniden çizelgelenir. Eğer yeni uçuş-uçak çizelgelemesi oluşturulduktan sonra oluşturulan yeni plan, mürettebat çizelgelemesi için uygun değilse, tüm sürecin tekrar edilmesi gerekir. Bu süreç, uygun çözüm bulununcaya kadar devam eder (Qi ve ark. 2004; Yu ve Thengvall 2002).

Uçuş-uçak yeniden çizelgeleme probleminin iki önemli noktası, orijinal uçuş-uçak çizelgeleme ile ilişkilidir. İlk olarak, düzensiz olayların yönetimi için belirli bir zaman periyodu tespit edilir. Yeni programın, aksamanın uzun dönemli etkisini azaltmak için önceden tespit edilmiş zaman periyodu içerisinde orijinal plana yakınsaması gerekir. Özellikle bütün uçakların, belirlenen zaman

periyodunun sonunda doğru hava alanlarında olması gerekir. İkinci olarak, yeni planın belirlenen zaman periyodu içerisinde orijinal plandan mümkün olduğu kadar az bir şekilde sapması tercih edilmelidir.

Uçuş ve uçak birlikte yeniden çizelgelenirken, yeni ve orijinal faaliyetler arasındaki maliyetlerin farkı gibi farklı sapma maliyetli seçenekler dikkate alınabilir. Bu seçenekler arasında, orijinal planlardaki gibi aynı uçağın uçuşlarını hala kapsamasıyla birlikte, bazı uçuşların belirli bir süre geciktirilmesi, bazı uçuşların iptal edilmesi, uçuşları kapsayacak şekilde orijinal uçak yerine başka veya kullanılabilirse farklı filodan uçak kullanılması ve bütün uçuşları kapsamak için herhangi bir hava alanındaki uygun uçağın boş olarak ihtiyaç duyulan hava alanına uçurulması yer alabilir. Düzensiz olayları yönetme probleminin amacı, belirli bir zaman periyodu içerisinde orijinal programa yakınsayacak şekilde en düşük toplam sapma maliyetli yeni uçuş-uçak çizelgelemesini müşteri memnuniyetini de sağlayarak bulmaktır (Qi ve ark. 2004; Yu ve Thengvall 2002).

2.4.2. Mürettebat yeniden çizelgeleme

Uçuş-uçak yeniden çizelgelemesinden sonraki adımda yeni uçuş-uçak çizelgelemesi dikkate alınarak, uçuş mürettebatının çizelgelemesi revize edilir. Mürettebat çizelgeleme sürecinin birinci aşamasında mürettebat uçuş programı bütün uçuşları kapsayacak şekilde 2-5 gün arası için oluşturulmuş ve mürettebat üyelerinin mürettebat uçuş programına ataması gerçekleştirilmişti. Mürettebat hastalığı ve acil ayrılmalar gibi bazı aksamalar, orijinal mürettebat çizelgelemesini uygulanamaz duruma getirebilir.

Mürettebatın yeninden çizelgelenmesindeki amaç, belli bir periyot içerisinde bozulan mürettebat uçuş programını orijinal programa uygun hale getirmektir. Aksama durumunu düzeltmek için kullanılan seçenekler, yeni mürettebat uçuş programının oluşturulması, eski mürettebat uçuş programının parçalara bölünmesi, yedek mürettebat üyelerinin kullanılması ve mürettebatın gelir getirmeyen yolcu statüsünde ihtiyaç duyulan hava alanındaki uçuşa katılabilmesi için uçurulması olabilir (Qi ve ark. 2004).

Bu bölümde havayolu sektöründeki çizelgeleme ve planlama problemleri incelenerek, çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlama probleminin hangi süreçte ele alındığı ve diğer süreçlerle ilişkisi ortaya konulmuştur. Ayrıca, havayolu sektöründe bakımın önemi güvenlik ve maliyet açısından değerlendirilerek ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. Bundan sonraki bölümde, havayolu sektöründeki çizelgeleme ve planlama problemleri ile ilgili yapılmış çalışmalar, matematiksel modeller ve çözüm yaklaşımları incelenecektir.

3. MATEMATİKSEL MODELLER VE ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI

Havayolu planlama sürecinde uçak çizelgeleme ile ilgili çalışmalar incelenerek literatür araştırması yapılmıştır. İncelenen çalışmalarda yer alan ve bu çalışmada kullanılan matematiksel modeller ve çözüm yaklaşımları hakkında genel bilgi verilmiştir. Matematiksel programlama alanında çeşitli ayrıştırma algoritmaları bulunmaktadır. Bu algoritmaların çoğu, belli özel yapıdaki matematiksel modellere uygulandığında çok başarılı sonuçlar vermektedir. Bunlar arasından ayrıntılı olarak sütun türetme, Dantzig-Wolfe ayrıştırması ve Bender ayrıştırması incelenmiştir.

3.1. Literatür Araştırması

Bu bölümde, filo ataması ve uçak bakım rotalaması ile ilgili yapılan çalışmalar incelenmiştir. Filo ataması ile ilgili çalışmalar arasından literatürde en çok referans gösterilen çalışmalara öncelik verilirken, uçak bakım rotalama ile ilgili çalışmaların tamamı incelenmiştir.

Filo atama problemi ile ilgili çalışma yapan araştırmacılardan biri olan Abara (1989), eş zamanlı olarak uçuş tarifesine iki veya daha fazla filonun atanmasını sağlayacak şekilde filo atama problemini modellemiştir. Amaç fonksiyonu, kar maksimizasyonu, maliyetlerin enküçüklemesi ve belli bir filo tipinin en iyi kullanımını içeren çeşitli biçimleri alabilecek şekilde hazırlanmıştır. Model beş temel kısıttan oluşmaktadır. Bu kısıtlardan dördü, uçuş kapsam, filo sürekliliği, program denge ve filodaki uçak sayısı kısıtı, filo atama modelinin temelini oluşturmaktadır. Beşinci kısıt, kullanıcının belirlediği kuralları içeren opsiyonel kısıttır. Opsiyonel kısıtlar, belirli uçak tiplerinin belirli uçuşlarda kullanımı sağlayan veya belirli istasyonlarda kalacak uçak sayısını sınırlandıran kısıttır. Modelde, filo atama problemini çözmek için tamsayı doğrusal programlama kullanılarak, ayrılış ve varış zamanları belirtilen belli bir programda, hangi tip uçağın hangi uçuşa atanacağına karar verilmektedir.

Merkezi hava alanlarında, gelen uçuşun çok sayıda giden uçuş ile bağlantılı olmasının önüne geçmek için her uçuşun yaklaşık olarak beş uçuş ile bağlantı oluşturabileceği başka bir kısıt daha kullanılmıştır. Böylece, modelin boyutu küçük tutulmaya çalışılmıştır. Bu kısıt aynı zamanda, her olası uçuş bağlantısına bir filo tarafından hizmet verilmesini ve olası bağlantılardan yalnızca bir tanesinin programda aktif olmasını sağlamıştır. Çalışmada, bağlantı uçuş serimi kullanılmıştır.

Abara (1989)'nın modeli, aynı zamanda hem filo hem de istasyon anlamında dengelenmemiş uçuş tarifesi problemlerini de tanımlamıştır. Denge, bir hava alanına gelen uçak sayısı ile giden uçak sayısının bir birine eşit olmasıdır. Uçuş dengesinin sağlamayan filolar için yüksek maliyetlerin olduğu ifade edilmiştir.

Abara (1989)'un önerdiği model yaklaşımının boyutu, orta ölçekli bir çizelgeleme için bile çok büyük olmuştur. 60 istasyonlu, 400 uçuş tarifeli ve üç farklı filoyu kapsayan bir problemin sonuç doğrusal model, 6300 değişken ve 1800 kısıttan oluşmuştur. Problemin karmaşıklığı, bütün olası bağlantı kısıtlarını temsil eden karar değişkenlerinin tamsayı olma zorunluluğundan kaynaklanmıştır.

Subramanian ve ark. (1994) çeşitli operasyonel kısıtlar altında uçağın kapasitesi nedeniyle reddedilen yolcuların oluşturduğu maliyet ile operasyon maliyetinin toplamını enküçülemek için uçuş bacaklarına filo tiplerini atayan karma tamsayı doğrusal programlama problemini, Delta Hava Yolları için Coldstart olarak adlandırılan proje kapsamında incelemiştir. İşletmenin, Coldstart modelinin kullanılmaya başlanmasıyla ilk üç yıllık periyot içerisinde 300 milyon dolar üzerinde tasarruf sağlayacağı tahmin edilmiştir. Model, çevrimsel olarak her gün tekrar eden 2500 iç hat uçuşu ve 450 uçaktan oluşan 10 farklı filo için tek bir gün için oluşturulmuştur. Coldstart modeli, filoların uçuşlara atanmasını gerçekleştirirken, her ayrı uçağın uçacağı uçuş rotalarını tespit etmemiştir. Topla dağıt uçuş seriminde, hava alanlarının operasyon özelliği ve filolardaki uçak sayılarının büyük olması nedeniyle model tarafından önerilen atamalardan rotalara uygun kuyruk atamasının bulunacağı kabul edilmiştir. Filo atama probleminin matematiksel yapısı, zaman serim yapısında oluşturulmuştur. Modelde uygun

olmayan çözümlerin oluşmasını önlemek için ekstra uçak kullanımına yüksek maliyetler ile izin verilmiştir.

Subramanian ve ark. (1994), modelde bakım ihtiyacı olan uçakların bakımın yapılabileceği hava alanlarında bakım süresince gece boyunca kalabilmesini sağlamak için zaman hattı seriminde bakım fırsatını temsil eden bakım arkları kullanmıştır. Ayrıca, aynı özellikteki filo için uçuş mürettebatının görev değişimleri, çalışma zamanı ve dinlenme zamanı arasında en iyi koşulu sağlayacak kısıtlar kullanılmıştır. Maliyetlerin enküçüklenmesini sağlayan amaç fonksiyonu, filo planlaması veya mevcut oluşturulmuş rotalardan bazılarının iptal edilerek yeni rota oluşturmak üzere değiştirilebilmiştir. Günlük olarak çalıştırıldığında Coldstart modelinin boyutu, yaklaşık olarak 40,000 kısıt ve 60,000 değişkenden oluşmuştur. Değişkenlerin 20,000'i ikili değişken ve 40,000'i genel tamsayı değişkendir. Problemi çözmek için iç nokta algoritması kullanılmıştır. Doğrusal modelin çözümde bazı veya bütün ikili değişkenler bir olarak sabitlenmiş, bu sabit değişkenler kullanılarak problemin boyutu küçültülmüş ve sonuç problem karma tamsayı programlama kodlaması kullanılarak çözülmüştür. Doğrusal modeli çözmeden önce, problemin boyutunu küçültmek için zaman ekseninde uçakların geliş ve gidişlerini gösteren düğümler kümelenmiş ve bağımlı değişkenler elenmiştir. 41,325 satırlı ve 62,088 değişkenli bir problem 12,811 satırlı ve 33,474 değişkene indirgenebilmiştir. IBM RS/6000 (Model 530) çalışma istasyonunda iç nokta algoritmasıyla 45 tekrar ve 43 dakikada çözülen bir problem, simpleks kodu ile 356,854 tekrarda ve 19 saatte çözülmüştür. Çalışmanın sonucunda elde edilen kazançların önemli bir oranını direkt işletme maliyetlerinden elde edilen kazanç oluşturmuştur.

Hane ve ark. (1995), dengeli bir uçuş tarifesi ve uçak kümesi için hangi uçak tipinin hangi uçuş rotasında uçacağına karar veren filo atama problemini günlük olarak iç hat uçuşları için incelemiştir. Programda, akşamın geç saatleri ile sabahın ilk saatleri arasındaki periyot, uçakların rutin bakımlarının yapılabilmesi için uçuş aktivitesinin olmadığı zaman periyodu olarak kabul edilmiştir. Model, kısıtların zaman hattı seriminde tanımlandığı büyük çok mallı serim akış problemi olarak hazırlanmıştır.

Bu problemin üstesinden gelmek için kullanılan metotlar, iç nokta algoritması, maliyet bozulması (cost perturbation), model birleştirme (model aggregation), küme belirleme kısıtlarında dallandırma ve dallandırma sırasındaki öncelik (branching on set- partitioning constraints and prioritizing the order of branching). Sayısal sonuçlar algoritmanın, %0.02 maksimum eniyilik aralığına sahip çözüm bulduğunu ve standart doğrusal model tabanlı dal ve sınır kodlamasının rassal seçeneğinin kullanılarak elde edilen çözümden iki kat daha hızlı olduğunu göstermiştir.

Uçuş bacalarına filo atamasında göz önünde bulundurulacak faktörler arasında, hem noktadan noktaya hem de devam eden servisler için yolcu talebi, uçuş geliri, uçak koltuk kapasitesi, yakıt maliyetleri, mürettebat sayısı, varış ve ayrılış istasyonlarında bakım yapılabirlik, hava alanlarında körük/kapı kullanılabilirlik ve uçak gürültüsü yer almıştır. Bu faktörlerin çoğu karar değişkenlerinin amaç katsayısıyla, diğerleri ise kısıtlar yardımıyla elde edilmiştir.

Hane ve ark. (1995)'nin geliştirdikleri çözüm metodolojisi ile Delta Hava Yolları'nın 150 şehir, 2500 uçuş ve 11 filodan oluşan günlük filo atama problemini bir saatten az sürede çözülmüştür. Karar değişkeni, her ayrı uçuş bacağına atanan filoyu temsil etmiştir. Diğer değişken, her filo için zamanın her noktasında, her istasyonda yerdeki uçak sayısını veren yer arkıdır. Amaç katsayısı, filo tipinin atanma maliyetini temsil etmek için kullanılmıştır. Bu maliyet, aynı zamanda uçağın kapasitesi nedeniyle reddedilen yolcu maliyetini de içermiştir. Temel modelde dört ana kısıt kümesi bulunmaktadır. Bunlar, her uçuş bacağına bir uçağın atanmasını sağlayan uçuş kapsam kısıtı, uçakların uçuş serimi boyunca sirkülasyon yapmasını sağlayan denge kısıtı, bağlantısı olan uçuş bacalarının aynı filo tarafından uçulmasını sağlayan süreklilik kısıtı ve kullanılabilir uçak sayısını kısıtlayan uçak sayı kısıtı şeklinde yazılabilir.

Model çözülrken ilk olarak, zaman hattındaki düğümler birleştirilmiş, yer arkları elenerek adalar oluşturulmuş ve bağlantılarını kaçıran uçuşlar elenmiştir. En iyileme sisteminde, bütün maliyetler bozulmuş, daha sonra en iyilemenincebirselle ön süreci kullanılarak birleştirilmiştir. Sonuç olarak problem, en dik sınır fiyatlandırma (steepest edge pricing) kullanılarak ikil simpleks (dual simplex) yöntemiyle çözülmüştür. Elde edilen çözümdeki maliyetler bozulmadan,

yeniden en iyi bulunmuş ve değişkenlerin sabitlendiği problem elde edilmiştir. Bu problem daha sonra en iyi değişkenleri elde etmek için ikil simpleks yöntemiyle çözülmüştür. En iyi temel değişkenler elde edildikten sonra dal ve sınır aşamasına geçilmiştir. En dik fiyatlandırma, ikil simpleks algoritmasının, filo atama problemlerinin çoğu için iç nokta metodundan daha etkili olduğu gösterilmiştir.

Elde edilen çözümlerin uygulanmasında bazı dezavantajlar ile karşılaşmıştır. Filo atama modelinde, her bir uçağın yerine filolar dikkate alınarak uçuş atamaları oluşturulduğundan modelde önceki ve sonraki uçuşların hangi uçak ile bağlantısının olacağı tespit edilememiştir. Bu yüzden programı uygulamak için gereken kararların çoğu ertelenmiştir. Ertelenen kararlardan bir tanesi de her 2 ile 4 günde bir gerçekleştirilmesi gereken 4-5 saat bakım fırsatının programlanması olmuştur. Günden güne farklılık gösterebilen uçuş tarifelerindeki günlük modelin kullanımından ortaya çıkan problemler istisna durumlar olarak ifade edilmiştir. Buna karşın, haftanın bazı günleri için farklı filonun kullanılmasıyla işletme karının artırılabilmesi durumlarının olduğu vurgulanmıştır.

Clarke ve ark. (1996), çözüm elde edilebilecek şekilde bakım ve mürettebat kısıtlarını filo atama problemine ilave ederek modelleme yöntemini göstermiştir. Çalışma, Hane ve ark. (1995) tarafından geliştirilen filo atama modelinin devamı niteliğindedir. Filo ataması, yalnızca yeterli sayıda bakım fırsatı sağlamıştır. Bakımlar arasındaki süreçlerin makul ve kabul edilebilir periyotta olmasını veya bakım ziyaretlerinin uygun bir zaman aralığına yerleştirilmesini garantileyecek kapasitede olmamıştır. Uygun bir bakım programını garantilemek her uçağın uçuş rota planına bağlıdır. Uçakların rotalanması, filo atamasından sonra çözülmüştür. Rota probleminin iki önemli amacı vardır. Aynı filoya atanan uçuş çiftinin cazip bir şekilde ara bir hava alanında bir duruşlu uçuş oluşturacak şekilde bağlantısını sağlamak ve bakım ziyaretleri için uygun zaman aralığını bulabilmektir. Filo ve rota atamanın bir problemde birleştirilerek, bakım programının üstesinden gelinebileceği, buna karşın her iki modelin birlikte çözümünün oldukça zor olduğu vurgulanmıştır.

Amaç fonksiyonunda, minimum işletme maliyeti ile gelirler en büyümeye çalışılmıştır. Bakım kısıtlarını sağlamayan çözümlerin uygun olmadığı kabul edilmiştir. Clarke ve ark. (1996), Hane ve ark. (1995)'nin

oluşturduğu filo atama modelinde kullanılan temel kısıtları ve zaman hattı serimini kullanmıştır. Bu filo atama probleminin zaman periyodu günlük olduğu için yalnızca 24 saatten az olan bakım gereksinimi ile ilgilenilmiştir. Büyük C bakımı, modeldeki mevcut uçak sayısının azaltılmasıyla dikkate alınmıştır. Günlük zaman dilimi içerisinde A kontrolü ve B kontrolü olmak üzere iki bakım bulunmaktadır. A kontrolü, “kısa” ve B kontrolü “uzun” kontrol olarak tanımlanmıştır. Bu ayrımındaki amaç, bakım ziyaret süresinin model içinde önemli rol oynamasıdır. Problemin zor olan kısmı, uzun bakımın yapılabilmesi için gerekli bakım penceresinin garanti altına almak olmuştur. Uzun bakımı tamamlamak için bakım zaman penceresinin yarısından daha fazla zamana ihtiyaç duyulmuş ve kısa bakımı tamamlamak için bakım zaman penceresinin yarısından daha az bir süre yeterli olmuştur. Bakım programlaması için modele sağlanan veriler, hava alanları, filo türleri, uçak sayısı, bakım süreleri ve her bakım gereksinimi için bakım zaman penceresini tanımlayan verilerden oluşmuştur.

Çalışmada uçuş arklarına benzer bakım arkları kullanılmıştır. Bakım arkları ve düzenli uçuş arkları arasında iki büyük fark vardır. Birincisi, bakım arkının ayrıldığı istasyona vardığı kabul edilmiştir. Bu, yol üzerindeki bazı uçuşları atlayarak yapılan bakım ziyareti olarak adlandırılmıştır. İkincisi, her bakım gereksinimi için uygun bakım ziyaretlerini karşılayan ark kümesi oluşturulmuştur. Model bu küme içindeki arklardan doğru ziyaret numarasını seçmiştir. Bakım arklarındaki küçük negatif maliyet, modelde olası bütün bakım arklarının çekici olmasını sağlamıştır.

Bir mürettebat kendi ana mürettebat üssü olmayan bir istasyona gece geç bir saatte vardığında, uçak ayrılmadan önce mürettebatın yeterince dinlenmesi gerekir. Varılan hava alanında, uçuşu gerçekleştirebilir mürettebat olmadığında, o gün için o filo uçuş gerçekleştirmezse ve o hava alanında mürettebat ve uçak geceleme zorunda kalır. Uçuş mürettebatının, kendi evinin bulunduğu ana hava alanından ayrı kaldığı her gece için bir maliyet eklenerek, en iyileme modelinin filolama ve mürettebatın geceleme maliyeti arasında denge oluşturması sağlanmıştır.

Sayısal çalışmalar için veriler, yılın farklı zamanlarını temsil edecek şekilde büyük Amerikan hava yollarından elde edilmiştir. Üç farklı problem

oluşturulmuştur. İlk olarak, temel filo atama problemi çözülmüştür. Daha sonra yalnızca uzun bakım kısıtının ve son olarak da hem uzun bakım hem de mürettebat kısıtının ilave edildiği problemler incelenmiştir. Kısa bakımın üstesinden gelmek için özel bir modelleme kısıtı kullanılmamıştır. Çünkü, A bakım dikkate alınmadan elde edilen çözümlerde, A bakımın kurallara uygun olarak gerekli şartlarda gerçekleştirileceği kabul edilmiştir. Bir uzun bakım gereksinimi, modele elli civarında tamsayı değişken eklenmesine neden olmuştur. Model, artan denge kısıtları ve değişiklikleri nedeniyle zaman hattı seriminin yapısı değiştirmiştir. Mürettebat kısıtının ilave edilmesi zaman hattı serimine yeni bir değişkenin ilave edilmesine neden olmamıştır.

Problem, çözülmeyen önce iki aşamadan geçirilmiştir. Birinci aşamada, düğümler kümelendikten sonra yer arkların elenmiş, adalar oluşturularak ve bağlantıları kaçırarak uçular elenmiştir. İkinci aşamada, en iyileme aracının (OSL Release 2) cebirsel ön prosesi kullanılarak birleştirme işleminden sonra, ikil en dik sınır simpleks yöntemiyle doğrusal model çözülmüştür. Elde edilen çözümde, 0.99'dan büyük olan uçuş değişkenleri "1" olarak kabul edilmiş ve tekrar cebirsel ön prosesi kullanılarak birleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem, en uygun sonuç elde edilmesini garantilemiş ve problemin boyutunu küçülmüştür. Daha sonra elde edilen doğrusal model, tekrar ikil en dik sınır simpleks yöntemiyle çözülmüştür. En iyileme aracının karma tamsayı programlama ön prosesi kullanılarak çözüm basitleştirilmiştir. Karma tamsayı programlama, dal ve sınır yöntemiyle çözülmüştür.

Clarke ve ark. (1996), bütün modelleri OSL Release 2 kullanarak IBM RS/6000 model 550 bilgisayarında çözmüşlerdir. Modeller, dal ve sınır çözümde 1000 düğüm ile sınırlandırılmıştır. En önemli sonuç, ilave edilen kısıtların daha iyi çözüm elde edilmesini sağlamış olmasıdır. Bakım kısıtlarını ilave etmeden uzun bakımların yapılacağı yeri bulmak, uçağın 12 saat boyunca yerde kalması gerektiğinden mümkün olmamıştır. Sonuçlar, bakım ve mürettebat kısıtlı problemlerin çözümünün daha zor olduğunu ve boyutu büyüyen modellerin 2 ile 5 saat arasında en iyiye yakın olarak çözülebileceğini göstermiştir.

Daskin ve Panayotopolos (1989), tek bir topla dağıt uçuş serimini kullanan havayolları için işletme karını en büyükleyecek şekilde uçuş rotalarına

filo atamasını sağlayan bir tamsayı doğrusal model önermiştir. Amaç fonksiyonunda, uçak ataması ile ilgili kar en büyüklenmiştir. Çalışmada, her “i” rotasına en fazla bir uçak atanmasını ve her “k” zaman periyodu için bir rotaya en fazla bir “j” uçağının atanmasını sağlayan kısıtlar kullanılmıştır.

Oluşturulan 324 test örneği, Turbo Pascal 3.01A kullanılarak kodlanmıştır. Her örnekte maksimum 100 tekrara izin verilmiş ve kullanılabilir uçak sayısı sınırlandırılmıştır. Uçuş tarifesi, ayrılış zamanları rasgele seçilerek oluşturulmuştur. Rota süresi ve saat başına karlılık her uçak tipi için düzenli dağılımdan rassal olarak hesaplanmıştır.

Amaç fonksiyonunun üst değeri, Langrange prosedürü kullanarak elde edilmiştir. Orijinal problem için uygun çözümün elde edilemediği durumlarla da karşılaşmıştır. Bu durumlarda, uygun olmayan çözümü rotalara yapılacak başlangıç uygun uçak atamasına dönüştürmek ve çözümü iyileştirmek için sezgisel bir prosedürün kullanılması söz konusudur. Kullanılabilir uçak sayısı bütün rotalarda uçmak için gerekli uçak sayısından az veya eşit ise Langrange relaksiyon iyi bir üst sınır sağlamıştır. Gereken uçak sayısı, kullanılabilir uçak sayısından fazla olduğunda dal ve sınır gibi teknikler kullanılarak, çözüm iyileştirilmiştir. Bazı uçakların aynı zamanda birden fazla rotaya atanması sonucunda, uygun olmayan çözümlerle karşılaşmıştır. Bu durumun üstesinden iki yolla gelinmiştir. Birincisinde, birden fazla rotaya atanan uçağın uçağı rota dışındaki diğer rotalara uygun olan uçaklar atanmış ve yeniden atama yapılmıştır. İkinci olarak, Lagrange çözümünde çakışan rotalara uçak ataması yapılmayarak sağlanmıştır. Çalışmada bakım ile ilgili olarak her hangi bir bilgiye yer verilmemiştir.

Feo ve Bard (1989), hem bakım istasyonlarının konumlandıracağı hem de bakım için çevrimsel talebin daha iyi karşılanacağı bir uçuş tarifesi oluşturacak bir model önermiştir. Çalışmada yalnızca dört günde bir gerçekleştirildiği kabul edilen A bakım dikkate alınmıştır. Uçakların gün içerisinde yapmış oldukları ara duruşlar dikkate alınmamıştır. Girdi olarak, uçakların gün içerisinde uçuşa başladıkları ilk istasyon ve gün sonundaki son uçuşun gerçekleştirildiği istasyon dikkate alınmıştır.

Bakım istasyonunun hangi hava alanlarına kurulacağı problemi, değişkenlerin tamsayı kısıtına sahip olduğu minimum maliyetli çok ürünlü serim akış problemi olarak modellenmiştir. Problem, boyutu çok büyük olduğu için iki aşamalı sezgi kullanılarak çözülmüştür. 1987 yılında 300'ün üzerinde uçakla 150 şehire uçan American Airlines'ın 7 günlük planlama periyodu için model 945,150 ikili değişken, 2,100 gerçek değişken ve 411,300 kısıttan oluşmuştur.

Büyük ölçekli bir karma tamsayı probleminin, etkin bir şekilde çözülebilmesi için problem ilk olarak filo ve uçak tiplerine göre ayrıştırılmıştır. İkinci olarak, nadiren bağlayıcı olan hava alanlarındaki bakım alanı kapasite kısıtı modelden çıkarılmıştır. Yazarlar, elde edilen model hala oldukça büyük olduğu için iki aşamalı sezgi geliştirmiştir. Birinci aşamada, uçağın bakım gereksinimlerini sağlaması konusunda ısrarcı olmadan uçağın kuyruk numarasına göre en iyi başlangıç-bitiş uçuş tarifesi oluşturulmuştur. İkinci aşamada, A kontrol gereksinimini karşılayacak şekilde bakım istasyonlarının konumlandırılacağı yeri tespit eden küme kapsama problemi Chvatal's sezgisi kullanılarak çözülmüştür. Yazarlar, rassal olarak uçuş bacaklarının iptal edilmesiyle oluşacak bakım ihlallerini görmek için duyarlılık analizleri gerçekleştirmiştir. Amerikan Hava Yolları'nın veri tabanında en fazla uçak sayısına sahip olunan 727 filosunun bakım merkezlerini tespit etmek için kullanılan model, mevcut 22 olan bakım merkezi sayısının 17'ye indirilmesinin, uçuş operasyonlarını etkilemeyeceğini göstermiştir. IBM 3081 merkezi işlem bilgisayarında problemin birinci aşaması 11 dakikada, bütün problem ise 110 dakikada çözülmüştür.

Kabbani ve Patty (1992), Amerikan Hava Yolları için her üç günde bir uçaklara uygulanması gereken kontrol bakımı için uçak bakım rotalama problemini incelemişlerdir. Yazarlar problemi, sütunların hafta boyunca olası rotaları ve satırların uçuşları temsil ettiği küme belirleme modeli olarak formüle etmişlerdir. Bağlantı zamanlarının ihlali, bakım ihlalleri ve sürekli akışın ihlal edilmesi gibi istenilmeyen özelliklere sahip rotalara ceza vermek için yalancı maliyeti (pseudo-cost) geliştirilmiştir. Amerikan Hava Yolları'nda MD-88 filosunun bakım rotalama probleminin çözümünde elde edilen model çok büyük olmuştur. Bu yüzden problem, iki alt probleme bölünmüştür. İlk olarak, sabah ayrılan ve geceleyin dönen ardışık uçuş bacakları sabitlenerek gün içerisindeki

uygun rotalar belirlenmiştir. Daha sonra bu rotalar arasındaki bağlantılar için problem yeniden çözülmüştür. Alt problemdeki yaklaşımla uygun çözüm bulunamadığında, ikincil hava alanlarında ya uçuşların değiştirilmesiyle ya da rotaların değiştirilmesiyle uygun çözüm oluşturulmaya çalışılmıştır. Çalışmada en az olması istenilen şey, yolcu uçuş servislerinin karışması nedeniyle merkezi hava alanlarında günlük bağlantıların değiştirilmesi olmuştur.

Gopalan ve Talluri (1998), uçuş tarifesine filo atanması yapıldıktan sonra ortaya çıkan temel problemlerden biri olan hava yolu işletmelerinin bakım rotalama problemini US Air için incelemiştir. Gopalan ve Talluri (1998), her uçağın en geç her üç günde bir girmesi gereken rutin kontrol olarak da adlandırılan A bakım ve belli bir periyotta uygulanması gereken dengeli kontrol olarak da ifade edilen çeyrek C bakım için bakım rotalama problemini Eulerian tur problemi olarak modelleyerek çözmüştür. Çeyrek C kontrolü olarak da adlandırılan dengeli kontrolün, “n” tane uçağı bulunan bir filo için “n” günde bir gerçekleştirileceğı ve uçağın gece boyunca bakımın yapılabilecek yeterlilikteki bir bakım merkezinde kalacağı kabul edilmiştir. Dengelin bakımın belli merkezlerde yapılabilmesi, rotalamayı bağlantılı olmaya zorlamıştır.

Serim yapısında, arkların uçuş hatlarını, düğümlerin ise hava alanlarını temsil ettiği zaman hattı serim yapısı kullanılmıştır. Uçuş hatlarının, bakım gereksinimlerini karşılayacak rotalar olacağı garanti edilmemiştir. Günlük rotalar önceden oluşturulmuştur. Uçuş hatları, ilk giren ilk çıkar veya son giren ilk çıkar gibi basit kısıtlar kullanılarak gün içerisindeki gecelemin olmadığı istasyonlardaki bütün bağlantıların sabitlenmesiyle oluşturulmuştur. Sonuç olarak, günlük bağlantıların sabitlenme prosesi sonucunda ortaya çıkan serim yalnızca uçakların gecelediğı istasyonlarını kapsamış ve istasyonlar arasındaki sıra sabitlenmiştir.

Sözk konusu çalışmada iki farklı model analiz edilmiştir. Bu modellerden birincisi, sonsuz bir periyot içerisinde uçulan hatlarının her gün aynı olduğu kabul edilen statik bir model, ikincisi ise belli bir periyot içerisinde uçulan hatların günden güne değiştiğı dinamik modeldir. Birinci model, iç hat uçuşlarında hafta içi uçuşları sabit kaldığı için daha gerçekçidir.

Yazarlar indirgenmiş serimde 3 günlük bakım gereksinimini dikkate alarak uçakları rotalara atamıştır. Algoritma ya uygun kuyruk rotalama bulunduğu ya da uygun olmayan durumla karşılaşıldığında son bulmuştur. Gerçek bakım rotalamasından önce günlük bağlantıların sabitlendiği bağımsız süreç kolay bir şekilde kilitlenmiş rotasyon oluşturabilir. Bu durumda yazarlar ya uçuşları ya filoları ve hatta aynı anda ikisini birden değiştirerek kilitli durumdaki rotasyonu çözmeye ve bakım rotalamasını geliştirerek eniyi sonucu bulmaya çalışmışlardır. Uçuşlar arası gerçekleştirilen transit kontroller oldukça kısa zaman alır. Transit kontrol bakımını yapmak için gerçek kapasite sınırı olmadığı kabul edilmiştir. Dengeli kontrol, önemli sayıda bakım personeli gerektirmiş ve yalnızca bir tane dengeli bakım istasyonunun olduğu kabul edildiği için her gece yalnız bir tane dengeli bakım kapasite kısıtı kullanılmıştır.

Clarke ve ark. (1997) uçak rotasyon problemini, sık olan A kontrollerini düzenli bir şekilde aralarında uygun süre olacak şekilde nasıl düzenleneceği konusunu ele alırken, kesintisiz uçuş değerini en büyükmeyi amaçlamıştır. B, C ve D kontrol gereksinimi, uçak rotasyon probleminde dikkate alınmamıştır. Kullanılan uçuş tarifesinin her gün aynı olduğu kabul edilmiştir. Çalışmada çapraz arkların uçuşları, yatay arkların yerdeki duruşları temsil ettiği zaman hattı serim yapısı kullanılmıştır. Karar değişkeni, birbiri ile bağlantısı olan uçuş arklarını temsil eder. Yazarlar, başlangıçta problem için Euler turun maksimum değerini bulan bir model oluşturmuştur. Bu model, bakım kısıtını içermediği için bağlantısız uçuş problemi olarak adlandırılır. Bağlantısız uçuş problemi, en büyükleme asimetrik gezgin satıcı problemi olarak çözülmüştür. Bu durum, birbiri ile bağlantısı olan arkların düğümleri temsil ettiği yeni bir yönlü serim (digraph) ile gösterilerek açıklanmıştır. Yeni oluşturulan yönlü serimdeki arklar arasındaki bağlantılar, bağlantısız uçuş değerlerini temsil etmiştir. Model, birbiri ile bağlantısı olan düğümler arasından kesintisiz uçuş değeri en büyük olanı tespit etmeyi amaçlamıştır. 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 yöntemiyle çözülmüş, bakım ve alt tur kısıtlarda

relaksasyon yapılmıştır. Çözüm süresini ve serim yapısını kısaltmak için ön süreçler uygulanmıştır.

Desaulniers ve ark. (1997), günlük uçak rotalama ve çizelgeleme problemini, belli bir heterojen uçak filosu için bir günlük periyot içerisinde operasyonel uçuş bacak kümesi, ayrılış zaman penceresi, uçuş süresi, her uçuş bacağı için uçak tipine göre gelir ve maliyetleri bilinen, belli ilave kısıtları da sağlayan ve işletme karını en büyükmeyi amaçlayan bir filo programının bulunması şeklinde incelenmiştir. Yazarlar, günlük uçak rotalama ve çizelgeleme problemi için küme belirleme tip formülasyon ve zaman kısıtlı çok ürünlü serim formülasyon olmak üzere iki model hazırlamıştır. Her iki tamsayı programlama modeli, dal ve sınır algoritması ile çözülmüştür. İncelenen problemin diğer çalışmalardan farklı olduğu nokta, ayrılış zaman pencere aralığıdır. Uçuş ayrılış zaman pencere aralığı oldukça dar bir aralıkta kaldığı sürece, bunun yolcu talebini etkilemeyeceği kabul edilmiştir. Birinci modelde, karar değişkeni uçak tipinin atanacağı programdaki rotayı temsil etmiştir. Amaç fonksiyonunda, işletme karı en büyüklenmiştir. Üst sınırı elde etmek için küme belirlemenin doğrusal relaksasyonu sütun türetme yaklaşımı kullanılarak çözülmüştür. Her uçak tipi için umut verici program oluşturan bir alt program bulunmuştur. Alt problemin çözümü, uçuş bacaklarının ayrılış zamanını temsil eden kısıtlandırılmış zaman kısıtı kullanılarak en uzun yol algoritmasıyla elde edilmiştir. Çözümün uygun olması için programın ayrılış zaman ile ilgili zaman pencere kısıtını sağlaması gerekmiştir.

İkinci modelde ikili değişkenlerin, belirli bir uçak tarafından gerçekleştirilen iki uçuş bacağı arasındaki olası bağlantıları temsil ettiği kabul edilmiştir. Zaman kısıtlı çok ürünlü serim akış problemini doğrusal relaksasyon ile çözmek için Dantzig-Wolfe ayrıştırma yöntemi kullanılmıştır. Her uçak tipi için, zaman hattı serimindeki değişkenler, birinci modelin sütun türetme çözüm yaklaşımındaki benzer olarak kullanılmıştır. İkinci formülasyon, alışılmış akış değişkenli ve aynı zamanda zaman değişkenli çok ürünlü serim akış modelini ortaya çıkarmıştır. Bu çalışmadaki modelde esnek ayrılış zamanlarına ilaveten mevcut yapılan çalışmalardaki tüm kısıtlar kullanılmıştır.

Kuzey Amerika ve Avrupa'daki iki hava yolundan sağlanan gerçek veriler ile yapılan sayısal sonuçlar, akış değişkenlerinde yapılan dallanmanın daha etkili sonuçlar verdiğini göstermiştir. Filo ataması ve uçak rotalama problemleri geleneksel olarak problemlerin boyutunun büyüklüğü nedeniyle ayrı ayrı çözülmüştür. Bakım kısıtlarının göz ardı edilmesi Desaulniers ve ark. (1997)'na problemin boyutunu azaltma imkanı vermiştir. Hazırlanan her iki modelde de bakımın dikkate alındığını belirten herhangi bir bilgiye rastlanılmamıştır.

Barnhart ve ark. (1998), uçakların düzenli olarak programlı bakıma girmesini sağlarken, aynı zamanda direkt gelirleri kapsayacak şekilde filo atama ve rotalama problemini çözmüştür. Mevcut önceki yapılan çalışmalarda, filo atama sonucunda elde edilen sonuçların uçakların her biri ayrı olarak düşünülmediği için uçakların yeterli bakım fırsatına sahip olmadığı ve modellerin kesintisiz uçuş gelirini dikkate almadığı vurgulanarak, yapılan çalışmada bu eksikliğin giderildiği, filo atama ve uçak rotalama probleminin eş zamanlı olarak çözüldüğü belirtilmiştir. Model daha sonra genişletilerek çözüm yaklaşımıyla uçakların eşit oranda kullanımlarını sağlayan kısıt ile de uçak rotalama probleminin de çözülebileceği gösterilmiştir. Havayolu işletmelerinden sağlanan veriler ile geliştirilen modelin ispatı yapılmıştır.

Bir bakım istasyonunda başlayan ve bir bakım istasyonunda son bulan ardışık olarak bağlantılı şekilde gerçekleştirilen uçuşlar dizi olarak adlandırılmıştır. Diziler, serimin akış dengesini ve FAA tarafından zorunlu tutulan programlı bakım ile ilgili gerekli kısıtları sağlamıştır. Arttırılmış dizi, bir bakım istasyonunda son bulan dizideki son uçuşun sonuna uçak için gerekli bakım zamanının ilave edilmiş haline verilen isimdir. Bakımlar arasındaki zaman dört günle sınırlandırılırken, bu süreçteki uçuş zamanına bir sınırlama konmamıştır. Amaç fonksiyonu, arttırılmış dizilerin toplam maliyetlerini enküçüklemeyi amaçlamıştır. Her uçuş kategorisine bir filo atanmış ve her filoya atanan uçuşlar bir rotasyon kümesine dönüştürülmüş, filodaki uçaklara en fazla bir rotasyon atanarak maliyetler enküçüklenmiştir. Dizi tabanlı filolama ve rotalama modeli, dal ve ücret algoritması kullanılarak çözülmüştür. Bununla birlikte, kuyruk numara ataması açık değildir. Bu durumda filo ataması yapıldıktan sonra uçakların rotasyonlara atanması için başka bir prosedür kullanılmıştır.

Bütünleşik filo ve rotalama modeli, her filo için bir tane olmak üzere uçuş kümesinin ve yer kümesinin ark kümesiyle, varış ve ayrılışların ise düğüm ile temsil edildiği yönlü zaman hattında oluşturulmuştur. Kesintisiz uçuş geliri ve bakım maliyetleri, serimdeki arklara zaman hattı seriminde doğrudan atanmak üzere belirlenemediğinden çalışmada bağlantı serimi de kullanılmıştır. Bütünleşik filo ve rotalama modelinin haftalık programı, 1124 uçuş, 40 şehir, 9 filodan toplam 89 uçaktan oluşan uzun menzilli (uluslararası uçuşlar) hatta çalışan bir hava yolundan sağlanan veriler ile test edilmiştir. Klasik yöntemle, dokuz filonun beşinde bakım için uygun uçak rotalama elde edilemezken, önerilen çözüm yaklaşımı ile yaklaşık beş saat çözüm zamanı ile bakım gereksinimlerini sağlayan çözüm elde edilmiştir.

Çalışmanın genişletilen kısmında, filo atama problemi, önceden çözülen ve eşit kullanım oranına sahip olması istenilen uçakların rotalama problemini bağlantı kısıtının ilave edilmesiyle incelenmiştir. Uzun bir periyot içerisinde, belli bir filodaki uçakların belli bir programdaki uçuşları sırasıyla gerçekleştirmesi ve benzer koşullarda çalışması sonucunda uçakların birbirine yakın bakım geçmişine ve eşit kullanım oranına sahip olacağı kabul edilmiştir. Genişletilen model, bağlantı serimi kullanılarak oluşturulmuştur. Bu aşamada kısa menzil rotalama problemlerinin çözümünde, dal ve ücret ve kesme (branch and price and cut) algoritması kullanılmıştır. İncelenen problemlerin çözüm zamanı bağlantı kısıtı olmaksızın en fazla 3.7 saat iken, bağlantı kısıtı ile birlikte 10 saatin altında sonuç vermiştir. Çalışmada, daha çok uzun dönemli planlama dikkate alınmıştır. Önerilen çözüm yaklaşımı, günlük uçak rotalama problemi için her hangi günlük kaynak kısıtlarını veya beklenmeyen program bozukluklarını dikkate almadığı için her zaman uygun çözümü garanti etmemiştir.

Talluri (1998) bir uçağın, en fazla dört gün uçuktan sonra bir bakım istasyonunda gecelemesini ve her “n” günde bir denge kontrolüne girecek şekilde rotalanmasını gerektiren uçak bakım rotalama problemini incelemiştir. Denge kontrolündeki “n” gün, filoda yer alan uçak sayısını gösterir. Dengeli kontrollerin yapıldığı her filo tipi için bir bakım istasyonunun olduğu kabul edilmiştir.

Uçağın en fazla dört gün uçuktan sonra gerçekleştirilmesi gereken transit kontrollerin, gerçekleştirilmesi için oldukça kısa zaman aldığı ve kontrol bakımını

yapmak için gerçek kapasite sınırı olmadığı kabul edilmiştir. Bununla beraber, dengeli kontrol önemli sayıda bakım personeli gerektirdiği ve yalnızca bir tane dengeli bakım istasyonunun olduğu kabul edildiği için her gece yalnız bir tane dengeli-bakım kapasite kısıtlaması kullanılmıştır. Bakım istasyon sayısı bir tane olduğunda, dört günlük bakım Euler Tur probleminin uygun iki parçalı uyumlu problemin çözümüyle çözülebileceği gösterilmiş ve problem polynominal zamanda çözülmüştür. Modellerin hepsinde aynı uçuş tarifesinin belli bir periyot için her gün tekrarladığı ve bu periyot içerisinde her gün programda yer alan uçuş bacalarına aynı uçak tipinin atandığı kabul edilmiştir.

Gün içi aktiviteleri tanımlayan uçuş hatları kümesinin verildiği kabul edilmiştir. Modelde bu uçuş hatları kümesi içerisinde bakım gereksinimini sağlayan rotalamanın olup olmadığı tespit edilmeye çalışılmıştır. Rota problemi için çözüm yaklaşımında gün içerisinde uçak rotalaması sabitlenerek, bir günlük periyotta rotalama kümesinin bütün uçaklar için gece bakım gereksinimini karşılayıp karşılamadığı tespit edilmiştir. Eğer küme gerekli koşulları taşıyorsa uçuş hatları değiştirilerek uygun uçak rotalaması bulunmaya çalışılmıştır. Uçuş hatlarının sabitlendiği kısım için sezgisel prosedüre güvenilmiştir. Sezgisel prosedür, son rotalama problemi için gerekli koşulların elde edilmesini sağlamak için kullanılmıştır.

Bakım rotalama açısından Euler Tur, bir uçağın en fazla üç gün bakım yapılamayan hava alanından geçtikten veya konakladıktan sonra bir bakım yapılabilen istasyonda konaklamasının sağlanması şeklinde yorumlanmıştır. Ayrıca, Euler tura bağlı olarak her uçak denge kontrol istasyonundan her “n” günde bir geçmiştir. Dört günlük Euler bakım turu için gerekli bir koşul Euler Turun oluşturulmasıdır. Bunun için turun bağlantılı ve her düğüme giren ve çıkan uçak sayısının eşit olması gerekmiştir. Oluşturulan uçuş hatları grafiğinin her zaman bağlantılı olduğu kabul edilmiştir. Denge kontrol ziyaret gereksinimi olmadan bile dört günlük problemin bile polynominal zamanda çözülebileceği gösterilmiştir.

Ioachim ve ark. (1999), filo rotalama ve çizelgeleme problemini haftalık periyot için yeni bir kısıt kullanarak ve çok ürünlü serim akışı olarak modellemiştir. Aynı uçuş numarasının haftanın her günü uçulduğu kabul

edilmiştir. Yeni kısıt, haftanın her günü için aynı uçuş numarasına ait ayrılış zamanlarını senkronize etmek için kullanılmıştır. Modelde heterojen uçakların bakım ve diğer özellikleri ile ilgili kısıtlamaların bulunduğu gereksinimler dikkate alınmamıştır. Uçuş ile ilgili veriler, uçuşların başlangıç-varış noktası ve uçuşun ayrılış veya varışı ile ilgili zaman penceresinden oluşmuştur. Zaman penceresi içinde ve öncesinden izin verilen bekleme maliyetine yer verilmemiştir. Modelin çözümünde, sınırların Dantzig-Wolfe ayrıştırması metodunun genişletilerek kullanılarak hesaplandığı, eniyi dal ve sınır metodu önerilmiştir. Temel problem; uçuş kapsam kısıtı ve program senkronizasyon kısıtlarından, bunlara karşılık gelen alt problemler zaman değişkenlerinin doğrusal maliyetli olduğu zaman pencereli en kısa yol problemleri olarak oluşturulmuştur. Çoğu alışılmış araç rotalama ve mürettebat çizelgeleme problemlerinde olduğu gibi veya temel problemin değişkenleri sıfıra sabitlenerek dallandırma kararı uygulanmamıştır. Tamsayı çözüm elde etmek için çözüm üretme sürecinde dal ve sınır planı uygulanmıştır. Dallandırma kararı, zaman değişkenleri üzerinde uygulanacak şekilde tasarlanmıştır. Sayısal deneyler, Avrupa'daki havayolu işletmelerinden elde edilen haftalık filo atama ve çizelgeleme problemlerinin verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test problemlerinde, eniyi değerler bulunmuştur. Alt problemlerin çözüm zamanının oldukça kısa olduğu ve birkaç iyileştirmeden sonra temel problemin çözüm zamanının da belirgin bir şekilde çok kısa olduğu gözlenmiştir.

Moudani ve ark. (2000), uçuşlara uçakların atanması ve filo bakım operasyonunun programlanması problemini inceleyerek, on-line operasyonlar için dinamik bir yaklaşım önermiştir. Önerilen yaklaşımda, dinamik programlama yaklaşımı filo atama probleminin üstesinden gelirken ve sezgisel yaklaşım iç içe girmiş bakım programlama problemini çözmek için kullanılmıştır.

Filo atama probleminin matematiksel formülasyonun da amaç fonksiyonu, iki parçadan oluşmuştur. Birinci kısım, verimli ticari uçuşların operasyon maliyeti ile ilişkilidir. İkinci kısım, ticari olmayan bir uçuş için uçakların bir noktadan başka bir noktaya uçuşu durumunda oluşan transfer maliyetinden oluşmuştur. Kısıtlardan biri her uçuş için uçakların teknik özelliklerine göre uçuşlara atanmasını, diğer kısıt kümesi belirli uçakların eş

zamanlı olarak farklı uçuşlara atanmamasını sağlamıştır. Filo atama problemi çözüldükten sonra ikinci adımda bakım programlama problemi çözülmüştür. Bakımın yapılacağı zaman dilimlerinde, uçaklar yapay uçuşlara atanmıştır. Bakım kısıtları, bağımsız bakım programlama problemlerinin çözümüyle dikkate alınmıştır.

Önerilen çözüm stratejisi, üç farklı merkezde bakım merkezi olan ve uçak kiralama (charter) hizmeti veren bir şirkette uygulanmıştır. Amaç fonksiyonunun birinci kısmındaki maliyet, filoda benzer uçaklar olduğu için sabit kabul edilmiştir. Altı aylık bir süreçte 3000 uçuş için model Pentium işlemciye sahip bir PC bilgisayarında Visual FoxPro yazılımı kullanılarak çalıştırılmıştır. Sonucun mevcut yapay zeka ve matematiksel programlar tarafından elde edilen çözüm zamanından kısa olduğu gösterilmiştir. Altı uçak için 100 saniye, on uçak için 200 saniye ve yirmi uçak için 400 saniye civarında ilk çözümler elde edilmiştir. Farklı uçuş planları ve bakım kısıtları dikkate alınmış ve önerilen çözüm metodu ile elde edilen çözümlerin fazlasıyla uzun olan manüel prosedürlerden önemli oranda başarılı olduğu gösterilmiştir. Önerilen yaklaşım tam bir matematiksel çözüm üretmemiştir. Çalışmada, sezgisel yaklaşım ile ilgili olarak ayrıntılı bilgi verilmemiştir.

Cordeau ve ark. (2001), eş zamanlı uçak rotalama ve mürettebat programlama problemini doğrusal olmayan kaynak kısıtlı çok ürünlü serim akışı olarak modellemiştir. Model, uçak bakım kısıtlarına ilave olarak önemli olan mürettebat programlama kısıtlarını da içermiştir. Kaynak kısıtları, bakım gereksinimini dikkate almıştır. Model, Bender ayrıştırması ile dal ve fiyatlandırma (branch and pricing) yöntemi birlikte kullanılarak modellenmiştir. Fiyatlandırma problemi, kısıtlandırılmış en kısa yol algoritmasıyla çözülmüştür. Eş zamanlı uçak rotalama ve mürettebat programlama için oluşturulan modelde ilk olarak Bender ayrıştırması kullanılmıştır. Ayrıştırmanın sonunda, hem temel problem hem de alt problem sütun türetme yöntemiyle çözülmüştür. Sezgisel dal ve sınır metodu, tamsayı çözümü hesaplamak için kullanılmıştır.

Test örneklerini oluşturmak için, büyük bir Kanada havayolu işletmesinden yararlanılarak toplam 3205 kısa menzil uçuş bacağına içeren haftalık programdan yararlanılmıştır. Çalışmada kullanılan veriler popüler toplu

dağıt uçuş serim yapısını yansıtmamıştır. Çalışmada, filo atama probleminin önceden çözüldüğü ve mürettebatın tek bir uçak tipinde uçabilecek nitelikte olduğu kabul edilmiştir. Gereken filo boyutunu tahmin etmek için haftalık uçak rotalama problemi çözülmüş ve uçakların başlangıç pozisyonları tahmin edilmiştir. Test örneğinin oluşturulmasındaki son aşamasında, planlanan başlangıç periyotta, başlangıç pozisyonlarına ilave olarak gerekli mürettebat sayısını tespit etmek için mürettebat programlama problemi çözülmüştür. Mürettebat atama problemi çözüldüğünde, mürettebatın en fazla dört gün çalıştıktan sonra kendi ana üslerine dönmeleri sağlanmıştır.

Test örneklerinde bir günden bir sonraki güne uçulmakta olan uçuş bacakları kümesi önemli oranda değişiklik göstermiştir. Bu yüzden, problemin günlük olarak çözülmesinin uygun olmayacağı ifade edilerek bir seçenek olarak haftalık veya aynı saate tesadüf eden zaman periyotlarında daha kısa ardışık alt problemler olarak çözülmüştür. Çözülen en büyük örnek 3 günlük periyot içerisinde 500'den fazla uçuş bacağına içermiştir. Eş zamanlı uçak rotalama ve mürettebat programlama problemi, her uçak tipi için bir probleme ayrıştırılmıştır. Zorunlu olan bakım gereksinimleri, çoğu havayolu işletmesi tarafından her 3 veya 4 günde bir gerçekleştirilen rutin kontrollere karşılık gelmiştir. Diğer bakım kontrolleri, modelde açık bir şekilde dikkate alınmamıştır. Her uçağın en azından her 4 günde bir bakımın gerçekleştirilebileceği dört şehirden birinde minimum 8 saat yerde geçirmesi zorunlu tutulmuştur. Çalışmada, zaman hattı serimi kullanılmıştır.

Belirli bir uçak tarafından uçulmakta olan ve uçuş bacakları belli küme için problem, uçak rota kümesine ve mürettebat eşleştirme maliyetinin enküçüklenmesi amaçlanmıştır. Her uçuş bacağına tam olarak bir uçak ve bir mürettebat tarafından kapsanmasını sağlayan kısıt, bağlantı zamanı çok kısa olduğunda mürettebatın uçak değiştirmemesini sağlayan kısıt ile her uçak ve her mürettebatın bir yola atanacağını belirten kısıtlar kullanılmıştır.

Bağlantısız uçuş değeri, uçak rotalama probleminde göz önünde bulundurulmadığı için problemde geriye tek kalan maliyet, filo boyutu belirlendiğinde ve sabitlendiğinde uçuş bacakları ile ilgili olarak operasyonel maliyet olmuştur. Ardışık çözüm yaklaşımında uçakların işletme maliyetleri,

birbirine yakın olduğu için eşit kabul edilmiştir. Bu yüzden uçak rotalama problemi, her uçağın uygun bir şekilde bakım yapılabilmesini sağlayan bir fizibilite problemi olmuştur. Her uçuş bacağı, tam olarak bir mürettebat tarafından kapsanması gerektiği için toplam mürettebat maliyetinin büyük bir kısmı aynı zamanda sabit kabul edilmiştir. Bu yüzden, bu denemelerde dikkate alınan tek maliyet mürettebat eşleşmesinin daha iyi planlanmasıyla azaltılmıştır. Ardışık iki çözüm stratejisi için oluşturulan test kümesi ile eş zamanlı çözüm stratejisinden elde edilen çözümler karşılaştırılmıştır. Bütünleşik yaklaşımın pratikte yaygın olarak kullanılan ardışık planlama süreciyle karşılaştırıldığında sırasıyla 2.3 ve 1.3 milyon dolardan fazla tasarruf sağladığı gösterilmiştir.

Sriram ve Haghani (2003), belli bir uçuş tarifesinde hangi uçağın, hangi başlangıç-bitiş çiftine atanacağına, her uçağın ne zaman ve nerede A ve B türü bakım kontrollerini gerçekleştirileceğine karar verilmesini içeren uçak bakım programlaması ve yeniden uçak atama problemini incelemiştir. İncelenen problemin kapsamı, haftalık iç-hatlar uçuş tarifeleriyle sınırlandırılmıştır. Uçuş aktivitelerinin gerçekleştirilmediği akşamın geç saatleri ile sabahın erken saatleri arasındaki süreçte, rutin olarak bakım yapıldığı kabul edilmiştir. Bakım maliyetlerinin ve başlangıç-bitiş çiftine yeniden uçak ataması yapılması durumunda oluşacak ceza maliyetlerinin toplamının enküçüklenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, heterojen bir uçak filosu için 7 günlük çevrimsel bir program hazırlanırken bakım kısıtları da dikkate alınarak havayolu işletmesinin karşılaştığı problem göz önüne alınmıştır. Bu yüzden bakım programlama problemi, uçak uçuş bacaklarına atandıktan sonra çözülmüştür. Bakım programlama probleminde eniyi çözümü bulabilmek için bazı uçakların uçuş bacaklarına yeniden atanması gerekmiştir. Yazarlar, heterojen bir uçak filosu için hem A türü bakım kontrolü hem de B türü bakım kontrolünü dikkate almıştır.

Bakım programlama problemi, girdi olarak uçuşların başlangıç-bitiş programlarının kullanılmasıyla değişkenlerinde tamsayı kısıt olan minimum maliyetli çok ürünlü serim akış modeli olarak modellenmiştir. Uçaklar, tek tek olarak değil, filo olarak dikkate alınmıştır. Yedek parçaların bir biriyle değiştirilmeyecek olması ve teknisyen-bakım alanı kısıtının göz ardı edilmesine rağmen, sonuç doğrusal modelin relaksiyonunu, minimum maliyetli çok ürünlü

tamsayı akış problemi olarak çözebilme olasılığı çok azdır. Problemi, doğrusal model olarak çözerek global eniyi çözümü bulmak hemen hemen imkansız olduğu için yazarlar sezgisel bir metot önermiş ve hipotetik olarak oluşturdukları veriler ile test etmişlerdir. Sezgisel metot da, derinlik öncelik arama (depth first search) ve rassal aramanın birleşimi kullanılmıştır.

Bakım programlamasında; yolcu talebi, gelir, koltuk kapasitesi, yakıt maliyeti, mürettebat sayısı ve bakım maliyetleri gibi faktörler dikkate alınmıştır. Bu faktörlerin çoğu, karar değişkenlerinde amaç katsayısıyla, diğerleri kısıtlar yardımıyla elde edilmiştir. Bu model, uçağı uçuş serimii boyunca dolaştırmaya zorlayan denge kısıtlarını sağlamıştır. Amaç fonksiyonu, A tipi bakım kontrolünün toplam maliyeti, B tipi bakımın toplam maliyeti ve uygunsuz uçağın başlangıç-bitiş uçuşuna atanmasının ceza maliyetleri toplamlarından oluşmuştur. Çalışmada, hava alanlarının A ve B türü bakım kapasite kısıtları, hava alanı denge kısıtı ile her uçuşa bir uçağın atanması ve belirlenen periyotlarda uçakların A ve B tipi bakıma girmesini sağlayan kısıtlar kullanılmıştır. Programda yer alan hava alanlarında A tipi bakım tipinin farklı maliyetler ile gerçekleştirildiği kabul edilmiştir. CPLEX'in kullanıldığı 20 şehirli ve 13 uçağı sahip bir problemin çözüm süresi yaklaşık olarak 4.5 saat almıştır. Önerilen sezgisel yaklaşımla aynı problem, 72 saniyede çözülmüştür. Eniyi ve sezgisel yaklaşım arasındaki fark %2.7'dir. Bu fark, çalışmada kullanılan problemlerde en çok %5 olmuştur.

Sarac ve ark. (2006), günlük uçak bakım rotalama probleminde, bakım istasyonlarındaki kullanılabilir adam saat ve bakım alanı kaynak kısıtlarını da dikkate alarak her uçağın yasal kalan uçuş saati ihlal edilmeksizin uçakların toplam bakım maliyetleri enküçüklenmiştir. Problemin eniyi sonucu hem toplam bakım maliyetlerini minimum etmiş hem de bakım personelinin ve ekipmanın istasyondan istasyona dolaşmasını azaltmıştır. Bir uçak için günlük uçak bakım maliyetlerini hesaplamak ve tanımlamak zor olduğu için, birincil amacın üstesinden gelmek için aynı amacı sağlamak üzere bir uçağın kullanılmamış toplam yasal kalan uçuş saatinin en aza indirilmesi amaçlanmıştır.

Bir uçağın toplanan/biriken uçuş saati önceden tanımlanmış bir seviyeye ulaştığında, uçak yüksek zamanlı uçak olarak sınıflandırılmıştır. Uygun bir çözümde bütün yüksek zamanlı uçaklar, belirli bir gün için uygun bir bakım

istasyonuna rotalanmıştır. Bütün yüksek zamanlı uçaklar için bakım, günün sonunda gece boyunca kalacağı istasyonda gerçekleştirileceği ve problemin zaman periyodunun bir gün olduğu kabul edilmiştir. Kaynak kısıtı nedeniyle, bu problemi çözmek için dal ve ücret 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 bacağına bulunmadığı noktada, dallandırmaya devam edebilmek için yeni dallandırma planı kullanılmıştır. Bu plan yalnızca, en iyi koşullar onaylanmadığında ve klasik dallandırmaya 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.

Çalışmada, düğümlerin uçuş bacaklarını ve arkların uçuş bacakları arasında uygun bağlantıları temsil ettiği bağlantı serim yapısı kullanılmıştır. Karar değişkenlerinin uçak için uygun rotayı temsil ettiği küme belirleme tabanlı çözüm yaklaşımı kullanılmıştır. Modelde temel olarak dört kısıt kümesi vardır; uçak kapsam kısıtı, uçuş bacak kapsam kısıtı, bakım için adam-saat kullanılabilirliği ve bakım için hangar alanı kullanılabilirliği kısıtları. Ön süreç, bağlantı seriminin yapısını basitleştirmek için gereksiz bağlantı arklarını elemek için kullanılmıştır. Bu ön süreç, bağlantı seriminin özelliklerini değiştirmeksizin problemin boyutunu azaltmıştır.

Çalışmada, önerilen dal ve ücret algoritması C++ programlama dili kullanılarak geliştirilmiştir. Programda ticari yazılım CPLEX 7.5 ikil simpleks kullanılarak, sınırlandırılmış temel problemin doğrusal program relaksiyonunu çözmek için doğrusal program, en iyileme motoru olarak kullanılmıştır. Algoritma ve sayısal işlemler, Dell Dimension 8100'de gerçekleştirilmiştir.

Veriler, bir Amerikan havayolu şirketinin yayınlanmış uçuş tarifelerindeki verilerin bir kısmının dengeli hale getirilmesiyle sağlanmıştır. Program 14 şehirde uçakların geceleyebildiği, bunlardan 5'inde bakım yapılabilen istasyonların olduğu toplam 19 şehri ve 175 uçuş bacağına içermektedir. Daha sonra, bu uçuş-bacak serimiyle bütün uçuş bacaklarını kapsayacak şekilde gereken

alt filo sayısı tespit edilmiştir. 32 uçağın bütün uçuş bacak kümesini kapsayacak şekilde yeterli olduğu görülmüştür.

Dengelenmiş uçuş bacak kümesi ve onun alt kümesi elde edildikten sonra ilk olarak geliş güzel bir uçak için özel veriler oluşturulmuştur. Uçağın, yasal kullanılabilir uçuş saatine bakılarak bakım limitine yakın olup olmadığı tespit edilmiştir. Uçaklar bakım uygulanacak uçak kümesine girdiğinde, uçağın bakım gereksinimi, uçağın bakım adam saat gereksinimi (6 ve 10 saat arasında olduğu kabul edilmiştir) ve uçağın yasal kalan uçuş saati (10 ve 20 saat arasında aynı dağılımı takip ettiği kabul edilmiştir) ile birlikte oluşturulmuştur. Uçağa özgü verilerin bulunmasından sonra geceleme istasyonları için özel veriler oluşturulmuştur. Her bakım istasyonu ve bakım tipi çifti için kullanılabilir bakım adam saat sayısı ve kullanılabilir bakım alanı sayısı, rassal olarak tespit edilmiştir. Bazı örneklerde eğer elde uygun bir çözüm varsa, iki saat sonra programın çalıştırılması durdurulmuştur. Modelin çözüm zamanının performansı, her uçağın başlangıç şehri, serim yapısı, belirli gündeki bakım tiplerinin toplanması, hem adam-saat hem bakım alanı için kaynak kullanılabilirliği vb. gibi çok fazla parametreden etkilenmiştir. Çözüm zamanının hemen hemen %75-80'i rota üretmek için kullanılmıştır. Daha sonra, herhangi bir faktörün istatistiksel olarak bu zaman performans ölçümleri üzerinde önemli bir etkisinin olup olmadığını görmek için ticari istatistiksel yazılım MINITAB 13 kullanılarak iki aşamalı faktöryel analizi gerçekleştirilmiştir.

3.2. Çok Ürünlü Serim Akış Modeli

Çok ürünlü serim akış problemleri, ulaştırma, telekomünikasyon ve lojistik gibi endüstriyel alanlarda ortaya çıkan en iyileme problemlerinin formülasyonunda iyi sonuçlar verir. Çok ürünlü serim akış problemleri, bir serim boyunca minimum maliyetle rotalanacak olan ürün kümesi tarafından tanımlanır. Pratikte ürünleri, telekomünikasyondaki mesajlar, ulaşımdaki araçlar veya lojistikteki eşyaları temsil edebilir. Ürünler, ortak tesisleri paylaştığı için tek yalnız ürün problemleri bağımsız değildir. Bu yüzden, en iyilenmiş akışı bulmak için problem her ürünün birbiri ile ilişkisi dikkate alınarak çözülür. Her ürün bir

veya birden fazla orjin düğümünden, bir veya birkaç varış düğümüne transfer edilebilir. Maliyet, ürün akışının konveks veya konveks olmayan fonksiyonudur ve tek akışlar tamsayı veya sürekli değer olmak üzere kısıtlandırılmış olabilir.

Çok ürünlü serim akışının önemli uygulama alanlarından biri çizelgemedir. Çizelgelemeye örnek olarak, uçuş başlangıç-varış zamanları ve uçak kümesi belli olan ve minimum maliyet ile tüm uçuş bacaklarına uçak atamasının yapıldığı uçak atama problemi gösterilebilir (Babonneau 2006; Ahuja ve ark. 1993).

Temel olarak çok ürünlü serim akış probleminin tamsayı programlama formülasyonu, aşağıdaki gibi tanımlanabilir. K ürün türünü ve $G = (V, I)$ desteklenen serim olmak üzere, “ V ” düğümlerin ve “ I ” arkların kümesini, (v, v') ise v noktasından v' noktasına olan arkı göstermek için kullanılır. Her $v \in V$ için, $G_{\text{Gelen}_v} = \{i | i = (v', v) \in I, v' \in V\}$ “ v ” ye giriş yapan arkları ve $G_{\text{Çıkan}_v} = \{i | i = (v, v') \in I, v' \in V\}$ “ v ” den ayrılan arkları gösterir. $k = 1, 2, \dots, K$ ve $i \in I$ için c_{ki} , bir ünite k türü ürün akışının “ i ” arkı boyunca taşınma maliyetini ve $i \in I$ için u_i , “ i ” arkının kapasitesini gösterir. x_{ki} , “ i ” arkındaki k türü ürün akışını göstermek için kullanıldığında, model aşağıdaki şekli alır:

$$\min \sum_{k=1}^K \sum_{i \in I} c_{ki} x_{ki} \quad (3.1)$$

$$\sum_{i \in G_{\text{Gelen}_v}} x_{ki} = \sum_{i \in G_{\text{Çıkan}_v}} x_{ki}, \quad \forall k = 1, 2, \dots, K \quad v \in V \quad (3.2)$$

$$\sum_{k=1}^K x_{ki} \leq u_i, \quad \forall i \in I \quad (3.3)$$

$$x_{ki} \in \{0, 1, 2, \dots\}, \quad \forall k = 1, 2, \dots, K, \quad i \in I \quad (3.4)$$

Yukarıdaki modelde, (3.2), herhangi bir v düğümünde her k türü ürünü için akışın korunmasını sağlar. (3.3) her “ i ” arkı için kapasite kısıtını ifade eder. (3.4) her arkda her ürün akışı için tamsayı kısıtını tanımlar. (3.3)’teki kısıt, i arkı üzerindeki toplam ürün akış miktarını sınırlandırır (Qi ve ark.2004).

Havayolu endüstrisinin karşı karşıya kaldığı problemin büyüklüğü, doğrusal modelin relaksasyonuna rağmen çok ürünlü serim akış probleminin çözümünü zorlaştırmaktadır. Bu zorluğu aşmak için araştırmacılar, sütun türetme ve Dantzing–Wolfe ayrıştırması gibi özel araçlar geliştirmişlerdir.

3.3. Çok Amaçlı Programlama

Günümüzün rekabetçi global iş dünyasında, en uygun ve kritik kararı alabilme yeteneğine sahip işletmeler çok büyük rekabet avantajı sağlayabilir. Kritik kararların çoğu, zorlu ve birbiriyle çelişen amaçların üstesinden gelinmesi gereken çok amaçlı problemlerdir. Örneğin tedarik zincir yönetiminde, toplam maliyetlerin azaltılması tipik olarak teslimat zamanını azaltan ve ürün kalitesini arttıran amaçlarla çatışır. Bu çelişen amaçlara aynı zamanda iş ve atölye çizelgeleme, envanter kontrol, tesis yerleşimi, portföy yönetimi ve proje yönetimini içeren diğer problem düzenlemelerinde de rastlanır.

Çok amaçlı en iyileme terimi, kararlı bir şekilde en iyilene birden fazla amaç fonksiyonlu problemi sınıflandırmak için kullanılır. Bu problemleri çözmek için bir çok yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan en basiti, en önemli olan amacı seçmek ve diğer önemsiz amaçları göz ardı etmektir. Bazı amaçların göz ardı edilmesi yaklaşımı, kuşkusuz zayıf bir çözüm elde edilmesiyle son bulur. Diğer bir yöntem ise en iyileme için tek bir amacı seçmek ve belli değerler içerisinde olan diğer amaçların değerlerini sınırlandırmaktır. Bu metodun temel dezavantajı, kısıtlandırılmış amaç genellikle uygun çözüm uzayını sınırlandırdığı için en iyi çözümün bulunamamasıdır.

Çok amaçlı en iyileme probleminin çözümü için kullanılan daha geleneksel yaklaşımda birden çok amaç tek bir amaç haline getirilerek amaçlar ölçeklendirilmeye çalışılır. Bu yaklaşım, çok amaçlı en iyileme probleminin formülasyonunu tek çözümlü ve tek amaçlı eniyileme problemine dönüştürür. Bu alternatif tekniklerin kullanımı için motivasyon görevi gören geleneksel metotların en büyük dezavantajları şunlardır (Eskandari 2006):

- Amaçların tek bir amaç haline getirilme ölçeklendirme sürecinde kullanılan öncelik (veya ağırlık) vektörü, büyük oranda son çözümü etkiler.
- Alternatif çözümlerin, en azından öncelik vektörü gibi bazı parametreler değiştirilmeden elde edilmeleri mümkün değildir.
- Eğer amaç uzayı enküçükleme problemleri için konveks değilse, bazı eniyi çözümler asla bulunamayabilir.

- Farklı performans ölçümlerinin homojenliğinde (örneğin; maliyet, ürün kalitesi ve çevrim zamanları) karışıklıklar vardır.
- Eğer amaçlar sürekli olmayan değişken uzayına sahipse, geleneksel yaklaşım etkin bir şekilde çalışmayabilir.

Bu dezavantajlardan birincisi dikkate alındığında, öncelik vektörünün değerinde küçük bir değişiklik, elde edilen çözümü büyük bir oranda etkileyecektir. Her ağırlık çifti w_1 ve w_2 'nin (iki amaçlı problem için $w_2 = 1 - w_1$) belirli değeri için amaç değişim eğrisinde tek bir üstün olmayan noktanın (Pareto-en iyi çözümler) elde edilmesini sağlar. Bununla birlikte, bu sınıf yaklaşımların dezavantajı, araştırmacıları ve uygulamacıları, tek bir çözümden çok, Pareto-en iyi çözümler (üstün olmayan nokta) çözüm kümesini bulan alternatif teknikleri araştırmaya yönlendirmesidir.

Çok amaçlı en iyileme problemleri genel olarak;

$$\text{Min } F(x) = (F_1(X), F_2(X), \dots, F_k(X))^T \quad (3.5)$$

$$\text{s.t. } G(x) = (G_1(X), G_2(X), \dots, G_1(x))^T \quad (3.6)$$

$$X = (X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)^T \quad (3.7)$$

şeklinde ifade edilir. k , amaç fonksiyonu sayısını; n , dizayn değişken sayısını, l , kısıt sayısını ve $S \in \mathbb{R}^n$ çözüm uzayını gösterir (Agrawal 2005).

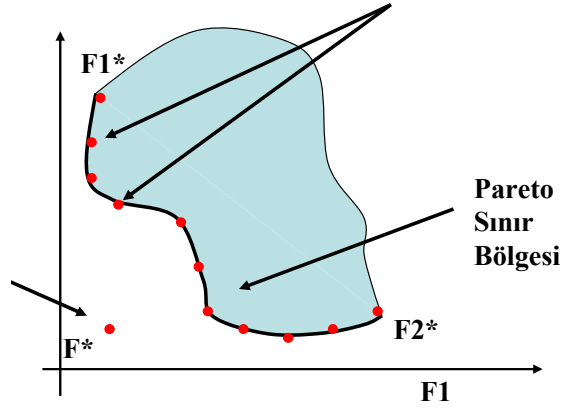
Çok amaçlı en iyileme problemlerinin sonuçları, amaç fonksiyonları arasındaki ilişkiye bağlıdır. Amaç fonksiyonları ve ardışık çözümler arasındaki ilişkiye örnek olarak iki amaç fonksiyonu dikkate alındığında, bu amaç fonksiyonları arasında üç durumdan birisi gözlemlenebilir. Birinci durumda, tasarım değişkenlerindeki değişikliklerle birlikte eş zamanlı olarak her iki amaç fonksiyonu da iyileşebilir. Dolayısıyla amaç fonksiyonları temel olarak ortaktır. Bu durumda, yalnızca bir tane en iyi çözüm vardır. İkinci durumda, amaç fonksiyonlarından biri değiştiğinde diğerinde bir değişiklik oluşmaz. Diğer bir ifadeye, amaç fonksiyonları arasında bir ilişki yoktur. Bu durumda yine yalnızca bir tane en iyi çözüm vardır. Son olarak üçüncü durumda, amaç fonksiyonlarından birindeki iyileşme diğerinde belli bir maliyete neden olur. Bu durumda, en uygun fonksiyonlar çatıştığından, en iyi sonuç bir tane değildir. Fakat, çözüm kümesi eşit oranda önemlidir. Çelişen amaç fonksiyonları çok ilginçtir, çünkü, “kabul

edilebilir” veya “en iyi” çözüm, karar vericinin tercihine ve amaç fonksiyonlarının birisinden vazgeçmesine bağlıdır (Agrawal 2005).

Çözüm stratejisi olarak, çok amaçlı problemler genellikle tek bir amaç fonksiyonu oluşturmak için birleştirilir. Böylece amaç fonksiyonu ile tek bir çözüm elde edilir. Bu yaklaşım kullanılarak bulunan çözüm, birleştirilen amaca bağlıdır. Çok amaçlı problemlerin üstesinden gelmenin daha pratik yolu (tipik olarak çelişen amaç tipleri için), tek bir birleştirilmiş amaca bağlı global en iyiyi araştırıp bulmak yerine, Pareto-en iyi çözümleri veya Pareto kümesi olarak adlandırılan çözüm kümesinin bulunmasıdır. Son çözüm, bütün amaçlardan daha iyi bir çözümün olmadığı Pareto-en iyi çözüm kümesinden seçilir.

3.3.1. Pareto-en iyi çözümler

Vilfredo Pareto, ilk olarak Pareto eniyi kavramını 19. yüzyılda kullanmıştır. Çözüm, herhangi bir diğer uygun çözümle karşılaştırıldığında daha üstün çözüm değilse, Pareto-en iyi çözüm olarak adlandırılır. Örneğin, en azından bir amaç için başka daha iyi bir çözüm ve diğer amaçlar ile karşılaştırıldığında onlara eşit veya daha üstün çözüm yoktur. Bu yüzden, bütün Pareto-en iyi çözümleri eşit oranda önemli ve hepsi global en iyi çözümdür. Matematiksel olarak, uygun bir çözüm olan X^* 'ın Pareto en iyi olabilmesi için başka uygun çözümlerinin olmaması gerekir. Böylece, bütün amaç fonksiyonları için $F_k(X) \leq F_k(X^*)$ ve en azından bir amaç fonksiyonu için $F_k(X) < F_k(X^*)$ ' dir. Bu yüzden, Pareto bir çözüm yerine bir çözüm kümesi verir. Pareto-en iyi çözümler tarafından adlandırılan bölge Şekil 3.1'de görüldüğü gibi Pareto sınır bölgesi olarak adlandırılır. Şekil 3.1'de, F_1^* , F_2^* ,... F_k^* , her amaç fonksiyonunun ayrı minimum değerleridir. F^* ile gösterilen değerler, hayali çözümü tanımlar. Hayali çözümler ideal çözüm olmasına rağmen, aynı anda bütün amaç fonksiyonlarının enküçüklemesi hemen hemen imkansızdır. Bu yüzden, son çözümün seçimi, genellikle hayali çözüme en yakın olan olarak belirlenir (Agrawal 2005).



Şekil 3.1. İki amaçlı problem için Pareto sınır bölgesi (Agrawal 2005).

Pareto-en iyi çözümler, karar verme sürecinde tasarımcılara yardımcı olmak için endüstride yaygın olarak kullanılır. Pareto sınır bölgesi bilgisine sahip karar vericiler farklı amaçlar ile ilgili tercihlerini daha iyi ifade edebilir

3.4. Hedef Programlama

Geleneksel doğrusal matematiksel modellerde, karar vericinin tek bir amaç fonksiyonu ya en büyüklük ya da en küçüklük en iyi değer bulunur. Bu çözüm şekli, sistemin çok sayıda ve büyük bir olasılıkla birbiriyle çelişen amaçlara sahip olabileceği durumlar da söz konusu olabilir. Bu durumlarda, çelişen amaçları en iyi kılan tek bir çözüm bulmak olanaksız olabilir. Bunun yerine, her amacın önem derecesini temel alan uzlaşık çözümler bulunabilir.

Çok amaçlı modeller için hedef programlamadaki temel düşünce, orijinal çok amaçlı problemin tek amaçlı probleme dönüştürülerek çözülmesinden oluşur. Problemin tüm çelişen amaçları için uygun çözüm bulunmayabilir. Bu yüzden, modelin sonucuna genellikle etkin çözüm adı verilir (Boray ve Esnaf 2000).

Bir hedef programlamada karar ve sapma değişkenleri, sistem kısıtlayıcısı ve amaç fonksiyonu bulunur. Bu dört bileşen hedef programlamanın bileşenleridir. Karar değişkenleri doğrusal programlamada tanımlanan değişkenlerin aynısıdır. Sapma değişkenleri ise hedeflerin üstünde veya altında elde edilen faaliyetlerin miktarını belirleyen değişkenlerdir. Sapma değişkenleri hedef programlamada genellikle s_i^+ ve s_i^- simgeleriyle gösterilir. Teknolojik,

yapısal veya sistem kısıtlayıcıları probleme ilişkin geliştirilen hedef programlamada tam olarak sağlanması gereken ve hiçbir sapmaya izin verilmeyen kısıtlardır. Bu kısıtlayıcılar, hedefin dışında kalan \geq , \leq veya $=$ şeklindeki kısıtlayıcılardır. Karar vericinin ulaşmak istediği veya gerekli gördüğü hedefler, hedef programlamaya hedef kısıtlayıcısı olarak aktarılır. Bu kısıtlayıcılar, sistem kısıtlayıcılarına göre daha esnektir. Ayrıca hedeflenen değere hedef kısıtlayıcısı ile ulaşılmaya çalışılır. Önemli olan hedef kısıtlayıcısının iyi belirlenmesi ve hedef programlama modelinde yer almasının sağlanmasıdır (Öztürk 2005).

Hedef programlama modelinin genel şekli;

$$\min z = \sum_{k=1}^k \sum_{i=1}^I P_k (a_{ik}^+ * S_i^+ + a_{ik}^- * S_i^-) \quad (3.8)$$

$$\sum_{j=1}^n t_{ij} x_j - S_i^+ + S_i^- = b_i \quad i = 1, 2, \dots, I; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.9)$$

$$x_j \geq 0, \quad S_i^+ \geq 0, \quad S_i^- \geq 0 \quad (3.10)$$

olarak yazılabilir (Öztürk 2005).

Amaç fonksiyonu $f_i(x)$ 'in amaç seviyesinin dikkate alınmasıyla amaca göre yeniden formüle edilmesi gerekir. Amaçlar, $f_i(x) \leq b_i$, $f_i(x) = b_i$ veya $f_i(x) \geq b_i$ formlarına sahip olabilir. Gevşek veya sapma değişkenleri olan $s_i^+ \geq 0$ ve $s_i^- \geq 0$ 'in eklenmesiyle, amaçlara ulaşabilmek için uygun gevşek değişkenler enküçüklenebilir. Bu gevşek değişkenlerin hedef programlamadaki şekli Çizelge 3.1'de özetlenmiştir (Erwin 2002).

Çizelge 3.1. Hedef programlamada hedef kısıtlayıcıları (Erwin 2002)

Hedef Tipi	Hedef Programlama Formu	En Küçüklenecek Değişken
$f_i(x) \leq b_i$	$f_i(x) - (s_i^+ - s_i^-) = b_i$	s_i^+
$f_i(x) \geq b_i$	$f_i(x) - (s_i^+ - s_i^-) = b_i$	s_i^-
$f_i(x) = b_i$	$f_i(x) - (s_i^+ - s_i^-) = b_i$	$s_i^+ + s_i^-$

Hedef programlamada amaç fonksiyonunun en iyi değeri, sistem ve hedef kısıtlayıcısının belirlediği çözüm alanı içinde aranır. Sapma değişkenleri hem amaç fonksiyonunda hem de hedef kısıtlayıcılarında bulunur. Böylece,

hedeflerin en iyi şekilde sağlanması garantilenmiş olur. Ayrıca, amaç fonksiyonundaki istenen erişim değerleri karar verici tarafından belirlenmelidir.

Hedef programlama probleminin çözümü için genel olarak, ağırlıklandırma yöntemi veya öncelik koruma yöntemi kullanılır. Ağırlıklandırma yönteminde, tek bir amaç fonksiyonu, problemin hedeflerini temsil eden fonksiyonların ağırlıklandırılmış toplamı haline getirilir. Öncelikli koruma yöntemi, önem derecelerine göre hedeflerin önceliklendirilmesiyle başlar. Model daha sonra, yüksek öncelikli hedefin en iyi değerinin düşük öncelikli hedef tarafından kötüleştirilmesine izin verilmeyecek şekilde, her seferinde bir hedefi en iyi kılar.

Önerilen iki yöntem aynı çözümü üretmez, bu bakımdan birbirinden farklıdır. Bununla birlikte, yöntemlerden her biri belirli karar verme tekniklerini karşılamak için tasarlanmış olduğundan, ikisinden herhangi birinin daha üstün olduğu ileri sürülemez.

3.4.1. Ağırlıklı hedef programlama

n hedefli hedef programlama modelinin i. hedefinin;

$$\min G_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.11)$$

olarak verildiği kabul edildiğinde, ağırlıklandırma yönteminde kullanılan birleştirilmiş amaç fonksiyonu

$$\min z = w_1 G_1 + w_2 G_2 + \dots + w_n G_n \quad (3.12)$$

şeklinde tanımlanır. Burada w_i , $i=1, 2, \dots, n$, her bir hedefin göreceli önemiyle ilgili karar vericinin tercihlerini yansıtan pozitif ağırlıklardır. Örneğin tüm i 'ler için $w_i = 1$ 'nin olması, bütün hedeflerin eşit ağırlık taşıdığını gösterir. Bu ağırlıkların öznel değerlerinin belirlenmesi öznel bir konudur (Boray ve Esnaf 2000).

Eşit ağırlıklı çok amaçlı hedef programlamada amaç fonksiyonunun anlamlı olabilmesi, sapma değişkenlerinin aynı birimde olmasına bağlıdır. Aksi durumda amaç fonksiyonunun değeri bir anlam ifade etmez. Böyle bir durumda her bir sapma değişkeninin ayrı ayrı ele alınması ve yorumlanması gerekir. Bu

durumdan kaçınmak için yapılacak işlem, sapma değişkenlerinin ölçü birim farklılığını giderecek şekilde her bir değişkene ağırlık verilmesidir (Öztürk 2005).

3.4.2. Öncelikli hedef programlama

Öncelikli hedef programlama yönteminde, amaç fonksiyonunu oluşturmak için ulaşılmaması istenilen hedeflerin hiyerarşik bir yapıda verilmesi gerekir. Karar verici, tercihini kullanarak hedeflerin en önemliden daha az önemliye doğru sıralamasını yapar. Çözüm sürecinde, düşük öncelikli hedefte elde edilen çözüm, yüksek öncelikli hedefler için daha önce bulunmuş çözümleri kötüleştirmez. Öncelikli hedef programlama çözüm algoritması aşağıdaki gibidir (Boray ve Esnaf 2000):

- 0.adım Modelin hedefleri tanımlanır ve öncelik sırasına göre sıralanır.
 $G_1 = P_1 > G_2 = P_2 > \dots > G_n = P_n$, $i = 1$ olarak belirlenir.
- i.adım G_i 'yi minimum kılacak i. doğrusal programlama modeli çözülür ve P_i sapma değişkeninin en iyi değeri $P_i = P_i^*$ olarak belirlenir. $i = n$ ise durulur; n. doğrusal programlama modeli, n hedefli program çözülür. Aksi halde, P_i 'nin ileride kötüleştirilmemesini garantilemek için $P_i = P_i^*$ kısıtı G_i probleminin kısıtlarına eklenir. $i = i+1$ olarak verilir ve i. adım tekrar edilir.

Birinci öncelikli hedef, tam olarak gerçekleştirilmeden ikinci öncelikli hedefe geçilmez. Çözüm prosedürü, en yüksek öncelikli P_1 hedefiyle başlayıp en düşük öncelikli P_n hedefiyle bitirilerek her seferde tek hedefli bir problem çözülür. Bu durum, matematiksel olarak;

$$P_1 \gg P_2 \gg P_3 \gg \dots \gg P_n \quad (3.13)$$

şeklinde ifade edilir. (3.13)'te, P_1 hedefinin P_2 hedefinden çok daha fazla önemli olduğu belirtilmektedir. Hedeflerin önceliklerinin sıralanması hedefler arasındaki ilişkilere verilen ağırlık ile de yapılabilir. Çünkü $P_1 \gg P_n$ gösteriminde ilgili sapma değişkenlerinin $k > 0$ olmak koşuluyla bir sayı ile çarpılacağı anlamı vardır. Ancak bu çarpılacak sayı ne kadar büyük olursa olsun, P_1 'in önemi P_2 'den her zaman daha fazla olacaktır (Boray ve Esnaf 2000).

3.5. Sütun Türetme

Sütun türetme, çoğunlukla en iyileme problemlerinde hesaplama zamanının çok fazla olması nedeniyle bütün değişkenlerin açık bir şekilde dikkate alınmasının pratik olmadığı tamsayı programlamalarda kullanılır. Sütun türetmede temel düşünce, problemin formülasyonundaki sütunların hepsinin açık bir şekilde listelenip denenmesi yerine, bunlara ihtiyaç duyuldukça oluşturulmasıdır. Bu, çözüm sürecini oldukça hızlandırır. Sütun türetmenin başarılı olabilmesi için iyi sütunlar türetmeye odaklanmak önemlidir. Bu yüzden, tamsayı çözüm oluştururken tamsayı oluşturmayacak sütunlar dikkate alınmaz (Önneflod 2004; Ahuja ve ark.1993).

Aşağıdaki doğrusal model, temel problem olarak göz önüne alınsın:

$$\min \sum_{j \in J} c_j x_j \quad (3.14)$$

$$\sum_{j \in J} A_{ij} x_j = b_i \quad \forall i \quad (3.15)$$

$$x_j \geq 0 \quad \forall j \in J \quad (3.16)$$

Simpleks metodunun her tekrarında temele girecek ve değerlendirilecek temel olmayan değişken aranır. J kümesinin eleman sayısı çok büyük olduğunda, bunun sayısal olarak hesaplanması ya çok zaman alır ya da imkansız hale gelir. $j \in J$ olan bütün sütunların listelenerek oluşturulması, eniyi çözümde çoğu değişken, x_j sifıra eşit olduğu için gereksizdir. Bunun yerine, orijinal problem, sınırlandırılmış temel problem ve alt problem olmak üzere ayrıştırılır. Alt problemin amacı, sınırlandırılmış temel problemin çözümünden elde edilen ikil vektöre karşılık gelen fonksiyonu enküçükleyecek yeni sütunları oluşturmaktır. Doğrusal model açısından yeni sütunun yararlı olabilmesi için sınırlandırılmış temel problemin indirgenmiş maliyeti negatif (temel problemin enküçükleme problemi olduğu kabul edilirse) olmalıdır. Bu durumda, sınırlandırılmış temel probleme ilave edilen yeni sütun daha iyi amaç fonksiyonu değerinin elde edilmesini sağlar. Sınrlandırılmış temel problem, kullanılabilir sütunların yalnızca küçük bir alt kümesini içerecektir, (3.14)'te verilen, " J ", " \bar{J} " ile

değiştirilir ($\bar{J} \subseteq J$). Temel problem, çözüldükten sonra eniyi ikil çarpanlar elde edilir, fiyatlandırma (pricing) adımıyla en küçük indirgenmiş maliyete (reduced cost) sahip sütun araştırılır. (3.15) ile ilgili belirli ikil değişkenler π_i , bütün $j \in J$ incelenerek j 'ler için negatif değerli indirgenmiş maliyetin, $c_j - \pi A_j < 0$ olup olmadığı tespit edilir. Buradaki A_j , A matrisindeki j . sütundur. Bu, algoritmanın fiyatlandırma adımı olarak adlandırılır. $(c_j - \pi A_j)$, j .sütunun indirgenmiş maliyetini ifade eder. Eğer indirgenmiş maliyet herhangi bir $j \in J$ için negatif değere sahip ise, j , temel \bar{J} 'ye eklenir ve temel problem yeniden çözülür. Eğer, bütün $j \in J$ için $c_j - \pi A_j \geq 0$ koşulu sağlanıyorsa, temele girecek uygun sütunun olmadığı anlamı ortaya çıkar ve doğrusal modelin mevcut çözümü en iyi kabul edilir (Andreas 2006; Lübbecke ve Desrosiers 2005; Lui 2005).

Sınırlandırılmış temel programın başlangıç önerilerin oluşturmak için diğer metodolojiler kullanılabilir. Eğer başlangıç aşamasında uygun çözüm doğal olarak açık değilse, “Büyük M ” maliyetli yapay değişkenler veya “iki aşamalı” çözüm yaklaşımı problemi başlatmak için kullanılabilir. İyi seçilen başlangıç sütunlar yakınsamayı iyileştirebileceği gibi kötü seçilen başlangıç sütunları yakınsamayı engelleyebilir.

3.6. Dantzig-Wolfe Ayrıştırması

Zor doğrusal modeller için klasik çözüm yaklaşımı olan Dantzig-Wolfe ayrıştırması, büyük ölçekli modelleri çözmek için önemli bir araçtır. Büyük ölçekli modeller, standart simpleks algoritması kullanıldığında en iyileme modellerinin kapasitesini aşabilen ve çözülemeyen problemler haline gelebilir (Erwin 2003).

Dantzig-Wolfe yaklaşımında doğrusal model, hemen hemen bağımsız kısımlardan oluşan alt problem ve alt problemleri bağlayan temel probleme ayrıştırılır. En iyi sonucu elde edebilmek için temel ve alt problem ardışık olarak bir çok kez çözülür. İlk olarak temel problem çözülür, bunun sonuçlarından yararlanılarak her alt problem için amaç fonksiyonu oluşturulur. Daha sonra bu alt problemler çözülür ve çözümlerden elde edilen yeni sütunlar temel probleme ilave edilir. Bu süreç, eniyilik koşullar sağlanıncaya kadar devam eder (Dantzig 1963).

Aşağıdaki gibi bir doğrusal model;

$$\text{Minimum } c^T x \quad (3.17)$$

$$S.T. \quad Ax = b, \quad A: mxn \quad (3.18)$$

$$x \geq 0 \quad (3.20)$$

dikkate alındığında,

$$Ax = \begin{pmatrix} B_0 & B_1 & B_2 & \dots & B_k \\ & A_1 & & & \\ & & A_2 & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & A_K \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_k \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

$$\sum_{k=0}^K B_k x_k = b_0 \quad (3.22)$$

(3.22) kısıtı, bağlantı kısıtı olarak adlandırılan alt matrisin en büyük satırına karşılık gelir.

Minkowski Temsil Teoremi'ne göre (Erwin 2003), her hangi bir D uygun çözüm alanının olası uç noktaları $x^{(j)}$ ve D'nin uç yönleri $r^{(i)}$ 'nin konveks doğrusal kombinasyonu olarak;

$$x = \sum_j \lambda_j x^{(j)} + \sum_i \mu_i r^{(i)} \quad (3.23)$$

$$\sum_j \lambda_j = 1 \quad (3.34)$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad (3.25)$$

$$\mu_i \geq 0 \quad (3.26)$$

şeklilde yazılabilir. (3.24) kısıtı aynı zamanda konveks kısıtı olarak bilinir. Eğer D çözüm alanı sınırlı ise, $x \in D$ olmak üzere uç noktaların doğrusal kombinasyonu

$$x = \sum_j \lambda_j x^{(j)} \quad (3.27)$$

$$\sum_j \lambda_j = 1 \quad (3.28)$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad (3.29)$$

biçiminde ifade edilir. Orijinal x değişkenli problem, λ değişkenli olarak tarif edilebilir. Pratikte, yeni formülasyon, λ_j 'nin değişken sayısı çok fazla olduğu için doğrudan uygulanamaz.

k tane alt problemin kısıtı;

$$A_k x_k = b_k \quad (3.30)$$

$$x_k \geq 0 \quad (3.31)$$

olmak üzere, temel problemin modeli

$$\min \sum_k c_k^T x_k \quad (3.32)$$

$$\sum_k B_k x_k = b_0 \quad (3.33)$$

$$x_0 \geq 0 \quad (3.34)$$

şeklindedir. (3.27)-(3.29) numaralı eşitlikler (3.32)-(3.34) numaralı eşitliklerde yerine konulursa,

$$\min c_0^T x_0 + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{p_k} (c_k^T x_k^{(j)}) \lambda_{k,j} \quad (3.35)$$

$$B_0 x_0 + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{p_k} (B_k x_k^{(j)}) \lambda_{k,j} = b_0 \quad (3.36)$$

$$\sum_{j=1}^{p_k} \delta_{k,j} \lambda_{k,j} = 1, \quad k = 1, \dots, K \quad (3.37)$$

$$x_0 \geq 0 \quad (3.38)$$

$$\lambda_{k,j} \geq 0 \quad (3.39)$$

denklemleri elde edilir. (3.35)-(3.39) denklemleri büyük bir doğrusal modeli ifade etmektedir. Satır sayısı azalmasına rağmen, her alt problemin uç noktalarının ve yönlerinin sayısı çok büyüktür. Sonuç olarak, çok büyük değişkenli $\lambda_{k,j}$ elde edilir. Bununla birlikte bu değişkenlerin büyük bir kısmı, sıfır olarak temel olmayan değişkendir ve problemin bir parçası olmasına gerek yoktur. Yalnızca umut verici indirgenmiş maliyetlerin dikkate alındığı bu yaklaşım, geciktirilmiş sütun türetme (delayed column generation) algoritması olarak da adlandırılır (Erwin 2003).

Sadece küçük sayıdaki λ değişkenli model, sınırlandırılmış temel problem (restricted master problem) olarak adlandırılır. Kayıp değişkenler sıfıra sabitlenerek;

$$\min c_0^T x_0 + c^T \lambda' \quad (3.40)$$

$$B_0 x_0 + B \lambda' = b_0 \quad (3.41)$$

$$\Delta \lambda' = 1 \quad (3.42)$$

$$x_0 \geq 0 \quad (3.43)$$

$$\lambda_{k,j} \geq 0 \quad (3.44)$$

denklemleri elde edilir. Sınırlandırılmış temel problemin boyutu, sabit ölçüde değildir. Yeni değişkenler, algoritmanın çalışması sırasında alt problemden sınırlandırılmış temel probleme yeni sütun oluşturacak şekilde aktarılır.

Değişken $\lambda_{k,j}$ 'nin uygunluğu, değişkenin indirgenmiş maliyetiyle ölçülebilir. Eğer $B_0 x_0 + B \lambda' = b_0$ kısıtlarının ikili değişkenleri π_1 ve

$\sum_{j=1}^{p_k} \delta_{k,j} \lambda_{k,j} = 1$, konveks kısıtlarının ikil değişkenleri $\pi_2^{(k)}$ ile gösterilirse, temel

problem için indirgenmiş maliyet;

$$\sigma_{k,j} = (c_k^T x_k^{(j)}) - \pi^T \begin{pmatrix} B_k x_k^{(j)} \\ \delta_{k,j} \end{pmatrix} = (c_k^T - \pi_1^T B_k) x_k^{(j)} - \pi_2^{(k)} \delta_{k,j} \quad (3.45)$$

şeklinde yazılır. Alt problemin sınırlı olduğu kabul edildiğinde, indirgenmiş maliyetin en büyüklenmesiyle bulunan en umut verici x_k değişkeniyle;

$$\min_{x_k} \sigma_k = (c_k^T - \pi_1^T B_k) x_k^{(j)} - \pi_2^{(k)} \quad (3.46)$$

$$B_k x_k = b_k \quad (3.47)$$

$$x_k \geq 0 \quad (3.48)$$

doğrusal modeli elde edilir. İndirgenmiş maliyeti bulmak için yapılan çalışma, fiyatlandırma (pricing) olarak adlandırılır. İndirgenmiş maliyet, $\sigma_k^* < 0$ olduğu sürece yeni sütun $\lambda_{k,j}$ temel probleme, $c_k^T x_k^*$ katsayısıyla ilave edilir. $\sigma_k^* \geq 0$ olduğunda en iyi çözüm bulunmuş olur.

3.7. Bender Ayırıştırması

Bender ayırıştırması ilk olarak hem tamsayı hem de sürekli değişkenlere sahip doğrusal en iyileme problemleri için karma tamsayı problemlerini çözmek için 1962 yılında J. Bender tarafından geliştirilmiştir (Lai 2004). Serim dizaynı, iyileştirilmesi ve akış problemleri ve özellikle verilerin stokastik yapıda olduğu durumlarda Bender ayırıştırmasının kullanılması yaygındır. Bender ayırıştırması, kısıtların çoğunun bağlayıcı olmadığı ve değişkenlerin ayırıştırılmasının açık olduğu modellerde kullanılır. Bu yaklaşımda problem, satır türetilerek çözülür (Andreas 2006).

Aşağıdaki doğrusal model dikkate alınsın;

$$\text{Min } c^1 x^1 + c^2 x^2 \quad (3.49)$$

$$\text{S.T. } A^1 x^1 + A^2 x^2 \geq b \quad (3.50)$$

$$x^1 \in X \quad (3.51)$$

Buradaki X, en iyilenmesi yapılan x^1 'in üzerindeki kümedir (Andreas 2006).

(3.50) ile ilgili belirli ikil değişken “v” olsun. Bu durumda (3.49)-(3.51) temel problem olarak;

$$\text{Min } z \quad (3.52)$$

$$\text{S.T. } z \geq c^1 x^1 + v(b - A^1 x^1) \quad \forall v \in V \quad (3.53)$$

$$x^1 \in X \quad (3.54)$$

şeklinde yazılabilir (Andreas 2006). Buradaki V, $V = \{v: vA^2 = c^2, v \geq 0\}$ tarafından verilen bütün ikil uç noktalarının kümesidir.

V'deki bütün uç noktaları sırasıyla denemenin yerine, V'nin \hat{V} ile değiştirildiği $\hat{V} \subseteq V$ (3.52)-(3.53) ile elde edilen gevşetilmiş temel problem (RMP: relaxed master problem) oluşturulur. Gevşetilmiş temel problem için elde edilen belli çözümden sonra, $(\bar{z}_{RMP}, \bar{x}^1)$, aşağıda tanımlanan Bender modeli alt problemde çözülür (Andreas 2006).

$$\text{Maksimum } v(b - A^1 \bar{x}^1) \quad (3.55)$$

$$\text{S.T. } vA^2 = c^2 \quad (3.56)$$

$$v \geq 0 \quad (3.57)$$

Buradan en iyi çözüm (\bar{z}_{SP}, \bar{v}) elde edilir. Eğer $c^T \bar{x}^1 + \bar{z}_{SP} > \bar{z}_{RMP}$ ise, bu durumda \bar{v} , \hat{V} 'ya ilave edilir ve gevşetilmiş temel problem yeniden çözülür. Eğer $c^T \bar{x}^1 + \bar{z}_{SP} = \bar{z}_{RMP}$ olursa, temel problem için çözüm en iyi elde edilir (Andreas 2006).

Bender ayrıştırma algoritmasında, karma tamsayılı doğrusal model, doğrusal modelin alt problemi ve karma tamsayı doğrusal modelin temel problemi ardışık olarak çözülür. Doğrusal modelin alt problemi, net mevcut değer alt sınırını ve karma tamsayı doğrusal model ise temel problemin üst sınırının bulunmasını sağlar. Bununla birlikte doğrusal modelin alt problemi ve temel problemin tanımı, kullanılan değişkenlerin ayrışma özelliğine bağlıdır (Sahinidis 1990).

Gerek Bender ayrıştırması gerekse Dantzig-Wolfe ayrıştırması karar modelinin yapısına bağlı olarak çözüm işlem adımlarının ve sürelerinin kısaltılmasında kullanılan yaklaşımlardır. Bu özellikleri ile büyük ölçekli uçak rotalama problemlerinin çözümünde bazı araştırmacılar tarafından başvurulan yöntemler arasındadır. Tamsayılı problemleri çözmeye yönelik yazılım teknolojilerindeki gelişmeler, bu yaklaşımların uygulanmasına olan gereksinimi bir ölçüde azaltmışlardır. Nitekim, yapılan pilot çalışmalarda küçük ve orta ölçekli problemlerde DW yaklaşımının katkısının çok sınırlı kaldığı gözlenmiştir. Bilgisayar teknolojilerindeki gelişmelerde gözönüne alındığında, her iki ayrıştırma tekniğinin kritik katkı sağlayacağı problem boyutlarının gitgide artması beklenir. Söz konusu boyutlar bu çalışmaya konu olan sivil havacılık problemlerinin gerçek ölçeğinin ötesindedir.

Bu bölümde, havayolu sektöründeki çizelgeleme ve planlama ile ilgili yapılan çalışmalar, kullanılan amaç fonksiyonları, kısıtlar, yöntem ve çözüm sonuçları açısından incelenmiştir. Belirtilen çalışmalarda ve tez kapsamında önerilen çözüm yaklaşımları hakkında bilgi verilmiştir. Bir sonraki bölümde, önerilen matematiksel modeller ayrıntılı bir şekilde incelenerek birbirlerine göre farklılıkları ortaya konulacaktır.

4. UÇAK BAKIM ve ROTA PLANLAMASINA YÖNELİK ÖNERİLEN KARMA TAMSAYILI MODELLER

Havayolu işletmeleri çizelgeleme ve planlama kararlarını birden çok amacı dikkate alarak vermek zorundadır. Bu amaçlar, işletme maliyetlerinin veya bakım maliyetlerinin azaltılması ve uçuş mürettebatından veya uçaklardan maksimum oranda yararlanılması şeklinde ifade edilebilir.

Bu bölümde, uçak bakım ve rota planlamasına yönelik karma tamsayılı olarak önerilen modellerin önemi ve katkısı vurgulanmıştır. Bu tez kapsamında önerilen matematiksel modellerden birincisi olan bütünlük uçak bakım ve rota planlama modelinde, uçakların uçuş süreleri dikkate alınarak hem bakım hem de rota planlamalarında kullanılan matematiksel model açıklanmıştır. Ayrıca havayolu işletmelerinin ihtiyaç ve koşullarına uygun olarak kullanabileceği dört farklı çok amaçlı bütünlük uçak bakım ve rota planlama modeli önerilmiştir. Bunlar;

- Çok amaçlı bütünlük uçak bakım ve rota planlama-uçuş saatlerini dengeleyen model,
- Çok amaçlı bütünlük uçak bakım ve rota planlama-uçuş sayılarını dengeleyen model,
- Çok amaçlı bütünlük uçak bakım ve rota planlama-uçuş sayı ve sürelerini dengeleyen model,
- Çok amaçlı bütünlük uçak bakım ve rota planlama-uçuş süre ve sayılarını dengeleyen model,

şeklinde yazılabilir. Son iki model, öncelik sırasına göre ardışık olarak çözülen çok amaçlı üç modelden oluşur. Her ikisinde de birinci öncelikli olarak, bütünlük uçak bakım ve rota planlama modeli çözülür. Daha sonra karar vericinin tercihine bağlı olarak ya uçuş sayılarını ya da uçuş sürelerini dengeleyen model ikinci öncelikli model olarak ve sonra önem dercesi en az olan model çözülür.

Havayolu çizelgeleme ve planlama problemlerinin yapısı, çok ürünlü serim akış ve zaman kısıtlı araç rotalama modellerinin doğal bir uygulama alanıdır.

Literatürde incelenen çalışmalarda olduğu gibi bu çalışmada da yukarıdaki modellerde kullanılan temel kısıtlardan yararlanılmıştır. Bu çalışmada önerilen modellerde kullanılan kısıtlar kullanım amaçlarıyla açıklanmıştır. Ayrıca her bir modelin avantajı, amaç fonksiyonu, modellerin birbirlerinden farklı olduğu noktalar ve modellere özgü olarak kullanılan kısıtlar modelin başlığı altında verilmiştir. Sonuç olarak önerilen modeller; uçakların bakım maliyetlerini enküçüklemekte, kesintisiz uçuş tercihi yapılan uçuş rotalarından elde edilen geliri en büyükmekte, gün üzerinden bakım uygulanacak uçakların gün içindeki son uçuşları bakım merkezlerine olması sağlamakta ve karar vericinin tercihine bağlı olarak uçakların uçuş sayılarını veya sürelerini veya her ikisini birden yine karar vericinin önceliğine göre ardışık olarak dengelemektedir.

4.1. Uçuş Bacak Kapsam Kısıtı

Aktivite kapsam kısıtı, her aktivitenin gerçekleştirilmesini sağlar (Sarac 2000; Cordeau ve ark. 2002; Huang 2005). Bu çalışmadaki aktivite, uçuş tarifesi oluşturulan uçuş bacaklarıdır. Uçuş bacak kapsam kısıtı, her uçuş bacağına bir uçağın atanması sağlar. Uçuş tarifesindeki her uçuşun gerçekleştirilmesi gerekli olduğu için eşitlik kısıtı kullanılmıştır. Uçuş bacak kapsam kısıtı, denklem (4.1)'de gösterilmiştir.

$$\sum_{j \in N} x_{ijk} = 1 \quad k \in K \quad \text{ve} \quad i = o \quad (4.1)$$

4.2. Uçak Kapsam Kısıtı

Araç kapsam kısıtı, belli bir araç tarafından izlenecek yolda aracın belirli bir başlangıç noktasından başlamasını ve belirli bir varış noktasına varmasını sağlamak için kullanılır (Sarac 2000; Cordeau ve ark. 2002; Huang 2005; Tagmouti ve ark. 2007). Bu çalışmada araç, uçaktır.

Uçak kapsam kısıtı olarak iki farklı kısıt kümesi vardır. (4.2) kısıtı, her uçağın bir başlangıç uçuş bacağına atanmasını sağlar. Ayrıca, karar değişkeni, bir değerini aldığına "i" uçuşundan sonra hangi "j" uçuşunun gerçekleştirileceğini bilgisi de elde edilir.

$$\sum_{j \in N} x_{ijk} = 1 \quad k \in K \quad \text{ve} \quad i = o \quad (4.2)$$

(4.3) kısıt kümesi ise her uçağın bir hava alanında sonlanan bir uçuş bacağına yani yapay havuzda son bulan bir uçuşa atanmasını sağlar.

$$\sum_{i \in N} x_{ijk} = 1 \quad k \in K \quad \text{ve} \quad j = t \quad (4.3)$$

4.3. Akış Koruma Kısıtı

Akış koruma kısıtları, herhangi bir “i” düğümüne gelen bağlantı ark sayısının “i” düğümünden çıkan bağlantı ark sayısına eşit olmasını sağlar (Sarac 2000; Cordeau ve ark. 2002; Huang 2005; Tagmouti ve ark. 2007).

(4.4) akış koruma kısıt kümesi, her uçağı uçuş tarifesinde sirkülasyon yapmaya zorlar. Böylece, uçak gün içerisinde yapay uçuş noktasına ulaşıncaya kadar uçuşuna devam eder.

$$\sum_{j \in N} x_{ijk} - \sum_{j \in N} x_{jik} = 0 \quad \forall i \in N / \{o, t\} \quad \text{ve} \quad k \in K \quad (4.4)$$

(4.5) akış koruma kısıtı, yapay kaynak düğümünden çıkan uçuş bağlantı ark sayısının, yapay havuz düğümüne gelen uçuş bağlantı ark sayısına eşit olmasını sağlamak için kullanılır. Böylece model, her gün tekrar eden uçuş tarifesi için her hava alanında aynı sayıda uçak bulunması sağlanmış olur.

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{ojk} - \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} x_{itk} = 0 \quad (4.5)$$

4.4. Rota ve Öncelik Kısıtı

Uygun rota, yapay kaynakta başlayan ve yapay havuzda son bulan ardışık uçuş bacağı veya bacaklarının oluşturduğu bir dizidir. Uçuş bacakları, uçuşların ayrılış zaman uyumu ve hava alanı uyumu için kullanılan kısıtların koşullarını sağlaması durumunda ardışık olarak birbirini izler.

İlk kısıt kümesi (4.6), uçuşlar arasında zaman uyumunu sağlayan kısıttır. Ayrılış zaman uyum kısıtı, bir uçuşun süresi ve uçuş sonundaki minimum dönüş

zamanı toplamı bir sonraki uçuşun başlangıç zamanından küçük ise uçuş bağlantı arki, “i” ve “j” uçuşlarını(düğümlelerini) birbirine bağlar.

$$Td_i + T_{ij} + Ts_i - Td_j \leq M(1 - x_{ijk}) \quad \forall k \in K \text{ ve } \forall (i, j) \in N / \{o, t\} \quad (4.6)$$

Ayrılış zaman kısıtı aynı şekilde, hem yapay kaynak düğümü (4.7) hem de yapay havuz düğümü (4.8) için yazılmıştır (Cordeau ve ark. 2002; Huang 2005; Tagmouti ve ark. 2007).

$$Tdo_{ok} + T_{oi} - Td_i \leq M(1 - x_{oik}) \quad \forall k \in K \text{ ve } \forall (i) \in N \quad (4.7)$$

$$Td_i + T_{it} + Ts_i - Tdt_{ik} \leq M(1 - x_{itk}) \quad \forall k \in K \text{ ve } \forall (i) \in N \quad (4.8)$$

Hava alanı uyum kısıtı, “j” ve “i” uçuş bacaklarını “j” uçuş bacağının ayrılış şehri, “i” uçuş bacağının varış şehri ile aynı ise birbirine bağlar. (4.9)-(4.12) kısıtları, uygun şehir bağlantılarını tanımlamak amacıyla kullanılır. (4.9) kısıt kümesi, gün içerisinde gerçekleştirilen uçuşlar arasındaki hava alanı uyumunu sağlar. Bu kısıtta, x_{ijk} değişkeni, yalnızca “i” uçuş bacağının varış şehri ve “j” uçuş bacağının varış şehri aynı olduğunda bir olur. Aksi takdirde, bütün değişkenler sıfıra eşit olur (Sarac 2000).

$$\sum_{k \in K} x_{ijk} \leq \sum_{c \in C} Ca_{ic} Cd_{jc} \quad \forall i \in N \text{ ve } \forall j \in N \quad (4.9)$$

(4.10) kısıt kümesi, yapay kaynak düğümü için hava alanı uyum kısıtıdır. Herhangi belirli k uçağı için x_{ojk} değişkeni, yalnızca “j” uçuş bacağının varış şehri ve yapay uçuşun uçuş başlangıç şehri aynı olursa bir olmasına izin verilir.

$$x_{ojk} \leq Cd_{jc} Ca_{oc} \quad \forall j \in N \text{ ve } k \in K \quad (4.10)$$

(4.11) kısıt kümesi, uçakların gece boyunca konakladıkları hava alanlarını dikkate alarak, yeni günün ilk uçuşuna buldukları hava alanından gerçekleşecek uçuşlardan birine atanmasını sağlayan kısıttır.

$$\sum_{j \in DFFc(j)} x_{ijk} = 1 \quad \forall k \in OWNc(k) \text{ ve } i = o \quad (4.11)$$

(4.12) kısıt kümesi, uçuş saati belli bir limit değerinin altında olan uçakların gün içerisinde uygun rotalara atandıktan sonra son uçuşlarını bakım merkezlerinin olduğu hava alanlarına olmasını sağlar. Böylece, gün sonunda uçaklara gerekli bakımlar yapılabilir. Bu kısıt kümesi, kullanılabilir uçuş saati 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 bağı olarak değiştirebilir. Belirlenen limit değerinin üstünde olan uçaklar gün içindeki son uçuşlarını gece konaklamak için herhangi bir hava alanına gerçekteştirebilirler (Sarac 2000).

$$\sum_{i \in N} \sum_{m \in M} \sum_{c \in C} x_{ik} Ca_{ic} Cmt_{m,c} A_{m,k} = 1 \quad \forall k \in KM \quad (4.12)$$

4.5. Yasal Kalan Uçuş Saati Kısıtı

(4.13) kısıt kümesi, uçak için rotayı tanımlayan problemin temel kısıtıdır. Bu kısıt, uçakların yasal kullanılabilir uçuş saat değerlerini aşmadan uygun bir şekilde rotalara atanmasını sağlar.

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ij} x_{ijk} \leq r_k \quad \forall k \in K \quad (4.13)$$

Kullanılabilir yasal uçuş süre limitlerini ihmal ederek, gerekli bakımları yönetmeliklere uygun olarak yapmayan havayolu şletmelerine sivil havacılık otoriteleri tarafından yüksek cezalar kesilmekte ve belirli durumlarda şletmenin uçuş lisansı iptal edilmektedir. Bu yüzden, havayolu şletmeleri üretici firmaların bakım aralıklarını dikkate almakta ve belirtilmiş özel durumlar haricinde bakımları zamanında uygulamaktadır. Özel durum ve şartları üretici firmalar tarafından bakım el kitaplarında tanımlanmıştır.

4.6. Gün Sayısı Üzerinden Bakım Kısıtı

Uçak üreticileri, günümüzde kullanılan bazı uçaklarda olduğu gibi uçak üzerindeki belirli bakımların gün üzerinden uygulanmasını tavsiye edebilir. (4.14) kısıtı, gün sayısı üzerinden belirlenen bakımların “n”. günde uçaklara uygulanması için uçakların bakım merkezlerinin bulunduğu hava alanlarında olmasını sağlayacak şekilde rotalanmasını sağlar.

$$\sum_{i \in KM(i)} x_{ijk} = 1 \quad \forall k \in KMw \text{ ve } j = t \quad (4.14)$$

4.7. Kesintisiz Uçuş Kısıtı

Kesintisiz uçuş, iki hava alanı arasındaki uçuşun merkezi bir hava alanına bağlantılı olarak gerçekleştirilmesidir. Uçak merkezi hava alanında yolcuların bir kısmını indirip, yeni yolcu aldıktan sonra planlanan hava alanına uçuşunu gerçekleştirir. Böylece kesintisiz uçuşu tercih eden yolcular merkezi hava alanında uçak değiştirmeden uçuşlarını tamamlar. Temel olarak, bir uçak tarafından gerçekleştirilmesi planlanmış belirli uçuş numaraları birbirine bağlanır. Uçuş numaralarının önceden tespit edilmiş olması gerekir. Kesintisiz uçuş bağlantıları, belli bir uçağa özel oluşturulabilir. Yolcular, uçak değiştirmeden iki nokta arasındaki uçuşlarını yoğun hava alanlarında uçak değiştirmenin zorluğundan kaçınmak ve uçuş süresini kısaltması açısından tercih edebilir. Havayolu işletmeleri, ek gelir elde edebileceği bu hizmeti yolculara sunarak hem karlılığını arttırmış hem tercih edilmesini sağlamış olur.

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in \text{Nth}_u} \sum_{j \in \text{Nth}_u} x_{ijk} = 1 \quad (4.15)$$

4.8. Bütünleşik Uçak Bakım ve Rota Planlama Modeli

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. Bütünleşik uçak bakım ve rota planlama modelinde, Şekil 4.1'de gösterilen uçağın iki bakım arasındaki (t_3-t_1) yasal olarak kullanılabilir uçuş süresinin tamamını kullanacak şekilde uygun rotalara atanması sağlanır. Böylece, belli bir uçuş süresi içerisinde bakıma girecek uçağın iki bakım arasındaki uçuş saati başına düşen bakım maliyetleri enküçüklenir. Amaç fonksiyonunda, enküçüklenen kullanılabilir yasal uçuş saat aralığı (t_3-t_2) , Şekil 4.1'de gösterilmektedir.



- t_1 : Bakımdan yeni çıkmış uçak için yeni periyodun başlangıcı
 t_2 : Bakımdan çıkan uçağın t_2 noktasına kadar kullandığı uçuş saati
 t_3 : Uçağın bakıma gireceği bir sonraki zaman noktası
 $t_3 - t_2$: Uçağın kullanılabilir yasal uçuş saati

Şekil 4.1. Uçağın yasal kullanılabilir uçuş saati

Kesintisiz uçuş değerini enbüyüklerken, gün sayısı ve uçuş süresi üzerinden bakıma girecek uçakların uçuş rotalarını oluşturmak üzere önerilen bütünlük uçak bakım ve rota planlama modeli aşağıdaki gibidir:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in N / \{o, t\} \quad (4.16)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ijk} = 1 \quad k \in K \quad \text{ve} \quad i = o \quad (4.17)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ijk} = 1 \quad k \in K \quad \text{ve} \quad j = t \quad (4.18)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ijk} - \sum_{j \in N} x_{jik} = 0 \quad \forall i \in N / \{o, t\} \quad \text{ve} \quad k \in K \quad (4.19)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{ojk} - \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} x_{itk} = 0 \quad (4.20)$$

$$Td_i + T_{ij} + Ts_i - Td_j \leq M(1 - x_{ijk}) \quad \forall k \in K \quad \text{ve} \quad \forall (i, j) \in N / \{o, t\} \quad (4.21)$$

$$Tdo_{ok} + T_{oi} - Td_i \leq M(1 - x_{oik}) \quad \forall k \in K \quad \text{ve} \quad \forall (i) \in N \quad (4.22)$$

$$Td_i + T_{it} + Ts_i - Tdt_{tk} \leq M(1 - x_{itk}) \quad \forall k \in K \quad \text{ve} \quad \forall (i) \in N \quad (4.23)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ijk} \leq \sum_{c \in C} Ca_{ic} Cd_{jc} \quad \forall i \in N \quad \text{ve} \quad \forall j \in N \quad (4.24)$$

$$x_{ojk} \leq Cd_{jc} Ca_{oc} \quad \forall j \in N \quad \text{ve} \quad k \in K \quad (4.25)$$

$$\sum_{j \in DFFc(j)} x_{ijk} = 1 \quad \forall k \in OWNc(k) \quad \text{ve} \quad i = o \quad (4.26)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{m \in Mc \in C} x_{itm} Ca_{ic} Cmt_{mt,c} A_{mt,k} = 1 \quad \forall k \in KM \quad (4.27)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ij} x_{ijk} \leq r_k \quad \forall k \in K \quad (4.28)$$

$$\sum_{i \in KMc(i)} x_{ijk} = 1 \quad \forall k \in KMw \quad \text{ve} \quad j = t \quad (4.29)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in \text{Nth}_u} \sum_{j \in \text{Nth}_u} x_{ijk} = 1 \quad (4.30)$$

$$t_{oj} = 0 \quad \forall k \in K \quad (4.31)$$

$$Tdo_{ok} \geq 0 \quad \text{ve} \quad Tdt_{tk} \geq 0 \quad \forall k \in K \quad (4.32)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, i \in N \quad \text{ve} \quad j \in N \quad (4.33)$$

$$\text{Min} \sum_{k \in K} c_k(r) \quad (4.34)$$

Amaç fonksiyonu (4.34), uçakların bakıma girmeden önceki yasal olarak kullanılabilir uçuş süresini, uçakları uygun rotalara atayarak enküçükler. Bu uçağın belli bir bakım periyodu içerisinde kullanılabilir uçuş saatinin en büyüklenmesi anlamına da gelir. Her uçağın bir $c_k(r)$, yasal kullanılabilir uçuş saati vardır. $c_k(r)$ 'nin açık hali;

$$c_k(r) = \left((r_k) - \left(\frac{1}{(r_k)} \right) \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ij} x_{ijk} \right) \quad k \in K \quad (4.35)$$

ve açık halinin modeldeki şekli ise;

$$\text{Min} \sum_{k \in K} \left((r_k) - \left(\frac{1}{(r_k)} \right) \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ij} x_{ijk} \right) \quad (4.36)$$

olarak verilmiştir. Sarac (2000)'ın çalışmasından farklı olarak amaç fonksiyonunda kullanılan $\left(\frac{1}{(r_k)} \right)$ katsayısı, yasal kullanılabilir uçuş saati enküçük

olan uçağın ilk olarak uygun rotalara atanmasını sağlar. Model, bakıma girecek uçak kümesinde yer alan uçakların bakıma girmeden önceki kalan yasal uçuş süresini maksimum oranda kullanarak, uçakların gün içindeki son uçuşlarını bakım merkezlerinin bulunduğu hava alanlarına olacak şekilde atar.

(4.16) kısıtı, uçuş bacak kapsam kısıtıdır. (4.17)-(4.18) kısıtları, uçak kapsam kısıtlarıdır. (4.19)-(4.20) kısıtları, akış koruma kısıtlarıdır. (4.21)-(4.27) kısıtları, rota ve öncelik kısıtlarıdır. (4.28) kısıt kümesi, uçak için rotayı tanımlayan problemin temel kısıtıdır. (4.29) kısıtı, uçaklara gün sayısı üzerinden bakım uygulanmasını sağlayan kısıttır. (4.30) kısıt kümesi, kesintisiz uçuş kısıtıdır. (4.31) kısıtı, her uçak için yapay havuzdan gerçekleştirilen ilk uçuş süresinin sıfır olduğunu gösterir. (4.32) kısıtı, yapay kaynak ve yapay havuz düğümünden gerçekleştirilen uçuşların başlangıç zamanlarının sıfırdan büyük veya eşit olduğu

belirtir. (4.33) kısıtı, karar değişkenlerinin ikili değişken olarak tanımlandığını gösterir.

Uçak rota planlamasında, belirli periyotlarda uçaklara uygulanması zorunlu bakım yaklaşımları dikkate alınmadan yalnızca günlük uçuş rota planları oluşturulabilir. Böyle bir yaklaşımda belirli bir gün sayısı periyodunun sonunda uçaklara uygulanması gereken bakım gerçekleştirilir. Bunun için ilk olarak, uçakların konum bilgilerinden yararlanılarak her gün için ayrı ayrı uçuş rota planları oluşturulur. Daha sonra uçakların yalnızca gün içerisinde uçuşlara başladıkları ve uçuşlarını sonlandıkları hava alanları bilgilerinden yararlanılarak uçaklar için üç veya dört günlük bakım planları yapılır. Uçakların rota planları bakım kısıtı dikkate alınmadan oluşturulduğu için bakımların yapılacağı “n”. gündeki günlük rota planları uçakların bakımlarının yapılabileceği hava alanlarında olacak şekilde oluşturulmamış olabilir. Bu durumda rota planlarının değiştirilmesi gerekecektir. Sonuçta, günlük bazda elde edilen en iyi sonuçlar bozulmuş ve en iyi durumdan uzaklaşmış olunacaktır. Ayrıca, üç günlük periyot içerisinde uçuş süresini dikkate alan bakım yaklaşımlarında kullanılan periyot bitmediği için bazı uçaklar bakıma erken girmiş olacaktır. Bu hem uçak bakım maliyetlerinin artmasına ve hem de kullanılabilir uçağın yerde bakıma alınması nedeniyle gelir kaybına neden olacaktır. Buna karşın, uçuş süreleri dikkate alınarak önerilen bütünleşik uçak ve bakım rotalama modeli kesintisiz uçuş gelirlerini de en büyükleyerek yukarıda bahsedilen olumsuzlukların üstesinden gelmiştir.

4.9. Çok Amaçlı Bütünleşik Uçak Bakım ve Rota Planlama- Uçuş Sayılarını Dengeleyen Model

Havayolu işletmesi, uçak rota planlarını oluştururken günlük olarak uçaklara atanacak uçuş sayısının veya uçuş mürettebatına atanacak görev sayısının birbirine yakın olmasını isteyebilir. Böylece, uçuş mürettebatından uçuş sayısı bazında eşit oranda yararlanabilir. Ayrıca, uçakların iniş takımları gibi belirli parçalarında iniş-kalkış sayısını (çevrim) dikkate alan bakım yaklaşımı için uçakların çevrim sayıları eşit olacak şekilde bakıma girmeleri sağlanabilir.

Bununla birlikte, bakım uygulama zamanlarının çoğunluğu uçuş süreleri referans alınarak oluşturulur.

Bütünleşik uçak bakım ve rota planlama modelinde, uçakların yasal kullanılabilir uçuş zamanları enküçüklenirken, her uçak, koşullarına göre uygun rotalara atanmıştı. Bakıma girecek uçaklar limit değerlerinin tamamını veya tamamına yakını kullanılacak şekilde rotalara atanırken, bu kümeye girmeyen uçakların rota planları serbest bir şekilde oluşturulmuştu. Çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlama-uçuş sayılarını dengeleyen modelde, ilk olarak bütünleşik uçak bakım ve rota planlama modeli çözülür. Daha sonra uçakların uçuş sayılarını dengeleyen amaç fonksiyonu, birinci aşamada kullanılan modelin kısıtları ve ilave edilen yeni iki kısıt ile birlikte çözülür.

İkinci modelde kullanılmak üzere ilave edilen birinci kısıt (4.37), bütünleşik uçak bakım ve rota planlaması modelinde elde edilen, uçakların yasal kalan uçuş sürelerinin toplamı olan en iyi değerin korunmasını sağlar. Bunun gerçekleştirilebilmesi için bütünleşik uçak bakım ve rota planlama modelinin amaç fonksiyonu, ikinci modele kısıt olarak eklenir ve yeni kısıtın eşitsizliği, küçük eşit olarak kullanılır. Bu kısıtın sağ tarafına, bütünleşik uçak bakım ve rota planlama modelinde elde edilen en iyi değer atanır.

$$\sum_{k \in K} \left((r_k) - \left(\frac{1}{(r_k)} \right) \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ij} x_{ijk} \right) \leq z1 \quad (4.37)$$

İlave edilen ikinci kısıt, uçuş süresini dikkate alan bakım yaklaşımında bakıma girmeyen uçakların eşit sayıda uçuş rotalarına atanması sağlamak için kullanılan hedef kısıtlayıcı kısıttır.

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{ijk} + SS^-(k) - SS^+(k) = FNV \quad k \in K / KM \quad (4.38)$$

Bütünleşik uçak rota ve bakım planlama-uçuş sayılarını dengelemek için önerilen modelin tamamı aşağıdaki gibidir:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in N / \{o, t\} \quad (4.39)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ijk} = 1 \quad k \in K \quad \text{ve} \quad i = o \quad (4.40)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ijk} = 1 \quad k \in K \quad \text{ve} \quad j = t \quad (4.41)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ijk} - \sum_{j \in N} x_{jik} = 0 \quad \forall i \in N / \{o, t\} \text{ ve } k \in K \quad (4.42)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{ojk} - \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} x_{itk} = 0 \quad (4.43)$$

$$Td_i + T_{ij} + Ts_i - Td_j \leq M(1 - x_{ijk}) \quad \forall k \in K \text{ ve } \forall (i, j) \in N / \{o, t\} \quad (4.44)$$

$$Tdo_{ok} + T_{oi} - Td_i \leq M(1 - x_{oik}) \quad \forall k \in K \text{ ve } \forall (i) \in N \quad (4.45)$$

$$Td_i + T_{it} + Ts_i - Tdt_{tk} \leq M(1 - x_{itk}) \quad \forall k \in K \text{ ve } \forall (i) \in N \quad (4.46)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ijk} \leq \sum_{c \in C} Ca_{ic} Cd_{jc} \quad \forall i \in N \text{ ve } \forall j \in N \quad (4.47)$$

$$x_{ojk} \leq Cd_{jc} Ca_{oc} \quad \forall j \in N \text{ ve } k \in K \quad (4.48)$$

$$\sum_{j \in DFFc(j)} x_{ijk} = 1 \quad \forall k \in OWNc(k) \text{ ve } i = o \quad (4.49)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{m \in Mc \in C} x_{itm} Ca_{ic} Cmt_{mt,c} A_{mt,k} = 1 \quad \forall k \in KM \quad (4.50)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ij} x_{ijk} \leq r_k \quad \forall k \in K \quad (4.51)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in Nth_u} \sum_{j \in Nth_u} x_{ijk} = 1 \quad (4.52)$$

$$\sum_{i \in KMc(i)} x_{ijk} = 1 \quad \forall k \in KMw \text{ ve } j = t \quad (4.53)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{ijk} + SS^-(k) - SS^+(k) = FNV \quad k \in K / KM \quad (4.54)$$

$$\sum_{k \in K} \left((r_k) - \left(\frac{1}{(r_k)} \right) \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ij} x_{ijk} \right) \leq z1 \quad (4.55)$$

$$t_{oj} = 0 \quad \forall k \in K \quad (4.56)$$

$$Tdo_{ok} \geq 0 \text{ ve } Tdt_{tk} \geq 0 \quad \forall k \in K \quad (4.57)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, i \in N \text{ ve } j \in N \quad (4.58)$$

$$\text{(Amaç 1) Min } \sum_{k \in K} c_k(r) \quad (4.59)$$

$$\text{(Amaç 2) Min } \sum_{k \in K} SS^+(k) + SS^-(k) \quad (4.60)$$

Çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlama-uçuş sayılarını dengeleyen modelde, ardışık olarak çözülen iki model ve iki tane amaç fonksiyonu vardır. Birinci modelin amaç fonksiyonu (4.59), uçakların bakıma

girmeden önceki yasal olarak kullanılabilir uçuş saatini, uçakları uygun rotalara atayarak enküçükler. İkinci amaç fonksiyonu (4.60) ise, uçakların uçuş sayılarını dengeleyerek rota atamalarının yapılmasını sağlar.

(4.39) kısıtı, uçuş bacak kapsam kısıtı, (4.40) ve (4.41) ise, uçak kapsam kısıtlarıdır. (4.42) ve (4.43), akış koruma kısıtlarıdır. (4.44)-(4.50) kısıtları, rota ve öncelik kısıtlarıdır. (4.51) kısıtı, uçakların yasal kalan uçuş saat kısıtıdır. (4.52) kısıt kümesi, kesintisiz uçuş kısıtıdır. (4.53) kısıtı, gün sayısı üzerinden bakım uygulanmasını sağlayan kısıttır.

(4.54) kısıtı, uçakların atandıkları uçuş sayılarını dengelemek için kullanılan hedef kısıtlayıcı kısıttır. Bu kısıt kümesi, sapma değişkenlerine değerler atayarak uçakların uçuş sayılarını dengeler.

(4.55) kısıtı, bütünleşik uçak bakım ve rota planlamasının amaç fonksiyonunun kısıt olarak ikinci modeldeki halidir. Bu kısıt, birinci amaç fonksiyonu değerinin, ikinci amaç fonksiyonu değeri en iyilenirken korunmasını sağlar. Bunun sağlanabilmesi için kısıt kümesinin eşitsizliği küçük eşit olarak kullanılır.

(4.56) kısıtı, her uçak için yapay havuzdan gerçekleştirilen ilk uçuş süresinin sıfır olduğunu gösterir. (4.57) kısıtı, yapay kaynak ve yapay havuz düğümünden gerçekleştirilen uçuşların başlangıç zamanlarının sıfırdan büyük veya eşit olduğunu belirtir. (4.58) kısıtı, karar değişkenlerin ikili değişken olarak tanımlandığını gösterir.

4.10. Çok Amaçlı Bütünleşik Uçak Bakım ve Rota Planlama- Uçuş Sürelerini Dengeleyen Model

Çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlama-uçuş sürelerini dengeleyen model, bakıma girecek uçak kümesi dışındaki uçakların günlük gerçekleştirecekleri uçuşların uçuş süreleri toplamını dengeleyerek birbirine yakın olmasını sağlar. Bu model, aynı yaştaki uçakların kullanım oranlarını birbirine eşit tutmaya çalışarak, uçakların bakım maliyetlerinin birbirine yakın olmasını mümkün kılar. Çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlama-uçuş sürelerini dengeleyen modelde, ilk olarak bütünleşik uçak bakım ve rota planlama

modeli çözülür. Daha sonra uçakların uçuş sürelerini dengeleyen amaç fonksiyonu, birinci aşamada kullanılan modelin kısıtları ve ilave edilen yeni iki kısıt ile birlikte çözülür. Bu kısıtlar, bu çalışma kapsamında çok amaçlı model için kullanılması önerilen bir kısıtlardır.

İkinci modelde kullanılmak üzere ilave edilen birinci kısıt, bütünleşik uçak bakım ve rota planlaması modelinde elde edilen, uçakların yasal kalan uçuş sürelerinin toplamı olan en iyi değerin korunmasını sağlayan kısıttır. Bu kısıt, çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlama-uçuş sayılarını dengeleyen modelde açıklanmıştır.

İlave edilen ikinci kısıt (4.61), uçakların günlük uçuş süreleri toplamının birbirine yakın olacak şekilde uçuş rotalarına atanması sağlamak için kullanılan hedef kısıtlayıcı kısıttır. Uçuş sürelerini dengelemek için kullanılan (4.61) kısıtı, bakım kümesi dışındaki uçaklara uygulanarak, bakım uygulanacak uçakların kullanılabilir limitlerinin tamamından veya bu limitlere çok yakın bir şekilde yararlanılması sağlanır. Bu kısıt kümesi, sapma değişkenlerine değerler atayarak uçakların uçuş sürelerini dengeler.

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ij} x_{ijk} + SSS^-(k) - SSS^+(k) = FHV \quad k \in K / KM \quad (4.61)$$

Çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlama-uçuş sürelerini dengelemek için önerilen model aşağıdaki gibidir:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in N / \{o, t\} \quad (4.62)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ijk} = 1 \quad k \in K \quad \text{ve} \quad i = o \quad (4.63)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ijk} = 1 \quad k \in K \quad \text{ve} \quad j = t \quad (4.64)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ijk} - \sum_{j \in N} x_{jik} = 0 \quad \forall i \in N / \{o, t\} \quad \text{ve} \quad k \in K \quad (4.65)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{ojk} - \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} x_{itk} = 0 \quad (4.66)$$

$$Td_i + T_{ij} + Ts_i - Td_j \leq M(1 - x_{ijk}) \quad \forall k \in K \quad \text{ve} \quad \forall (i, j) \in N / \{o, t\} \quad (4.67)$$

$$Tdo_{ok} + T_{oi} - Td_i \leq M(1 - x_{oik}) \quad \forall k \in K \quad \text{ve} \quad \forall (i) \in N \quad (4.68)$$

$$Td_i + T_{it} + Ts_i - Tdt_{ik} \leq M(1 - x_{itk}) \quad \forall k \in K \quad \text{ve} \quad \forall (i) \in N \quad (4.69)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ijk} \leq \sum_{c \in C} Ca_{ic} Cd_{jc} \quad \forall i \in N \quad \text{ve} \quad \forall j \in N \quad (4.70)$$

$$x_{ojk} \leq Cd_{jc} Ca_{oc} \quad \forall j \in N \quad \text{ve} \quad k \in K \quad (4.71)$$

$$\sum_{j \in DFFc(j)} x_{ijk} = 1 \quad \forall k \in OWNc(k) \quad \text{ve} \quad i = o \quad (4.72)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{m \in Mc \in C} x_{itm} Ca_{ic} Cmt_{mt,c} A_{mt,k} = 1 \quad \forall k \in KM \quad (4.73)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ij} x_{ijk} \leq r_k \quad \forall k \in K \quad (4.74)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in N_{th_u}} \sum_{j \in N_{th_u}} x_{ijk} = 1 \quad (4.75)$$

$$\sum_{i \in KMc(i)} x_{ijk} = 1 \quad \forall k \in KMw \quad \text{ve} \quad j = t \quad (4.76)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ij} x_{ijk} + SSS^-(k) - SSS^+(k) = FHV \quad k \in K / KM \quad (4.77)$$

$$\sum_{k \in K} \left((r_k) - \left(\frac{1}{(r_k)} \right) \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ij} x_{ijk} \right) \leq z1 \quad (4.78)$$

$$t_{oj} = 0 \quad \forall k \in K \quad (4.79)$$

$$Tdo_{ok} \geq 0 \quad \text{ve} \quad Tdt_{ik} \geq 0 \quad \forall k \in K \quad (4.80)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, i \in N \quad \text{ve} \quad j \in N \quad (4.81)$$

$$\text{(Amaç 1) Min} \quad \sum_{k \in K} c_k(r) \quad (4.82)$$

$$\text{(Amaç 2) Min} \quad \sum_{k \in K} SSS^+(k) + SSS^-(k) \quad (4.83)$$

Çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlama-uçuş sürelerini dengeleyen modelde, iki tane amaç fonksiyonu vardır. Birinci amaç fonksiyonu (4.82), uçakların bakıma girmeden önceki yasal olarak kullanılabilir uçuş süresini uçakları uygun rotalara atayarak enküçükler. İkinci amaç fonksiyonu (4.83) ise uçakları uçuş rotalarına, günlük uçuş süreleri toplamını dengeleyerek atar.

(4.62) kısıtı, uçuş bacak kapsam kısıtı, (4.63) ve (4.64) kısıtları, uçak kapsam kısıtlarıdır. (4.65) ve (4.66) kısıtları, akış koruma kısıtlarıdır. (4.67)-(4.73) kısıtları, rota ve öncelik kısıtlarıdır. (4.74) kısıtı, uçakların yasal kalan uçuş saat kısıtıdır. (4.75) kısıt kümesi, kesintisiz uçuş kısıtıdır. (4.76) kısıtı, takvim zamanı üzerinden bakım yapılmasını sağlayan kısıttır. (4.77) kısıtı, uçakların uçuş

sürelerini dengelemek için kullanılan hedef kısıtlayıcı kısıttır. (4.78) kısıtı, bütünlük uçak bakım ve rota planlamasının amaç fonksiyonunun kısıt olarak ikinci modeldeki halidir. (4.79) kısıtı, her uçak için yapay havuzdan gerçekleştirilen ilk uçuş süresinin sıfır olduğunu gösterir. (4.80) kısıtı, yapay kaynak ve yapay havuz düğümünden gerçekleştirilen uçuşların başlangıç zamanlarının sıfırdan büyük veya eşit olduğu belirtir. (4.81) kısıtı, karar değişkenlerinin ikili değişken olarak tanımlandığını gösterir.

4.11. Çok Amaçlı Bütünlük Uçak Bakım ve Rota Planlama- Uçuş Sayılarını ve Sürelerini Dengeleyen Model

Çok amaçlı bütünlük uçak bakım ve rota planlama-uçuş sayılarını ve sürelerini dengeleyen modelde, ardışık olarak belirlenen önceliğe göre çözülen üç model bulunmaktadır. Birinci öncelikli model, bütünlük uçak bakım ve rota planlama modelidir. Bu modelin çözümünde elde edilen, uçakların kullanılabilir yasal uçuş süreleri toplamı olan, en iyi değer korunarak ikinci model çözülür. İkinci model, çok amaçlı bütünlük uçak bakım ve rota planlama-uçuş sayılarını dengeleyen modeldir. İkinci modelin çözümünde de elde edilen en iyi değer korunarak üçüncü model çözülür. Üçüncü model, ilk iki modelde elde edilen değerleri koruyarak, uçakların günlük toplam uçuş sürelerini dengeleyerek uygun rotalara atanmasını sağlar.

Her modelin amacı farklı olduğu için her modelde farklı amaç fonksiyonu ve modellere özgü ilave kısıtlar kullanılmıştır. İkinci ve üçüncü modeller çözülürken, bir önceki modeldeki en iyi değer korunması için çözülen modele yeni kısıtlar ilave edilmiştir. Birinci ve ikinci modelin çözüm süreci daha önceki başlıklar içerisinde açıklanmıştır. Üçüncü modelin çözümünde, modele iki yeni kısıt ilave edilmiştir. Bu kısıtlardan birincisi (4.84), ikinci model olan çok amaçlı uçak bakım ve rota planlama-uçuş sayılarını dengeleyen modelin en iyi değeri olan sapma değişkenlerinin toplamını korumak için kullanılan kısıttır. İlave edilen yeni kısıtın sağ tarafına, ikinci model olan, çok amaçlı bütünlük uçak bakım ve rota planlama-uçuş sayılarını eşitleyen modelinin en iyi değeri atanır ve üçüncü model çözülür.

$$\sum_{k \in K} SS^+(k) + SS^-(k) \leq z2 \quad (4.84)$$

İkinci kısıt kümesi, uçakların atandıkları günlük uçuş süreleri toplamını dengelemek için kullanılan kısıt kümesidir. Bu kısıt, çok amaçlı uçak bakım ve rota planlama-uçuş sürelerini dengeleyen modelde açıklanan uçuş sürelerini dengelemek için kullanılan kısıtın aynısıdır.

Havayolu işletmeleri, yukarıda açıklanan öncelik sırasına göre önerilen bu modeli kullanarak; öncelikli olarak uçakların işletme maliyetlerini enküçükler, sırasıyla uçuş mürettebatından uçuş sayısı temel alınarak maksimum oranda yararlanır ve uçak kullanım oranlarını birbirine eşit tutarak hem bakım maliyetlerinin dengeli seyretmesini hem de uçak yıpranma oranlarını aynı seviyede tutmayı sağlar.

Çok amaçlı bütünsel uçak bakım ve rota planlama-uçuş sayılarını ve sürelerini dengelemek üzere önerilen model aşağıdaki gibidir.

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in N / \{o, t\} \quad (4.85)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ijk} = 1 \quad k \in K \quad \text{ve} \quad i = o \quad (4.86)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ijk} = 1 \quad k \in K \quad \text{ve} \quad j = t \quad (4.87)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ijk} - \sum_{j \in N} x_{jik} = 0 \quad \forall i \in N / \{o, t\} \quad \text{ve} \quad k \in K \quad (4.88)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{ojk} - \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} x_{itk} = 0 \quad (4.89)$$

$$Td_i + T_{ij} + Ts_i - Td_j \leq M(1 - x_{ijk}) \quad \forall k \in K \quad \text{ve} \quad \forall (i, j) \in N / \{o, t\} \quad (4.90)$$

$$Tdo_{ok} + T_{oi} - Td_i \leq M(1 - x_{oik}) \quad \forall k \in K \quad \text{ve} \quad \forall (i) \in N \quad (4.91)$$

$$Td_i + T_{it} + Ts_i - Tdt_{tk} \leq M(1 - x_{itk}) \quad \forall k \in K \quad \text{ve} \quad \forall (i) \in N \quad (4.92)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ijk} \leq \sum_{c \in C} Ca_{ic} Cd_{jc} \quad \forall i \in N \quad \text{ve} \quad \forall j \in N \quad (4.93)$$

$$x_{ojk} \leq Cd_{jc} Ca_{oc} \quad \forall j \in N \quad \text{ve} \quad k \in K \quad (4.94)$$

$$\sum_{j \in DFFc(j)} x_{ijk} = 1 \quad \forall k \in OWNc(k) \quad \text{ve} \quad i = o \quad (4.95)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{m \in Mc \in C} x_{itm} Ca_{ic} Cmt_{mt,c} A_{mt,k} = 1 \quad \forall k \in KM \quad (4.96)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ij} x_{ijk} \leq r_k \quad \forall k \in K \quad (4.97)$$

$$\sum_{i \in KM_c(i)} x_{ijk} = 1 \quad \forall k \in KM_w \text{ ve } j = t \quad (4.98)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in N_{th_z}} \sum_{j \in N_{th_z}} x_{ijk} = 1 \quad (4.99)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{ijk} + SS^-(k) - SS^+(k) = FNV \quad k \in K / KM \quad (4.100)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ij} x_{ijk} + SSS^-(k) - SSS^+(k) = FHV \quad k \in K / KM \quad (4.101)$$

$$\sum_{k \in K} \left(r_k - \left(\frac{1}{r_k} \right) \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ij} x_{ijk} \right) \leq z1 \quad (4.102)$$

$$\sum_{k \in K} SS^+(k) + SS^-(k) \leq z2 \quad (4.103)$$

$$t_{oj} = 0 \quad \forall k \in K \quad (4.104)$$

$$Tdo_{ok} \geq 0 \quad \text{ve} \quad Tdt_{ik} \geq 0 \quad \forall k \in K \quad (4.105)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, i \in N \text{ ve } j \in N \quad (4.106)$$

$$\text{(Amaç 1) Min} \quad \sum_{k \in K} c_k(r) \quad (4.107)$$

$$\text{(Amaç 2) Min} \quad \sum_{k \in K} SS^+(k) + SS^-(k) \quad (4.108)$$

$$\text{(Amaç 3) Min} \quad \sum_{k \in K} SSS^+(k) + SSS^-(k) \quad (4.109)$$

Çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlama-uçuş sayı ve sürelerini dengeleyen modelde, üç tane amaç fonksiyonu vardır. Birinci amaç fonksiyonu (4.107), uçakların bakıma girmeden önceki yasal olarak kullanılabilir uçuş saatini uçakları uygun rotalara atayarak enküçükler. İkinci amaç fonksiyonu (4.108), uçakların uçuş sayılarını dengeleyerek rota planları oluşturur. Üçüncü amaç fonksiyonu (4.109) ise uçakların günlük uçuş süreleri toplamını dengeleyerek uçuş rota planları oluşturur.

(4.85) kısıtı, uçuş bacak kapsam kısıtı, (4.86) ve (4.87) kısıtları, uçak kapsam kısıtıdır. (4.88) ve (4.89) kısıtları, akış koruma kısıtlarıdır. (4.90)-(4.96) kısıtları, rota ve öncelik kısıtlarıdır.

(4.97) kısıtı, uçakların yasal kalan uçuş saat kısıtıdır. (4.98) kısıtı, gün sayısı üzerinden bakım yapılmasını sağlayan kısıttır. (4.99) kısıt kümesi, kesintisiz uçuş kısıtıdır. (4.100) kısıtı, uçakların atandıkları uçuş sayılarını dengelemek için kullanılan hedef sınırlayıcı kısıttır. (4.101) kısıtı, uçakların uçuş sürelerini dengelemek için kullanılan hedef kısıtlayıcı kısıttır.

(4.102) kısıtı, bütünleşik uçak bakım ve rota planlamasının amaç fonksiyonunun kısıt olarak ikinci modeldeki halidir. (4.103) kısıtı, bütünleşik uçak bakım ve rota planlaması-uçuş sayıları dengeleyen modeldeki amaç fonksiyonunun kısıt olarak üçüncü modeldeki halidir.

(4.104) kısıtı, her uçak için yapay havuzda gerçekleştirilen ilk uçuş süresinin sıfır olduğunu gösterir. (4.105) kısıtı, yapay kaynak ve yapay havuz düğümünden gerçekleştirilen uçuşların başlangıç zamanlarının sıfırdan büyük veya eşit olduğunu belirtir. (4.106) kısıtı, karar değişkenlerin ikili değişken olarak tanımlandığını gösterir.

4.12. Çok Amaçlı Bütünleşik Uçak Bakım ve Rota Planlama- Uçuş Sürelerini ve Sayılarını Dengeleyen Model

Çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlama-uçuş süre ve sayılarını dengeleyen modelin, çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlama-uçuş sayı ve sürelerini dengeleyen modelden farklı olduğu nokta, uçuş sürelerini eşitleyen modelin uçuş sayılarını eşitleyen modelden önce çözülmesidir.

Ardışık olarak çözülen ikinci ve üçüncü modellerde, bir önceki modeldeki en iyi değerin korunması için çözülen modele yeni kısıtlar ilave edilmiştir. Birinci ve ikinci modelin çözüm süreci daha önceki başlıklar içerisinde açıklanmıştır. Üçüncü modelin çözümünde, modele iki yeni kısıt ilave edilmiştir. Bu kısıtlardan birincisi (4.110), ikinci model olan çok amaçlı uçak bakım ve rota planlama-uçuş sürelerini dengeleyen modelin en iyi değeri olan sapma değişkenlerinin toplamını korumak için kullanılan kısıttır. İlave edilen yeni kısıtın sağ tarafına, ikinci model olan, çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlama-uçuş sürelerini eşitleyen modelinin en iyi değeri atanır ve üçüncü model çözülür.

$$\sum_{k \in K} SSS^+(k) + SSS^-(k) \leq z2 \quad (4.110)$$

İkinci kısıt kümesi, uçakların atandıkları günlük uçuşların sayılarının toplamını dengelemek için kullanılan kısıt kümesidir. Bu kısıt, çok amaçlı uçak bakım ve rota planlama-uçuş sayılarını dengeleyen modelde açıklanan uçuş sayılarını dengelemek için kullanılan kısıtın aynısıdır.

Havayolu işletmesinde karar verici, önceliklerini belirleyip işletmesi açısından uygun modeli seçerek uçak ve mürettebat planlarını oluşturabilir. Son iki modelin ortak noktası, her ikisinde de bütünlük uçak bakım ve rota planlama modeli öncelikli olarak çözülerek uçakların yasal kullanılabilir uçuş saatlerinin enküçüklenmesidir.

Çok amaçlı bütünlük uçak bakım ve rota planlama-uçuş süre ve sayılarını dengeleyen modelde kullanılan kısıt ve amaç fonksiyonları aşağıdaki gibidir:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in N / \{o, t\} \quad (4.111)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ijk} = 1 \quad k \in K \quad \text{ve} \quad i = o \quad (4.112)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ijk} = 1 \quad k \in K \quad \text{ve} \quad j = t \quad (4.113)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ijk} - \sum_{j \in N} x_{jik} = 0 \quad \forall i \in N / \{o, t\} \quad \text{ve} \quad k \in K \quad (4.114)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{ojk} - \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} x_{itk} = 0 \quad (4.115)$$

$$Td_i + T_{ij} + Ts_i - Td_j \leq M(1 - x_{ijk}) \quad \forall k \in K \quad \text{ve} \quad \forall (i, j) \in N / \{o, t\} \quad (4.116)$$

$$Tdo_{ok} + T_{oi} - Td_i \leq M(1 - x_{oik}) \quad \forall k \in K \quad \text{ve} \quad \forall (i) \in N \quad (4.117)$$

$$Td_i + T_{it} + Ts_i - Tdt_{tk} \leq M(1 - x_{itk}) \quad \forall k \in K \quad \text{ve} \quad \forall (i) \in N \quad (4.118)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ijk} \leq \sum_{c \in C} Ca_{ic} Cd_{jc} \quad \forall i \in N \quad \text{ve} \quad \forall j \in N \quad (4.119)$$

$$x_{ojk} \leq Cd_{jc} Ca_{oc} \quad \forall j \in N \quad \text{ve} \quad k \in K \quad (4.120)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{m \in M} \sum_{c \in C} x_{itm} Ca_{ic} Cmt_{m,c} A_{m,t,k} = 1 \quad \forall k \in KM \quad (4.121)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ij} x_{ijk} \leq r_k \quad \forall k \in K \quad (4.122)$$

$$\sum_{i \in KM_c(i)} x_{ijk} = 1 \quad \forall k \in KM_w \text{ ve } j = t \quad (4.123)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in N_{th_u}} \sum_{j \in N_{th_u}} x_{ijk} = 1 \quad (4.124)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{ijk} + SS^-(k) - SS^+(k) = FNV \quad k \in K / KM \quad (4.125)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ij} x_{ijk} + SSS^-(k) - SSS^+(k) = FHV \quad k \in K / KM \quad (4.126)$$

$$\sum_{k \in K} \left((r_k) - \left(\frac{1}{(r_k)} \right) \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ij} x_{ijk} \right) \leq z1 \quad (4.127)$$

$$\sum_{k \in K} SSS^+(k) + SSS^-(k) \leq z2 \quad (4.128)$$

$$t_{oj} = 0 \quad \forall k \in K \quad (4.129)$$

$$Tdo_{ok} \geq 0 \quad \text{ve} \quad Tdt_{ik} \geq 0 \quad \forall k \in K \quad (4.130)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, i \in N \text{ ve } j \in N \quad (4.131)$$

$$\text{(Amaç 1) Min } \sum_{k \in K} c_k(r) \quad (4.132)$$

$$\text{(Amaç 2) Min } \sum_{k \in K} SSS^+(k) + SSS^-(k) \quad (4.133)$$

$$\text{(Amaç 3) Min } \sum_{k \in K} SS^+(k) + SS^-(k) \quad (4.134)$$

Çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlama-uçuş süre ve sayılarını dengeleyen modelde, üç tane amaç fonksiyonu vardır. (4.132) amaç fonksiyonu, uçakların bakıma girmeden önceki yasal olarak kullanılabilir uçuş saatini uçakları uygun rotalara atayarak enküçükler. İkinci amaç fonksiyonu (4.133), birinci amaç fonksiyonundaki en iyi değeri koruyarak uçakların uçuş sürelerini dengeler. Üçüncü amaç fonksiyonu (4.134) ise birinci ve ikinci modelin sonuçlarını dikkate alarak uçakların uçuş sayılarını dengeler.

(4.111) kısıtı, uçuş bacak kapsam kısıtı, (4.112) ve (4.113) kısıtları, uçak kapsam kısıtlarıdır. (4.114) ve (4.115), akış koruma kısıtlarıdır. (4.116)-(4.121) kısıtları, rota ve öncelik kısıtlarıdır. (4.122) kısıtı, uçakların yasal kalan uçuş saat kısıtıdır. (4.123) kısıtı, gün sayısı üzerinden bakım yapılmasını sağlayan kısıttır. (4.124) kısıt kümesi, kesintisiz uçuş kısıtıdır. (4.125) kısıtı, uçakların atandıkları

uçuş sayılarını dengelemek için kullanılan hedef kısıtlayıcı kısıttır. (4.126) kısıtı, uçakların uçuş sürelerini dengelemek için kullanılan hedef kısıtlayıcı kısıttır.

(4.127) kısıtı, bütünleşik uçak bakım ve rota planlamasının amaç fonksiyonunun kısıt olarak ikinci modeldeki halidir. (4.128) kısıtı, bütünleşik uçak bakım ve rota planlaması-uçuş sürelerini dengeleyen modeldeki amaç fonksiyonunun kısıt olarak üçüncü modeldeki halidir.

(4.129) kısıtı, her uçak için yapay havuzda gerçekleştirilen ilk uçuş süresinin sıfır olduğunu gösterir. (4.130) kısıtı, yapay kaynak ve yapay havuz düğümünden gerçekleştirilen uçuşların başlangıç zamanlarının sıfırdan büyük veya eşit olduğu belirtir. (4.131) kısıtı, karar değişkenlerin ikili değişken olarak tanımlandığını gösterir.

Bu bölümde genel olarak, çok amaçlı bütünleşik uçak ve rota planlaması ile ilgili olarak önerilen matematiksel modeller, amaç fonksiyonları ve kısıtlarıyla birlikte açıklanmıştır. Her bir modelin hangi amaçla kullanılabileceği, modellerin çözüm sırasına göre oluşturulan yeni kısıtların önemi ve amaçları vurgulanmıştır. Bundan sonraki bölümde, önerilen matematiksel modellerin uygulama ve sonuçları hakkında bilgi verilecektir.

5. YAKLAŞIMIN UYGULANMASI ve ÇÖZÜMLERİN DEĞERLENDİRMESİ

Havayolu işletmelerinin gerçek verilerinden yararlanılarak oluşturulan örnek uçuş tarifeli problem setleri dikkate alınarak önerilen modeller CPLEX/GAMS karma tamsayılı doğrusal program çözücü yazılımı kullanılarak çözülmüş ve elde edilen sonuçlar şekil haline getirilerek yorumlanmıştır. Örnek veriler çözümlenirken aşağıdaki kabuller dikkate alınmıştır:

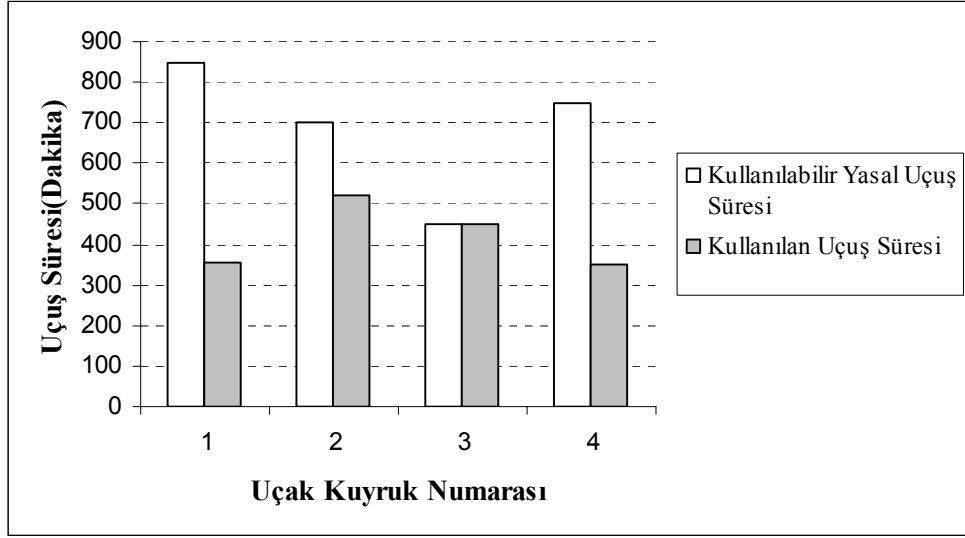
- Havayolu işletmesinin, uçuş tarifesini ve filo atama problemini önceden çözdüğü kabul edilmiştir.
- Uçuş tarifesinin, topla-dağıt serim yapısının özelliklerini taşıyacak şekilde ve uçuş bağlantılarını mümkün kılacak şekilde olmasına dikkat edilmiştir.
- Bir merkezi hava alanı aracılığıyla gerçekleştirilen kesintisiz uçuşların önceden müşteri talepleri dikkate alınarak tespit edildiği kabul edilmiştir.
- Matematiksel model oluşturulurken serim yapısı olarak bağlantı serim yapısı tercih edilmiştir.
- Bütün uçuşlarda minimum dönüş zamanı 40 dakika olarak kabul edilmiştir.
- Uçuş süreleri ve uçağın bakım limit değerlendirmeleri dakika üzerinden dikkate alınmıştır.
- Model, tek bir filoya özgü çözülmüştür. Bu yüzden, uçakların herhangi bir hava alanına iniş-kalkışını sınırlandıran kısıtlar kullanılmamıştır.
- Bakım yapılan hava alanlarında, bakım hangar alanı ve teknisyen sayısını yeterli olduğu kabul edilmiştir.

- Örneklerde kullanılan uçakların bakım periyot zamanları için bir havayolu işletmesi tarafından kullanılan ve Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü'nce uygun görülen limit değerler referans alınmıştır.
- Kullanılabilir yasal uçuş süresi, 450 uçuş dakika ve altında olan uçaklar kullanılan model tarafından bakım yapılacak uçak kümesine atanmıştır.
- Gün sayısı dikkate alınarak bakım uygulanması gereken uçakların karar vericiye bilgi olarak verildiği kabul edilmiştir.

5.1. 26 Uçuşlu Problem Seti

26 uçuşlu problem seti önerilen matematiksel modellerin uygulamaları ve sonuçların değerlendirilmesi için test amaçlı olarak hazırlanmıştır. 26 uçuşlu programda uçuşların gerçekleştirilmesi için gerekli uçak sayısının 3 olmasına karşın, sonuçları daha iyi değerlendirmek için bu sayı 4 olarak kullanılmıştır. Modelin çözümünde bir kesintisiz uçuş ve bir günlük bakım uygulanacak uçak olduğu kabul edilmiştir.

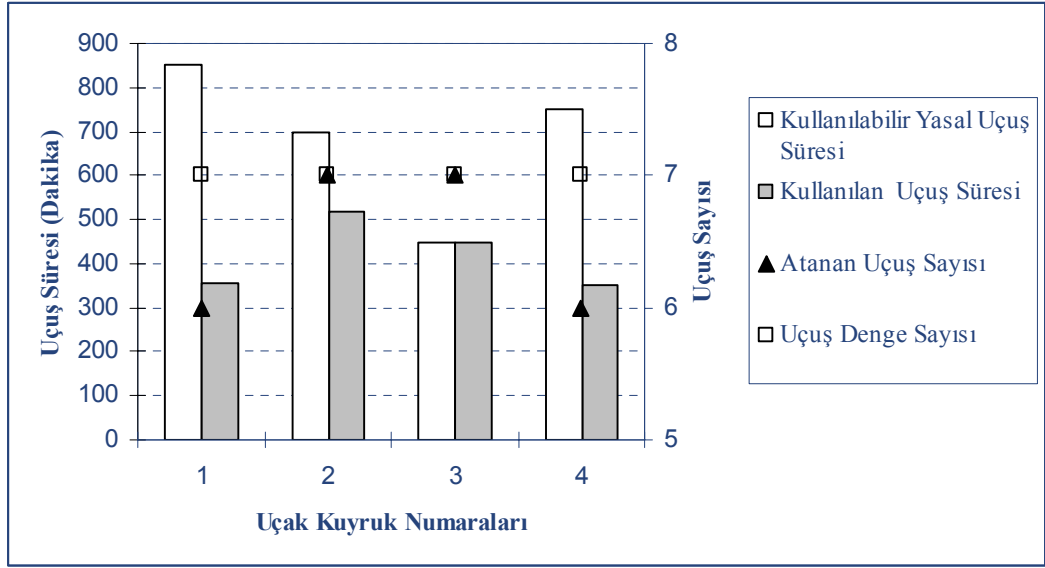
Bütünleşik uçak rota ve bakım planlama modelinin sonuçlarında, uçakların kullanılabilir uçuş saatlerine karşılık, uçakların atandığı uçuş süreleri toplamı Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Kullanılabilir yasal uçuş süresi 750 dakika olan 4 kuyruk numaralı uçak, toplam 350 dakikalık; 450 uçuş dakika olan 3 kuyruk numaralı uçak toplam 450 dakikalık uçuşa atanmıştır. Şekil 5.1'de görüldüğü gibi model ilk olarak, kullanılabilir yasal uçuş süresi enküçük olan uçağın uçuş süresinin tamamını kullanacak şekilde rota ataması yapmıştır. Bu her zaman böyle gerçekleşmemektedir. Uçağın bulunduğu yer, uçuş saati, bağlantılı olabileceği diğer uçuşlar ve son uçuşunu gerçekleştireceği hava alanı, uçuş bağlantılarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir.



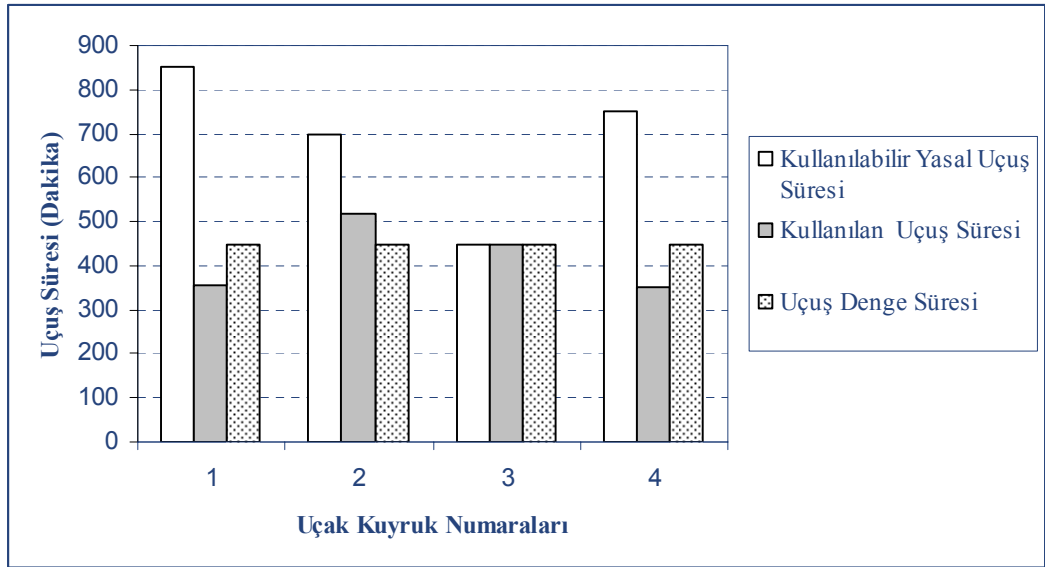
Şekil 5.1. 26 uçuş için bütünleşik uçak bakım ve rota planlamasında uçaklara atanan uçuş süreleri ile uçakların kullanılabilir yasal uçuş sürelerinin karşılaştırılması

Havayolu işletmelerinde bir problemin birden fazla amaç için çözülmesi avantajları nedeniyle tercih edilebilir. Örneğin, bakım yapılacak kümede yer alan uçaklar dışındaki uçakların günlük atandıkları uçuş sayıları toplamının birbirine yakın olması istenebilir. 26 uçuş ve 4 uçak için çok amaçlı bütünleşik uçak rota ve bakım planlaması-uçuş sayılarını dengeleyen modelin sonuçları, uçakların gerçekleştirdikleri uçuş süreleri de dikkate alınarak Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Uçakların dengede yani aynı olması istenilen uçuş sayısı 7 iken, kuyruk numarası üç olan uçak 7 uçuş sayısı ile 450 dakikalık, kuyruk numarası dört olan uçak 6 uçuş sayısı ile 350 dakikalık uçuş gerçekleştirmiştir. Kuyruk numarası bir ve iki olan uçakların uçuş sayıları sırasıyla 6 ve 7 iken, bu sayılara karşılıklı gelen uçuş sürelerinin toplamı 355 ve 520 dakika olmuştur.

Aynı problem, çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlaması-uçuş sürelerini dengeleyen model için çözüldüğünde Şekil 5.3’deki gibi grafik elde edilmiştir. Uçakların birbirine eşit olması istenilen uçuş sayısı 450 dakika iken, bu değeri kuyruk numarası üç olan uçak tarafından tam olarak sağlanmıştır. Sonuçlar, bütünleşik uçak rota ve bakım planlama modelinin sonuçları ile karşılaştırıldığında aynı sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Bu, problem boyutunun küçük ve en iyi çözümün her iki modelde de aynı olmasından kaynaklanmıştır.



Şekil 5.2. 26 uçuş tarifeli çok amaçlı bütünlük uçak bakım ve rota planlaması-uçuş sayılarını dengeleyen modelde uçaklara atanan uçuş süreleri ile uçakların kullanılabilir yasal uçuş sürelerinin karşılaştırılması



Şekil 5.3. 26 uçuş tarifeli çok amaçlı bütünlük uçak bakım ve rota planlaması-uçuş sürelerini dengeleyen modelde uçaklara atanan uçuş süreleri ile uçakların kullanılabilir yasal uçuş sürelerinin karşılaştırılması

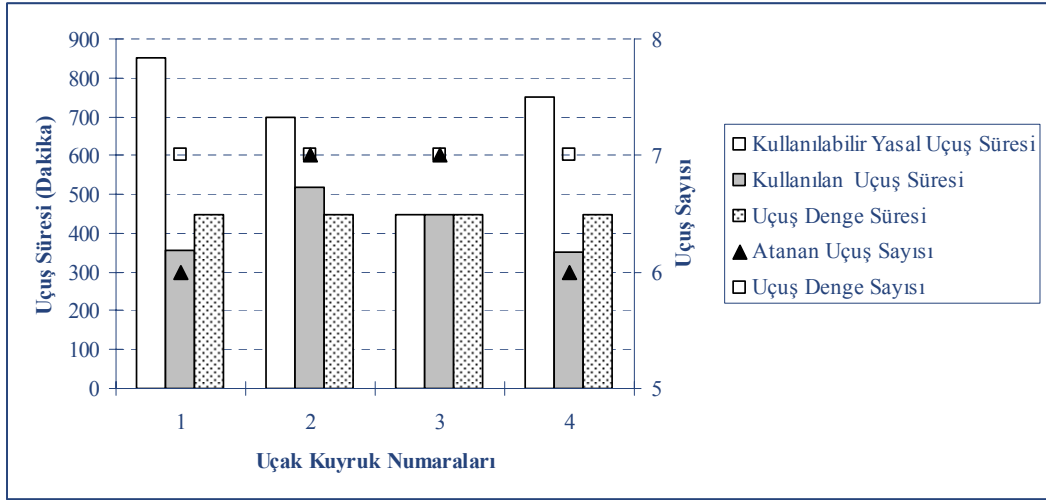
Çözüm grafikleri verilen son iki çok amaçlı modellerde öncelikli olarak uçakların bütünlük uçak bakım ve rotalama problemi çözülmüştür. Daha sonra karar vericinin tercih ettiği ikinci amaç için ya uçuş sayılarını ya da uçuş sürelerini

dengeleyen model kullanılmıştır. Her iki modelde de bütünleşik uçak bakım ve rotalama modelinde elde edilen çözümün en iyi değeri korunmuştur. Bunun için birinci öncelikli modelin amaç fonksiyonu, ikinci öncelikli modelde kısıt olarak yazılmış ve kısıtın eşitsizliği küçük eşit olarak kullanılmıştır. Bu kısıtın sağ taraf değerine birinci öncelikli modelin en iyi değeri atanmıştır.

Karar verici, havayolu işletmesindeki planlama ve çizelgeleme problemlerini,

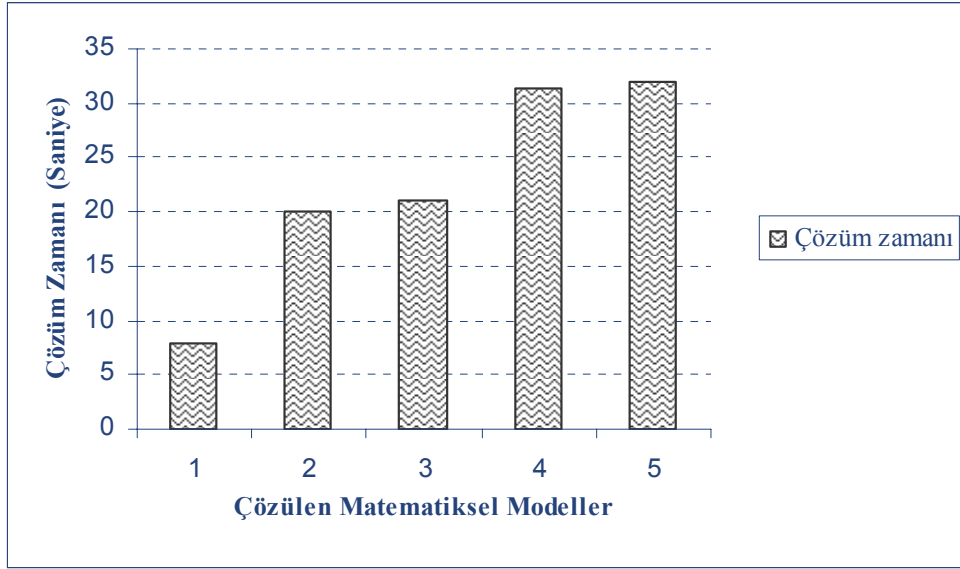
- çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlama - uçuş sayılarını ve sürelerini dengeleyen veya
- çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlama - uçuş sürelerini ve sayılarını dengeleyen

olarak çözmek isteyebilir. Çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlama-uçuş sayılarını ve sürelerini dengeleyen modelin sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Örneğin bir kuyruk numaralı uçağın 850 olan yasal kullanılabilir uçuş süresininin 355 dakikası kullanılarak, uçuş denge sayısına eşit olacak şekilde altı uçuşa atanmıştır. Bu model çözülürken ilk olarak, bütünleşik uçak bakım ve rotalama modelinin çözülmüştür. Bu modelin amaç fonksiyonu, kısıt olarak ikinci öncelikli olan çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rotalama-uçuş sayılarını dengeleyen modeline eklenmiş ve çözülmüştür. Kısıt olarak yazılan amaç fonksiyonunun sağ tarafına birinci öncelikli modelin en iyi değeri atanırken, küçük eşit eşitsizliği kullanılmıştır. Bu eşitsizliğin kullanılması, birinci öncelikli modelde elde edilen en iyi değer korunmasını sağlamıştır. İkinci model çözüldükten sonra, ikinci modelin amaç fonksiyonu, üçüncü öncelikli modele kısıt olarak ilave edilmiştir. Daha öncekine benzer olarak, yazılan kısıtın sağ tarafına ikinci modelin en iyi değeri atanmıştır. Modelin çözülmesiyle çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlama-uçuş sayılarını ve sürelerini dengeleyen çözüm elde edilmiştir.



Şekil 5.4. 26 uçuş tarifeli çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlaması-uçuş sayılarını ve sürelerini dengeleyen modelin sonuç grafiği

Havayolu sektöründe karşılaşılan problemlerin en kısa süre içerisinde çözülmesi ve planların uygulamaya konulması işletme karlılığında son derece etkilidir. Uçak arızası, kötü hava koşulları, hava alanı veya hava trafik yoğunluğu gibi nedenlerden dolayı uzun dönem için oluşturulan planlar uygulanamaz duruma gelebilir. Bu durumda, mevcut koşulların dikkate alınarak yeni planlamaların yapılması gerekir. 26 uçuş tarifesi için bu çalışmada önerilen modeller çözülmüş ve çözüm zamanının modellere göre değişimi Şekil 5.5'te verilmiştir. Gerçek hayatta çok sayıda uçuş içeren uçuş tarifelerinin çözüm zamanı birkaç saatten daha fazladır. Bununla birlikte, daha büyük ölçekteki problemlerin çözüm zamanının benzer bir grafik oluşturacağı düşünülmektedir. Çok amaçlı modellerde, öncelikli amaç fonksiyonlarının kısıt olarak ikinci ve üçüncü öncelikli modellere entegre edilmesi ve bu kısıtın koşullarını sağlayan en iyi çözümün araştırılması çözüm zamanını arttırdığı görülmüştür. İşletmeler beklenmeyen durumlarda karşılaştıklarında ilk aşamada mevcut durumun üstesinden gelmek için ve çok amaçlı modelin sonuçları elde edilinceye kadar tek amaçlı modelin sonuçları kullanılabilir. Böylece, çok amaçlı modeller çalıştırılarak daha iyi çözümü elde edilinceye kadar tek amaçlı modellerin çözümleri kullanılarak zaman en iyi şekilde değerlendirilirken, işletme açısından da riskler enküçüklenebilir.

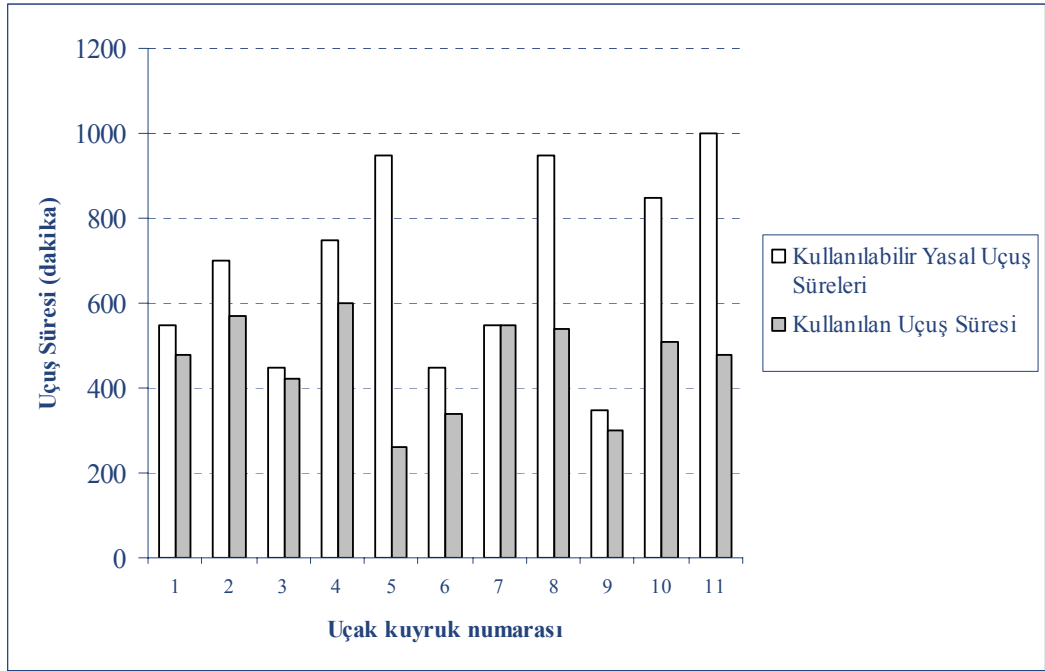


Şekil 5.5. 26 uçuşlu için çözülen beş modelin çözüm zamanları arasındaki ilişki 1-Bütünleşik uçak bakım ve rota planlama modeli; 2-Çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlama- uçuş sayılarını dengeleyen model; 3- Çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlama-uçuş sürelerini dengeleyen model; 4-Çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlama-uçuş sayılarını ve sürelerini dengeleyen model; 5- Çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlama-uçuş sürelerini ve sayılarını dengeleyen model.

5.2. 75 Uçuşlu Problem Seti

75 uçuşlu problem seti 11 yapay 64 gerçek uçuştan oluşmaktadır. Bu uçuş tarifesi, Türkiye’de faaliyet gösteren özel bir havayolu işletmesinin uçuş tarifesinden yararlanılarak hazırlanmıştır. 64 uçuşun gerçekleştirilmesi için gerekli minimum uçak sayısı 11 olduğu için uçak sayısı 11 olarak alınmıştır. Uçuş tarifesi, topla-dağıt uçuş serim yapısı olarak oluşturulmuş ve İstanbul tek bir merkezi hava alanı olarak kullanılmıştır. Bu, uçuşlar arasında daha az bağlantının olduğu anlamına gelmektedir.

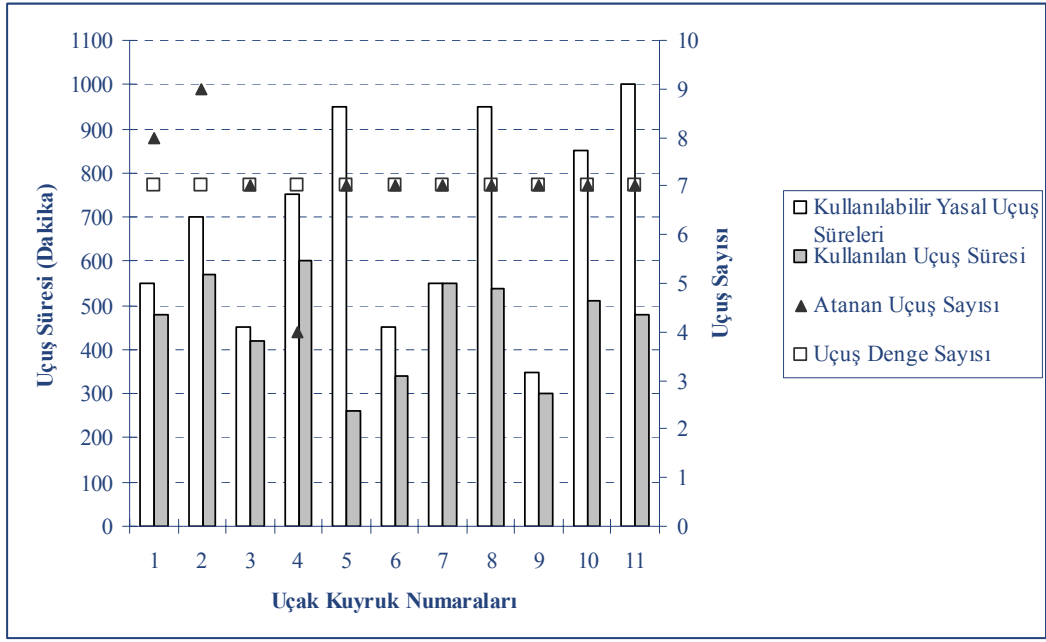
75 uçuş-11 uçak için bütünleşik uçak bakım ve rota planlamasında uçaklara atanan uçuş süreleri toplamı ve uçakların yasal kullanılabilir uçuş süre karşılaştırılması Şekil 5.6’da gösterilmiştir.



Şekil 5.6. 75 uçuş için bütünleşik uçak bakım ve rota planlamasında uçaklara atanan uçuş süreleri ile uçakların kullanılabilir yasal uçuş sürelerinin karşılaştırılması

Havayolu sektöründe en büyük maliyet yolcu talebi varken uçağın yerde beklemesidir. Amaç, uçakları mümkün olduğu kadar havada tutmak olduğu için karşılaşılan problemleri çözmek için kullanılan en iyileme araçlarının en kısa sürede çözüm vermesi beklenir. Literatür araştırmasında, kısa dönem için hazırlanan modellerin 2 saat (7200 saniye) civarında çalıştırıldıkları ve elde edilen sonuçlara göre değerlendirme yapıldığı görülmüştür. Benzer yaklaşımla, önerilen modellerde çözüm zamanı 2 saat sınırlandırılmış ve değerlendirmeler bunun üzerinden yapılmıştır.

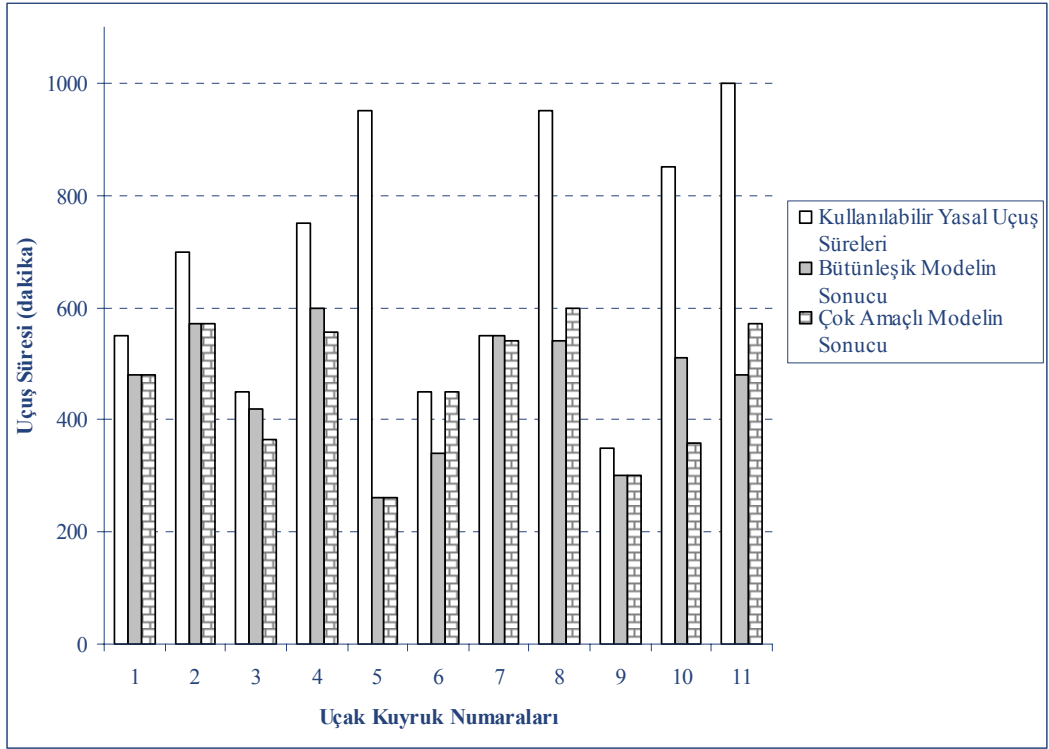
75 uçuş-11 uçaklı problemin, çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rotalama-uçuş sayılarını dengeleyen model zaman kısıtlaması nedeniyle durmuştur. Elde edilen sonuçlar, Şekil 5.7’de gösterilmiştir. GAMS, başlangıç aşamasındaki 146,800 kısıt, 47,917 sütun ve 423,682 değişkenden oluşan modeli, 564 kısıt, 2837 sütun ve 10,370 değişkene indirgeyerek çözmüştür. 2 saatlik sürecin sonunda elde edilen değer, en iyi değerden %16.6 kadar farklı olduğu ve aynı modelin 8 saat çalıştırıldığında elde edilen sonucun değişmediği görülmüştür. Bu durum modelin, en iyi çözümü bulmak için daha fazla zamana ihtiyacı olduğu şeklinde yorumlanmıştır.



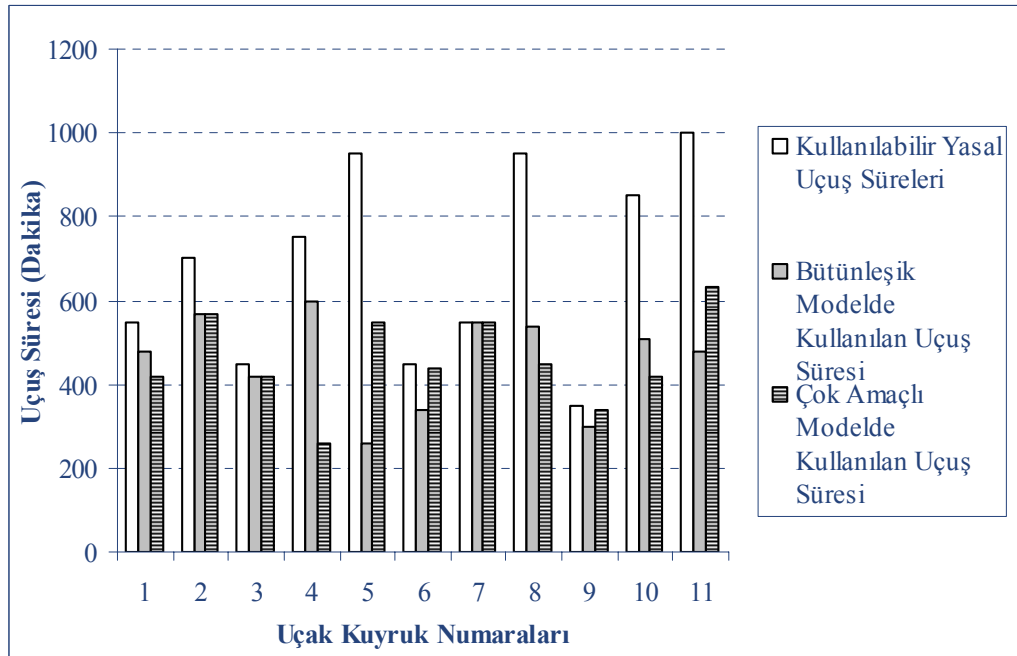
Şekil 5.7. 75 uçuş için çok amaçlı bütünlük uçak bakım ve rota planlaması-uçuş sayılarını dengeleyen modelin sonuç grafiği

Bütünlük uçak bakım ve rotalama modeli ile çok amaçlı bütünlük uçak bakım ve rotalama-uçuş sayılarını dengeleyen modelin çözümünde uçaklara atanan uçuş süreleri toplamalarının uçakların kalan yasal uçuş süreleri ile değişimi Şekil 5.8’de gösterilmiştir. İki modelin sonuçları karşılaştırıldığında, uçuş sayılarını dengeleyen modelde bazı uçakların uçuş sayısının arttığı, bazılarının ise azaldığı görülmüştür. Bu modelin, uçuş sayısının daha fazla olduğu problemlerde alternatif uçuş rota sayısına bağlı olarak daha başarılı sonuçlar vereceği kabul edilmiştir.

75 uçuş-11 uçaklı problemin, bütünlük uçak bakım ve rota planlama modeli ile çok amaçlı bütünlük uçak bakım ve rotalama-uçuş sürelerini dengeleyen modelinin sonuçları Şekil 5.9’da karşılaştırılmıştır. Çok amaçlı bütünlük uçak bakım ve rota planlama-uçuş sürelerini dengeleyen modelinde bütünlük modelin en iyi değerinin korunarak çözüm elde edilmesi, bütünlük modelin aslında alternatif çözüme sahip olduğunu göstermiştir. Amaç fonksiyonu değeri değişmeden, bakım kısıtları da karşılanacak şekilde alternatif rota planları oluşturulmuştur.

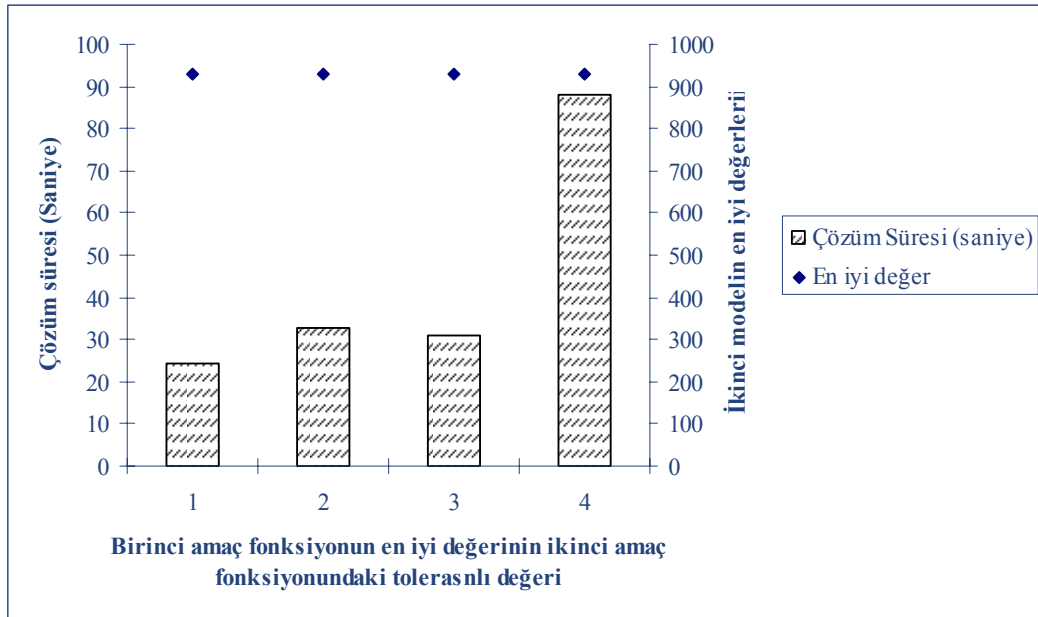


Şekil 5.8. 75 uçuş-11 uçak için bütünleşik uçak bakım ve rota planlaması modeli ile çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlaması –uçuş sayılarını dengeleyen modelin sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 5.9. 75 uçuş-11 uçak için bütünleşik uçak bakım ve rota planlaması modeli ile çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlaması –uçuş sürelerini dengeleyen modelin sonuçlarının karşılaştırılması

75 uçuş-11 uçak için çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlaması-uçuş sürelerini dengeleyen modelde birinci öncelikli modelin toleranslı olarak kullanılmasının çözüm zamanını ve modelin sonucunda elde edilecek çözümü nasıl etkilediğini incelemek için birinci modelin en iyi değeri ikinci modelde sırasıyla %10, %15 ve %20 oranında gevşetilerek çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.10'da gösterilmiştir. Çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlaması-uçuş sürelerini dengeleyen modelin değişen tolerans oranlarına rağmen çözüm sürelerinin birbirine çok yakın olduğu ve elde edilen en iyi değer olan sapma değişkenlerinin toplamın tüm modellerde birbirine eşit olarak çıktığı görülmüştür. Buna karşın, çözüm zamanı 2 saatin üzerinde olan modellerde toleranslı değerlerin kullanılması problemin özelliğine bağlı olarak çözüm zamanını kısalttığı gözlenmiştir. Büyük ölçekteki modellerin belli tolerans değerleri için kısa sürede çözüm vermesi, karar vericinin beklenmedik durumlarda karşılaştığında mevcut problemin üstesinden gelmek için kullanabileceği bir seçenek olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 5.10. 75 uçuş-11 uçak için çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlaması-uçuş sürelerini dengeleyen modelin birinci amaç fonksiyonunun iyileştirilmesi ve çözüm zamanı arasındaki ilişki

75 uçuş-11 uçak için çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlama-uçuş sayılarını ve sürelerini dengeleyen model çalıştırıldığında, model, 1028

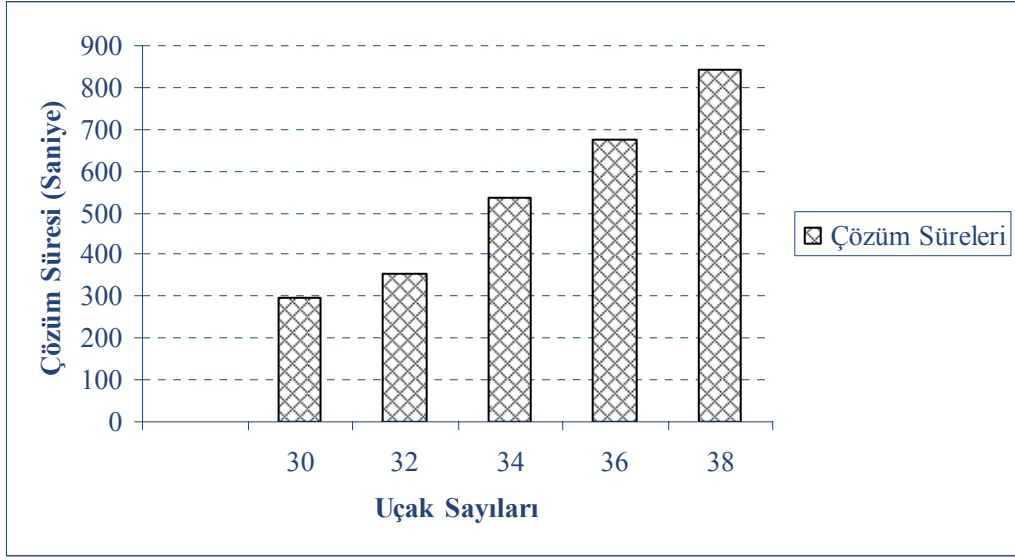
saniye çalıştıktan sonra en iyi çözüm elde edilmiştir. GAMS başlangıç aşaması için 1,725,076 kısıt, 571,321 sütun ve 5,097,927 değişkeni, 3378 kısıt, 39,913 sütun ve 144,750 değişkene indirmiştir. Aynı model, birinci modelin en iyi değeri %30 ve %70 oranında gevşetilerek çözülmüştür. Tolerans kullanılmadan elde edilen en iyi değer ile karşılaştırıldığında hemen hemen aynı çözüm süresinde toleranslı değerlerin %7 civarında kötüleştiği görülmüştür.

5.3. 164 Uçuşlu Problem Seti

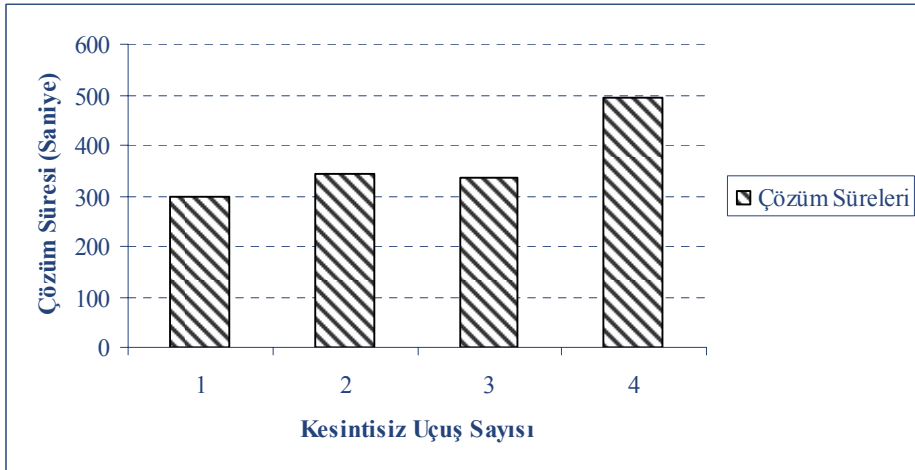
164 uçuşlu problem seti 30'u yapay, 134'ü gerçek uçuştan oluşmaktadır. Bu uçuş tarifesi, Türkiye'de faaliyet gösteren bir havayolu işletmesinin 2007 yaz uçuş tarifesinden yararlanılarak hazırlanmıştır. 134 uçuşun gerçekleştirilmesi için gerekli minimum uçak sayısı 28 olmasına karşın, modeller 30 uçak sayısı için çözülmüştür. Topla-dağıt uçuş serim yapısında, İstanbul ve Ankara merkezi hava alanı olarak kullanılmıştır. Merkezi hava alanı sayısının artması bağlantılı uçuş sayısını arttırdığı için çözüm süresi artmıştır.

164 uçuşlu programın bütünlük uçak bakım ve rota planlaması modeli için farklı uçak sayıları ile çözüm zamanı arasındaki ilişki Şekil 5.11'de gösterilmiştir. Uçak sayısının artması, kısıt sayısını ve çözüm uzayını arttırmış olması en iyi çözümü bulma zamanını arttırdığı görülmüştür.

Kesintisiz uçuş, merkezi bir hava alanı ile iki uçuşun birbiri ile bağlantılı olarak gerçekleştirilmesidir. 164 uçuş tarifeli örnekte bütünlük uçak bakım ve rota planlaması örneğinde kesintisiz uçuş sayısı ile çözüm zamanı arasındaki ilişki Şekil 5.12'de gösterilmiştir. Çözüm zamanı, problemin özelliği, uçakların kullanılabilir yasal uçuş süreleri ve kesintisiz uçuş sayısına bağlı olarak arttığı görülmüştür.



Şekil 5.11. 164 uçuşlu programın bütünleşik uçak bakım ve rota planlaması için uçak sayısını ile çözüm süresi arasındaki ilişki



Şekil 5.12. 164 uçuşlu programda bütünleşik uçak bakım ve rota planlaması için kesintisiz uçuş sayısı ile çözüm süresi arasındaki ilişki.

Çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlama-uçuş sayılarını eşitleyen model zaman kısıtı içerisinde tamsayı sonuç vermemiştir. Birinci amacın en iyi değeri ikinci amacın çözümü için kullanılırken, %30 oranında toleranslı olarak kullanılmıştır. GAMS 1,725,076 kısıtlı, 571,321 sütunlu ve 5,097,927 değişkenli başlangıç modelini, 3378 kısıt, 39,913 sütun ve 144,750 karar değişkenine indirgeyerek 6059 saniyede çözmüştür.

Çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlama-uçuş sürelerini eşitleyen modelden 7200 saniyelik zaman kısıtı içerisinde tamsayı sonuç elde

edilememiştir. Model, sırasıyla %20 ve %30 oranında toleranslı olarak çalıştırıldığında, birbirine yakın çözüm süresi içinde sapma değişkenlerinin toplamı aynı değeri verdiği görülmüştür. Çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlama-uçuş sürelerini eşitleyen model, %20 tolerans oranıyla 1000 saniye süre kısıtı ile çalıştırıldığında, uçuş sayılarını dengeleyen sapma değişkenlerinin toplamının, zaman kısıtı olmaksızın %20 toleranslı en iyi sonuçtan %47.6 oranında kötü olarak elde edilmiştir.

Bu bölümde, havayolu işletmelerinin verilerinden yararlanılarak oluşturulan örnek uçuş tarifeleri farklı amaçlar için çözümlü ve değerlendirmeler yapılmıştır. Bir sonraki bölümde genel bir değerlendirme yapılmış ve öneriler paylaşılmıştır.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Türk Sivil Havacılığı 2002-2006 yılları arasında gelişen ekonomi ve havacılık alanındaki bazı kısıtlamaların kaldırılmasıyla %30 oranında büyümüştür. Bu büyümenin önümüzdeki yıllarda yıllık %5 oranında artarak devam edeceği tahmin edilmiştir. Havayolu sektörü kar marjlarının çok düşük ve rekabetin çok yoğun olduğu bir sektördür. İşletmeler uzun vadede belirledikleri hedeflere ulaşabilmek ve sektörde kalıcı olabilmek için maliyetlerini düşürmeye çalışmaktadır. Havayolu işletmelerinde yakıt, mürettebat, hava alanı kullanma ve uçak satın alma-kiralama gibi maliyetleri doğrudan kontrol edilmesi mümkün değildir. İşletme maliyetleri arasında kontrol edilebilen tek maliyet kalemi olarak bakım maliyetleri kalmaktadır. Büyük havayolu işletmeleri günümüzün en iyileme yaklaşımlarını kullanarak hem bakım maliyetlerinde milyonlarca dolar kar elde etmekte hem de rakip işletmelere karşı ciddi anlamda avantaj sağlamaktadırlar.

Bu tez çalışmasında, havayolu işletmelerinin direkt işletme maliyetleri arasında %18-23 arasında yer tutan bakım maliyetlerini enküçükleyen modeller önerilmiştir. Bu modellerin üç temel özelliği bulunmaktadır.

- Birinci özellik, uçakların bakım öncesi kullanılabilir yasal uçuş saatleri enküçüklenmiş ve uçuş saati başına düşen bakım maliyeti azlatılmıştır.
- İkinci özellik, havayolu işletmelerinin karlılığını arttıran, yolcular tarafından da belli uçuş hatlarında tercih edilen kesintisiz uçuşlar dikkate alınmıştır.
- Son olarak, bakım zamanı hem gün sayısı (üç aylık, yıllık gibi) hem de uçuş saati üzerinden verilen bakım yaklaşımları tek bir modelde günlük olarak çözülmüştür.

Boeing 777'de otuzbini tek parça olmak üzere toplamda altı milyon parça bulunmaktadır. Yüksek teknoloji ve karmaşık sistemlerden oluşan bu tip uçaklardaki bakım maliyetlerinin tanımlanması ve hesaplanması yerine uçakların kullanılabilir yasal uçuş süreleri enküçüklenmiştir. Böylece, uçakların iki bakım

arasındaki uçuş saati başına düşen bakım maliyetlerinin azaltılması sağlanmıştır. Önerilen bütünleşik uçak rota ve bakım planlaması modelleri, karar vericinin tercihine bağlı olarak uçuş sayılarını, uçuş sürelerini veya sırasıyla uçuş sayılarını ve sürelerini veya uçuş sürelerini ve sayılarını dengeleyen amaçları sağlayacak şekilde hazırlanmıştır. Çok amaçlı bütünleşik uçak bakım ve rota planlaması-uçuş sürelerini dengeleyen modelin özellikle uçakların kullanım oranlarının aynı orada tutulmasını sağlayarak, uçak bakım maliyetlerinin birbirine yakın olmasını sağlayacağı düşünülmüştür.

Bu çalışmada uçuş süresi dikkate alınmıştır. Uçakların bakıma gireceği hava alanı ve zamanlaması uçağın uçuş zamanına bağlı olarak tanımlanmış olması, olası rota değişikliklerinin önüne geçilmesini sağlamış ve gün sayısı dikkate alınarak yapılan bakım ve rota planlaması çalışmalarına karşı bir üstünlük sağlamıştır. Bununla birlikte önerilen modellerde, uçuş saati yaklaşımıyla aynı modelde gün tabanlı yaklaşım dikkate alınarak uçakların bakım için uygun rota planları oluşturulmuştur.

Uçakların günlük ortalama uçuş süreleri dikkate alınarak, gün sayısını temel alan bakım planlama yaklaşımlarında ortalamaların altında uçan uçakların erken bakıma girme ihtimali uçakların kullanılabilir yasal uçuş sürelerinin dikkate alınarak yapılmasıyla ortadan kaldırılmıştır. Uçakların kullanılabilir yasal uçuş sürelerinin dikkate alınarak yapılan bütünleşik uçak bakım ve rota planlamasında, bakım maliyetlerinin azalacağı, uçaklardan daha fazla yararlanılacağı, teknik personel ve bakım alanının daha iyi kullanılmasının sağlanarak havayolu işletmesinin rekabet gücünün artacağı kabul edilmiştir.

Günümüzde üretilen yeni nesil uçaklarda bakım planlamasının uçuş saatleri temel alınarak verilmesi, bu çalışma kapsamında önerilen modelleri kullanan işletmelere sektörde üstünlük sağlayacağı düşünülmüştür. Modellerin bir karar destek sistemi içinde tasarlanmış olması, karar vericilerin bilgi birikimlerini ve deneyimlerini de problemlerin çözümüne yansıtmasına olanak vermektedir.

Modeller, GAMS en iyileme programının CPLEX karma tamsayılı doğrusal program çözücü yazılımı kullanılarak değerlendirilmiştir. Modellerden, bütünleşik uçak bakım ve rota planlama modeli tüm örneklerde uygun süre

içerisinde en iyi çözümü vermiştir. Çok amaçlı modellerde problemin çözüm süresinin daha uzun olduğu, birinci öncelikli amaç fonksiyonunun en iyi değerinin toleranslı olarak kullanılmasının çözüm süresini kısalttığı görülmüştür.

Bu çalışmada, büyük ölçekteki problemlerin çözümünde neler yapılacağından çok uygulamaya yönelik özelliklerin nasıl geliştirileceği üzerinde durulmuş ve farklı amaçları sağlayacak şekilde modeller önerilmiştir. Çok amaçlı olarak önerilen modellerin, pratikte uygulama açısından klasik tek amaçlı doğrusal programlama yaklaşımlarına göre başarı şansı karar vericiye birden çok amacı gerçekleştirme fırsatı verdiği için çok daha yüksektir. Bilgisayar ve yazılım sektöründeki gelişmeler, Dantzig-Wolfe ve Benders gibi ayrıştırma yaklaşımlarını kullanmadan belli ölçekteki problemleri çözebilme fırsatı vermektedir. Bundan 15-20 yıl önce 10-20 bin değişkenli problemlere büyük katkı sağlayan yaklaşımlar günümüzde 5 milyon civarında değişkenli problemler için katkı sağlamadığı görülmüştür. GAMS gibi en iyileme çözücülerini, 5 milyon civarında karar değişkenini 150 bin civarına indirerek çözebilmektedir. Buna karşın, 6 milyon üzerinde karar değişkenine sahip büyük ölçekli modellerin çözümü için hala Dantzig-Wolfe, Benders gibi yaklaşımlara ihtiyaç vardır.

Bu çalışmanın devamı niteliğinde aşağıdaki konular ile ilgili yapılacak çalışmaların hızla gelişen havayolu taşımacılığına ve ülke ekonomisine katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Bunlar;

- Dantzig-Wolfe veya Benders ayrıştırma yaklaşımlarının kullanılmasını gerektirecek boyutta bütünleşik uçak ve bakım rota planlaması,
- Heterojen bir uçak filosuna sahip havayolu işletmesinin haftalık ve günlük değişen yolcu taleplerinin dikkate alınarak bakım kısıtlarını sağlayacak şekilde bütünleşik uçak bakım ve rota planlaması,
- Havayolu işletmesinin en büyük maliyet kalemlerinden biri olan mürettebat maliyetlerini en küçükleyecek, uçak rota ve mürettebat planlaması,
- Büyük bakım merkezlerine sahip olmayan ve uçak bakımlarını bakım işletmelerinde yaptıran havayolları için. uçakların tahmini bakım

maliyetlerini dikkate alarak bakım zamanlamasını belirli bir takvim içerisinde olmasını sağlayarak, işletmenin nakit akışına göre uçuş rota planlaması,

ile ilgili çalışmalardır.

Sonuç olarak, bu tez kapsamında işletmelerin günlük uçuş rota planlarının uçakların kullanılabilir yasal limitleri aşılmadan, bakım maliyetlerinde tasarruflar sağlanarak başarılı bir şekilde oluşturulabileceği ve uygulamaya yönelik farklı amaçların çözümünün de bulunabileceği gösterilmiştir. Bu çalışmada geliştirilen modelleri kullanacak işletmelerin sivil havacılık otoritelerinin zorunlu tuttuğu kuralları yerine getirirken, rakip işletmelere karşı avantaj sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abara, J. (1989), *Applying Integer Linear Programming to The Fleet Assignment Problem*, Interfaces, **19**(4), 20-28.
- Agrawal, G.(2005), *The Hyperspace Pareto Frontier For Intuitive Visualization of Multiobjective Optimization Problems*, New York State University, Doktora Tezi, New York, A.B.D.
- Ahuja, R.K., Magnanti, T.L., Orlin, J..B. (1993), *Network Flows*, Prentice Hall, New Jersey, A.B.D.
- Aksen, D. (1998), *Teach Yourself GAMS*, Boğaziçi Üniversitesi Yayınevi, İstanbul, Türkiye.
- Andreas, A.P.(2006), *Mathematical Programming Algorithms for Reliable Routing and Robust Evacuation Problems*, Arizona University, Doktora Tezi, A.B.D.
- Argüello, M.F.(1997), *Framework for Exact Solution and Heuristics for Approximate Solutions to Airlines' Irregular Operations Control Aircraft Routing Problem*, Doktora Tezi, The University of Texas, ABD.
- Argüello, M.F., Bard, J.F., Yu, G. (1998), "Models and Methods for Managing Airline Irregular Operations", *Operations Research in The Airline Industry* (Ed: Yu,G.), Kluwer Academic Publisher, Massachusetts, A.B.D., 1-44.
- Barnhart, C., Belobaba, P., Odoni, A. R.(2003a), *Application of Operations Research in the Air Transport Industry*, Transportation Science, **37**(4), 368-391.

- Babonneau, F. (2006), *Solving The Multicommodity Flow Problem with The Analytic Center Cutting Plane Method*, Université De Genève, Doktora Tezi, Genève.
- Barnhart, C., Boland, N.L., Clarke L.W., Johnson E.L., Nemhauser, G.L. (1998), *Flight String Models for Aircraft Fleeting and Routing*, Transportation Science, **32**(3), 208-220.
- Barnhart, C., Cohn, A.M., Johnson E.L., Klabjan, D., Nemhauser G.L., Vance, P.H. (2003b), “*Airline Crew Scheduling*”, *Handbook of Transportation Science (Ed: Randolph W.Hall)*, Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, A.B.D., 517-561.
- Bazargan, M. (2004), *Airline Operations and Scheduling*, Ashgate Publishing, Hampshire, İngiltere.
- Buğdaycı, H. (2003), *Uçak Bakım Onarım ve Planlaması*, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Ders Notları, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Anadolu Üniversitesi.
- Bussieck, M.R., Meeraus, A., “General Algebraic Modeling System(GAMS)”, *Modeling Languages In Mathematical Optimization*, (Ed: Kallrath, J.), Kluwer Academic Publishers, 8.Bölüm, Massachusetts, A.B.D.,137-159.
- Boeing (2005), *Section 1-System Maintenance Program, 737-600/700/800/900 Maintenance Planning Document*, s.1.0-5. A.B.D.
- Boray, Ş.A., Esnaf, Ş. (2000), *Yöneylem Araştırması*, Literatür Yayıncılık, İstanbul, Türkiye.
- Castillo, E., Conejo, A. J., Pedregal P., Garcíá, R.,Alguacil, N., *Building and Solving Mathematical Programming Models in Engineering and Science*, A Wiley-Interscience Publication, New York, A.B.D.

- Chang S.W. (2001), *An Integrated Approach to Flight Scheduling and Fleet Assignment*, Doktora Tezi, Maryland University, A.B.D.
- Clark, P. (2001), *Buying the Big Jet*, Ashgate Publishing, Hampshire, İngiltere.
- Clarke, L.W., Hane, C.A., Johnson, E.L., Nemhauser, G.L. (1996), *Maintenance And Crew Considerations In Fleet Assignment*, *Transportation Science*, **30**, 249–261.
- Clarke, L.W., Johnson, E.L., Nemhauser, G.L. , Zhu Z. (1997), *The Aircraft Rotation Problem*, *Annals of Operations Research*, **69**, 33-46.
- Cordeau, J.F., Stojković, G., Soumis F., Desrosiers, J (2001), *Benders Decomposition for Simultaneous Aircraft Routing and Crew Scheduling*, *Transportation Science*, **35**, 375–388.
- Cordeau, J.F., Desaulniers, G., Desrosiers, J., Solomon, M.M., Soumis, F. (2002), “VRP with Time Window”, *The Vehicle Routing Problem*, (Ed: Toth, P. ve Vigo D.), SIAM, 7.Bölüm, Philadelphia, A.B.D.
- Dantzig, G.B. (1963), *Linear Programming and Extensions*, Princeton University Press, New Jersey, A.B.D.
- Daskin, M.S. and Panayotopoulos N.C. (1989), *A lagrangian Relaxation Approach to Assigning Aircraft to routes in Hub and Spoke Networks*, *Transportation Science*, **23**(2), 91-99.
- Desaulniers, G., Desrosiers, J., Dumas, Y. (1997), *Daily Aircraft Routing and Scheduling*, *Management Science*, **43**, 841-855.
- Dursun, A.N., (2007) (Ed.), *Türk Hava Yolları İç Hat Uçuş Şebekesi*, *Skylife*, **8**, 176.

- Eskandari, H., (2006), *Multiobjective Simulation Optimization Using Enhanced Evolutionary Algorithm Approach*, Doktora Tezi, University of Central Florida, Orlando, Florida, A.B.D.
- Erwin, K. (2002), *Solving Multiobjective Models With GAMS*, GAMS Dökümanı, A.B.D.
- Feo, T.A., Bard J. F. (1989), *Flight Scheduling and Maintenance Base Planning*, Management Science, **35**, 1415-1432.
- Gerede, E. (1998), *Bakım Maliyetlerinin İncelenmesi ve Direkt Bakım Maliyetlerinin Azaltılması İçin Öneriler Geliştirilmesi- Türkiye Uygulaması*, Yüksek Lisans Tezi, 1998, Sivil Havacılık Anabilim Dalı, Eskişehir.
- Gerede, E. (2005), *SHU-416 Hava Aracı Bakım Yönetimi Yayınlanmamış Ders Notları*, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Anadolu Üniversitesi.
- Gopalan, R. ve K. Talluri (1998), *The Aircraft Maintenance Routing Problem*, Operations Research, **46**, 260–271.
- Grandeau, S.(1995), *The Process of Airline Operation Control*, Flight Transportation Laboratory Report R87-11, MIT, Cambridge, MA.
- Grönkvist, M. (2005), *The Tail Assignment Problem*, Doktora Tezi, Göteborg University, Göteborg, İsveç.
- Hane, C.A., Barnhart, C., Johnson E.L., Marsten R.E., Nemhauser G.L., Sigismundi G. (1995) *The Fleet Assignment Problem: Solving A Large Scale Integer Program*, Mathematical Programming, **70**, 211-232.
- Huang, Y. (2005), *A Decomposition and Selection Method For Solving VRPSTW and DEA Applications*, Doctora Tezi, Washington University, A.B.D.
- http-1: <http://www.radikal.com.tr/haber.php?haberno=215701&tarih=16/03/2007>

http-2: <http://www.shgm.gov.tr/haberhtm/basin.htm>
http-3: <http://www.hurriyet.com.tr/ekonomi/6780062.asp?m=1>
http-4: <http://www.transport.com.tr/ana101,38@2200.html>
http-5: <http://www.ftnnews.com/trtrans611.htm>
http-6: <http://www.cnn.com/2005/BUSINESS/01/18/airbus.380/>
http-7: <http://www.thy.com>

Lee, C.K. (1999), *A Computerized Analytical Decision Support system For Evaluating Airline Scheduling Interactions*, Doktora Tezi, The Ohio State University, A.B.D.

Kabbani, N.M. ve Patty B.W. (1992), *Aircraft Routing at American Airlines*, Proceeding of the 32nd Annual Symposium of AGIFORDS, Budapest, Hungary.

Kinnison, H. A. (2004), *Aviation Maintenance Management*, McGraw-Hill, New-York, A.B.D.

Klabjan, D.(2005), "Large-Scale Models In The Airline Industry", *Column Generation* (Ed: G.Desaulniers, J. Desrosiers ve M. M.Solomon) Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, A.B.D.

Kohl, N., Karisch, S.E.(2004), *Airline Crew Rostering: Problems Types, Modeling, and Optimization*, Annals of Operations Research, **127**, 223-257.

Kumar, U. J., Crocker J., Knezevic J., El-Haram M. (2000), *Reliability, Maintenance and Logistic Support, A Life Cycle Approach*, Kluwer Academic Publisher, A.B.D.

Lai, M.C. (2004), *A Hybrid Genetic/Benders' Algorithm With Applications To Vehicle Routing and Scheduling Problems*, Doktora Tezi, Iowa University, A.B.D.

- Lettovsky, L. (1997), *Airline Operations Recovery: An Optimization Approach*, Doktora Tezi, Georgia Institute of Technology, A.B.D.
- Liu, J. (2003), *Solving Real-Life Transportation Scheduling Problems*, Doktora Tezi, University of Florida, A.B.D.
- Lui, K. (2005), *A Study On The Split Delivery Vehicle Routing Problem*, Mississippi Devlet Üniversitesi, Doktora Tezi, Mississippi, A.B.D.
- Lübbecke, M. E. ve Desrosiers J.(2005), *Selected Topics in Column Generation*, Operations Research, **53**(6), 1007-1023.
- McCarl, B. (2007), *McCarl GAMS User Guide*, Version 22.4., GAMS Development Corporation, A.B.D.
- Moudai, E.L., Camino, F.M. (2000), *A dynamic approach for aircraft assignment and maintenance scheduling by airlines*, Journal of Air Transport Management, **6**, 233-237.
- Qi, X., Yang, J. Yu, G. (2004), "Scheduling Problems In The Airline Industry", *Handbook of Scheduling: Algorithms, Models and Performance Analysis*, (Ed: Joseph, Y. ve Leung, T), Chapman&Hall/CRC, 50. Bölüm, New York, A.B.D.
- Önneflod, M. (2004), *Advantages of Utilizing New Global Optimality Conditions When Constructing Column Generation Algorithms For Integer Programming Problems*, Yüksek Lisans Tezi, Matematik Bölümü, Chalmers Teknoloji Üniversitesi, Göteborg, İsveç.
- Öztürk, A. (2005), *Yöneylem Araştırması*, Ekin Kitabevi, İstanbul, Türkiye.
- Radnoti, G. (2002), *Profit Strategies for Air Transportation*, McGraw-Hill, New York, A.B.D.

- Rosenberger, J.M. (2001), *Topics in Airline Operations*, Doktora Tezi, Georgia Institute of Technology, A.B.D.
- Sahinidis, N.V. (1990), *Mixed Integer Optimization Techniques For Planning And Scheduling Of Chemical Proesses*, Doktora Tezi, Carnigei Mellon Universtiy, A.B.D.
- Sarac, A. (2000), *Daily Operational Aircraft Maintenance Routing Problem*, Doktora Tezi, New York University, A.B.D.
- Sarac, A., Batta, R., Rump, C.M. (2006), *A Branch-and-Price Approach For Operational Aircraft Maintenance Routing*, *Eurepan Journal of Operational Research*, 175, 1850-1869.
- Sriram, C. ve Haghani, A. (2003), *An Optimization Model For Aircraft Maintenance Scheduling And Re-Assignment*, *Transportation Science*, 37, 29-48.
- Shaw, T.L. (2003), *Hybrid Column Generation for Large Network Routing Problems: with Implementations in Airline Crew Scheduling*, Doktora Tezi, Georgia Institute of Technology, A.B.D.
- Sherali H.D., Bish E.K., Zhu X. (2006), *Airline Fleet Assignment Concepts, Models, And Algorithms*, *European Journal Of Operational Research*, 172, 1-30.
- Smith, B.C. (2004), *Robust Airline Fleet Assignment*, Doktora Tezi, Georgia Institute of Technology, A.B.D.
- Subramanian, R., Scheff, R.P., Quillinan, J.D., Wiper, D.S., Marten, R.E., (1994), *Coldstart: Fleet Assignment at Delta Airlines*, *Interfaces*, 24(1),104-120.
- Talluri, K.T. (1998), *The Four-day Aircraft Maintenance Routing Problem*, *Transportation Science*, 32, 43-53.

- Tagmouti, M., Gendreau, M. Potvin J.Y. (2007), Arc Routing Problems with Time-Dependent Service Costs, *European Journal of Operational Research*, **181**, 30-39.
- Weidner, T. (1996), *Hubbing in U.S. Air Transportation System: Economic Approach*, *Transportation Research Records* 1562, 28-37.
- Yu, G. ve Thengvall (2002), G., “Airline Optimization”, *Handbook of Applied Optimization*, (Ed: Resende P.) Oxford University Press, 2002, New York, Amerika, 689-704.
- Yu, G., Arguello, M., Song, M., McCowan, S, White,A. (2003), *A New Era for Crew Recovery at Continental Airlines*, *Interface*, **33**, 1-22.

EK_1: GAMS En İyileme Programı

Günümüzde cebirsel modelleme dilleri, matematiksel programlama problemlerini çözmek ve ifade etmek için en iyi yol olarak görülmüştür. Modelleme dillerini birbirinden ayıran temel özellik, çok boyutlu ve büyük yapılarda cebirsel bağıntıların kullanımı ve kısmi türevlerin bulunmasındaki farklılıklardır. GAMS'in (Genel Cebirsel Modelleme Sistemi: General Algebraic Modeling Systems) başlangıç araştırma geliştirme çalışmaları, Dünya Bankası tarafından desteklenmiştir. 1987 yılından beri araştırma geliştirme çalışmaları GAMS Geliştirme Şirketi (GAMS Development Corporation) tarafından desteklenmektedir. GAMS, ekonomi, bilgisayar bilimi ve yöneylem araştırması arasındaki yakın işbirliğinin sonucunda geliştirilmiştir (Bussieck ve Meeraus 2004). GAMS programlama dilinin genel özellikleri aşağıdaki gibidir (Castillo ve ark. 2002):

- GAMS komutunun kullanılabilmesi için çözülmekte olan problemin tam tanımını veren bir girdi dosyasının hazırlanması gerekir.
- GAMS için büyük ve küçük harf yoktur.
- Her komut noktalı virgül ile son bulmalıdır. Eğer kullanıcı noktalı virgülü unutursa, GAMS problemler ile karşılaşır.
- Komutlar herhangi bir düzende, herhangi bir elemanın kısıtı kullanılmadan önce tanımlanması şartıyla kullanılabilir.
- GAMS herhangi bir programlama dili gibi dikkatli olarak kullanılması gereken özel tanımlanmış kelimelere sahiptir. GAMS metnin bulunduğu satırı okurken, bu kelimeleri arar ve sonuç olarak buna göre davranır.
- Bazı komutlar, kelimenin sonu "s" ile bitsin bitmesin, kelimenin ilk harfi ile tanımlanmıştır. Bu seçenek, normal İngilizce komutları gibi, GAMS tarafından kodun anlaşılabilirliğini kolaylaştırmak için seçilmiştir.
- Komutlar herhangi bir stilde yazılabilir. Örneğin, her satırda birden fazla komut ve her komut için çoklu satır kullanılması mümkündür.

GAMS derleyicisi (complier) için boşluk sayısının tek veya daha fazla olması aynı anlama gelir.

- Tek bir komut, aynı özellikteki birçok elemanı veya birini tanımlamak ve tarif etmek için geçerlidir. Komutun ismini tekrar etmeye gerek yoktur.
- Birinci sütunda * ile başlayan herhangi bir satır GAMS derleyicisi tarafından ihmal edilir ve açıklama satırı olarak kabul edilir. Diğer açıklamalar; set, scalar, parameter, table, equation ve model gibi komutların içine yerleştirilebilir. Açıklamalar, açıklanan elemanların daha kolay anlaşılmasını sağlar.
- GAMS elemanı için geçerli isim, bir harfle başlar ve maksimum 9 karakterli harf veya rakamdan oluşur.

GAMS’de kullanılan komutlar kısaca aşağıda açıklanmıştır (Castillo ve ark. 2002).

Sets Komutu

Sets, GAMS modelinin temel yapı bloğudur ve modelin cebirsel ifadesinde tam olarak indislere karşılık gelir. GAMS’de kullanılan “Set” veya “Sets” kelimeleri, indisleri açıklamak ve bunların olası değer kümesini tanımlamak için kullanılır. Bir kümenin elemanlarını listelerken, GAMS’in formatı ve alışılmış matematiksel format arasındaki farklılıklara dikkat edilmelidir. GAMS’de, kümeyi tanımlamak için ‘{..}’süslü parantez yerine taksim işareti ‘/..’ kullanılır.

Alias komutu, belirli bir kümenin alternatif bir isimle adlandırılmasını sağlar. Alias kümesi, aynı kümenin elemanları arasında bir ilişkinin olduğu modellerde kullanıldığında yararlıdır. Bilinen kümenin boyutunun, bir olması gerekir (Aksen 1988).

Küme ifadesi içerisindeki küçük harfli kelimeler, metin olarak adlandırılır. Kümenin ne anlam geldiği veya neyi temsil ettiğini belirten açıklama

kullanıcının tercihinine bağlıdır. GAMS derleyicisi, açıklayıcı metni yorumlamak için bir çaba göstermez.

Bir kümeyle elemanları atanırken kullanılan en önemli özelliklerden biri asteriktir(*). Asteriks, bir kümenin elemanlarının ardışık olarak bir birini izlediği durumlarda kullanılır.

Scalars Komutu

Yalnızca büyüklüğü olan değerler, Scalar veya Scalars kelimeleri kullanılarak açıklanır ve bir değer atanır. İsimden sonra açıklama yapılabilir.

Parameters ve Tables Komutları

Parameters ve Tables, iki veya daha fazla boyutlu veri dizisini tanımlamak için kullanılır. GAMS de tanımlanan veri matrisleri, ya table ya da iki boyutlu parameters kullanılarak tanımlanır. Table iki veya daha fazla indis kullanılarak tanımlanır. Table ifadesi en az bir veri elemanı içermesi gerekir. Eğer veri, atama veya bir birini takip eden ifadelerin hesaplanmasıyla yer değiştirerek tanımlanmışsa, verilerin parameter ifadesi ile tanımlanması daha uygundur (McCarl 2007). Parameters komutu ile ilgili genel özellikler aşağıdaki gibidir.

- İndekslerin olası seçenekli listesi ve bunlara karşılık gelen parametre değerleri, “/.../” içine konulmalıdır. Aynı satırda olacaksa virgül ile birbirinden ayrılmalı veya (virgülsüz) yeni bir satıra taşınmalıdır.
- İndeks değer çifti herhangi bir düzende verilebilir.
- Parametreler için rassal değer sıfırdır. Bu yüzden, sıfırdan farklı değerler verilmelidir.
- GAMS otomatik olarak, verilen indeks değerini uygun indeks için geçerli küme değeri olup olmadığını kontrol eder.

Varibales Komutu

Variable veya Variables kelimeleri, en iyi değeri bulunacak değişkenleri tanımlamak için kullanılır. Bir değişken tanımlandığında referans edilen değişkenin boyutu belirtilmelidir. Amaç fonksiyonunun değerini temsil eden değişkenin, her zaman herhangi bir GAMS programında tanımlanması gerekir. Değişken isminden sonra, yorum yapılabilir. Komut noktalı virgöl ile son bulur. Değişkenlerin karakteristik özellikleri pozitif veya negatif gibi tanımlanabilir.

Equations Komutu

Equation ifadesi, GAMS programında geniş bir anlamda kullanılır. Eşitliklere ilave olarak aynı zamanda herhangi bir kısıtın tanımlanmasını mümkün kılar.

Kısıtlar açıklandığı zaman, kısıtları tanımlamak için .. sembolü kullanılır. Bu sembol kısıtları, isimleriyle birleştirir. Standart matematiksel işaret, birçok farklı kısıtları modellemek için kullanılabilir. Her eşitliğin tanımlanmasından sonra noktalı virgöl ilave edilir.

GAMS programında ifade edilen toplam $\sum_i x(i,j)$, $\sum_i x_{ij}$ anlamında kullanılmaktadır. Benzer şekilde GAMS’de çarpım işlemi, $\prod_i x(i,j)$, $\prod_i x_{ij}$ ’yi temsil etmektedir. Eşitlik sembolleri;

- =e= “eşittir”,
- =l= “daha küçük veya eşittir”,
- =g= “daha büyüktür veya eşittir” anlamında kullanılır.

Model Komutu

Model komutu, çözülen modeldeki eşitlikleri tanımlamak amacıyla kullanılır. Model komutu, problemin önceden tanımlanmış bütün eşitlikleri kapsadığı düşünülür. Birden fazla model ismi kullanılacaksa, her biri için amaç fonksiyonları ve kısıt isimleri /.../ içerisinde belirtilebilir.

Solve Komutu

Solve komutu modeli çözmek için kullanılır. Solve komutu, tanımlanan çözücüü kullanarak, z değişkeninin enküçüklenmesini ya da en büyüklenmesini sağlar. GAMS’de kullanılan çözücüler (Aksen 1988);

- LP : Doğrusal Programlama (Linear Programming)
- MIP : Karma Tamsayı Programlama (Mixed Integer Programming)
- RMIP : Gevşetilmiş Karma Tamsayı Programlama (Relaxed Mixed Integer Programming)
- NLP : Doğrusal Olmayan Programlama (Nonlinear Programming)
- MCP : Karma Tamamlayıcı Problem (Mixed Complementary Problem)
- CNC : Kısıtlandırılmış Doğrusal Olmayan Sistem (Constrained Nonlinear System)
- DNLP : Sürekli Olmayan Türevli Doğrusal Olmayan Programlama (Nonlinear programming with discontinuous derivatives).
- MIDNLP: Karma Tamsayılı Sürekli Olmayan Türevli Doğrusal Olmayan Programlama (Mixed integer nonlinear programming with discontinuous derivatives).
- MIDNLP : Gevşetilmiş Karma Tamsayılı Sürekli ve Türevli Doğrusal Olmayan Programlama (Relaxed mixed integer nonlinear programming with discontinuous derivatives).

Ek-2’de 22 gerçek 4 yapay, 4 uçaktan oluşan örnek için bütünleşik uçak bakım ve rota planlama modelinin GAMS’deki kodlaması verilmiştir.

Ek-2 GAMS'de örnek uygulama

Şontext

Bütünleşik Uçak Bakım ve Rota Planlama, 26 Uçuş

İlkay ORHAN, Eylül 2007

Şofftext

Ştitle İlkay ORHAN, Eylül 2007 & Bütünleşik Uçak Bakım ve Rota Planlama

sets

```
i      'uçuş numaraları'      /F101*F122,O,T/
ada(i) 'Adanadan başlayan uçular' /F101/
ANK(i) 'Ankaradan başlayan uçuşlar' /F102,F103/
ist(i) 'Istanbuldan baslayan uçuşlar' /F107*F117/
istson(i)      'istanbulda sonlanan uçuşlar' /F101*F106,F118*F122/
f(i)      'yapay ilk uçuş numarası-orjin' /O/
l(i)      'yapay son uçuş numarası-termination' /T/
n(i)      'normal uçuş numaraları'      /F101*F122/
c      'hava alanlarının isimleri'      /ADA, ANK, AYT,
DNZ, IST, IZM, KON, TRB, KAYNAK, HAVUZ/
mc(c)     'bakım yapılabilen şehirler' /ANK, IST/
mt      'bakım tipleri' /A, 3aylik/
k      'uçak numaraları'      /k1*K4/
adaa(k)   'Adanada geceleleyen uçaklar' /k1/
anka(k)   'Ankarada geceleleyen uçaklar' /k2/
istl(k)   'Istanbulda konaklayan uçaklar' /k3,K4/
km_A(k)   '"A" bakımına girecek uçak kümesi_UÇUŞ-SAATI ÜZERİNDEN'
km_W(k)   '"3aylık" bakımına girecek uçak kümesi_TAKVİM-ZAMANI ÜZERİNDEN' /k1/;
```

Alias (i,j);

** Uçakların kalan yasal uçuş saatleri veri olarak girildi.*

```
Parameter r(k) 'uçakların "remain" kalan yasal uçuş süreleri/dakika'
/k1      850
k2      400
k3      450
k4      750 / ;
```

```

km_A(k) = Yes$(r(k) le 450);

*-----
*Uçuş numaralarının bilgileri "doğrudan atama" şeklinde tanımlandı.
*-----

Parameter Cd(i,c) '"f101" uçuş numarasının "ayrılış" şehri';
Cd("f101",c) = 1$(ord(c) eq 1);

Parameter Cd(i,c) '"f102" uçuş numarasının "ayrılış" şehri';
Cd("f102",c) = 1$(ord(c) eq 2);

Parameter Cd(i,c) '"f103" uçuş numarasının "ayrılış" şehri';
Cd("f103",c) = 1$(ord(c) eq 2);

Parameter Cd(i,c) '"f104" uçuş numarasının "ayrılış" şehri';
Cd("f104",c) = 1$(ord(c) eq 3);

Parameter Cd(i,c) '"f105" uçuş numarasının "ayrılış" şehri';
Cd("f105",c) = 1$(ord(c) eq 3);

Parameter Cd(i,c) '"f106" uçuş numarasının "ayrılış" şehri';
Cd("f106",c) = 1$(ord(c) eq 4);

Parameter Cd(i,c) '"f107" uçuş numarasının "ayrılış" şehri';
Cd("f107",c) = 1$(ord(c) eq 5);

Parameter Cd(i,c) '"f108" uçuş numarasının "ayrılış" şehri';
Cd("f108",c) = 1$(ord(c) eq 5);

Parameter Cd(i,c) '"f109" uçuş numarasının "ayrılış" şehri';
Cd("f109",c) = 1$(ord(c) eq 5);

Parameter Cd(i,c) '"f110" uçuş numarasının "ayrılış" şehri';
Cd("f110",c) = 1$(ord(c) eq 5);

Parameter Cd(i,c) '"f111" uçuş numarasının "ayrılış" şehri';
Cd("f111",c) = 1$(ord(c) eq 5);

Parameter Cd(i,c) '"f112" uçuş numarasının "ayrılış" şehri';
Cd("f112",c) = 1$(ord(c) eq 5);

Parameter Cd(i,c) '"f113" uçuş numarasının "ayrılış" şehri';
Cd("f113",c) = 1$(ord(c) eq 5);

Parameter Cd(i,c) '"f114" uçuş numarasının "ayrılış" şehri';
Cd("f114",c) = 1$(ord(c) eq 5);

Parameter Cd(i,c) '"f115" uçuş numarasının "ayrılış" şehri';
Cd("f115",c) = 1$(ord(c) eq 5);

Parameter Cd(i,c) '"f116" uçuş numarasının "ayrılış" şehri';
Cd("f116",c) = 1$(ord(c) eq 5);

Parameter Cd(i,c) '"f117" uçuş numarasının "ayrılış" şehri';
Cd("f117",c) = 1$(ord(c) eq 5);

Parameter Cd(i,c) '"f118" uçuş numarasının "ayrılış" şehri';
Cd("f118",c) = 1$(ord(c) eq 6);

```

```

Parameter Cd(i,c) '"f119" uçuş numarasının "ayrılış" şehri';
Cd("f119",c) = 1$(ord(c) eq 6);

Parameter Cd(i,c) '"f120" uçuş numarasının "ayrılış" şehri';
Cd("f120",c) = 1$(ord(c) eq 7);

Parameter Cd(i,c) '"f121" uçuş numarasının "ayrılış" şehri';
Cd("f121",c) = 1$(ord(c) eq 8);

Parameter Cd(i,c) '"f122" uçuş numarasının "ayrılış" şehri';
Cd("f122",c) = 1$(ord(c) eq 8);

Parameter Ca(i,c) '"F101" uçuş numarasının uçuş "varış" şehri';
Ca("f101",c) = 1$(ord(c) eq 5);

Parameter Ca(i,c) '"F102" uçuş numarasının uçuş "varış" şehri';
Ca("f102",c) = 1$(ord(c) eq 5);

Parameter Ca(i,c) '"F103" uçuş numarasının uçuş "varış" şehri';
Ca("f103",c) = 1$(ord(c) eq 5);

Parameter Ca(i,c) '"F104" uçuş numarasının uçuş "varış" şehri';
Ca("f104",c) = 1$(ord(c) eq 5);

Parameter Ca(i,c) '"F105" uçuş numarasının uçuş "varış" şehri';
Ca("f105",c) = 1$(ord(c) eq 5);

Parameter Ca(i,c) '"F106" uçuş numarasının uçuş "varış" şehri';
Ca("f106",c) = 1$(ord(c) eq 5);

Parameter Ca(i,c) '"F107" uçuş numarasının uçuş "varış" şehri';
Ca("f107",c) = 1$(ord(c) eq 2);

Parameter Ca(i,c) '"F108" uçuş numarasının uçuş "varış" şehri';
Ca("f108",c) = 1$(ord(c) eq 2);

Parameter Ca(i,c) '"F109" uçuş numarasının uçuş "varış" şehri';
Ca("f109",c) = 1$(ord(c) eq 4);

Parameter Ca(i,c) '"F110" uçuş numarasının uçuş "varış" şehri';
Ca("f110",c) = 1$(ord(c) eq 7);

Parameter Ca(i,c) '"F111" uçuş numarasının uçuş "varış" şehri';
Ca("f111",c) = 1$(ord(c) eq 6);

Parameter Ca(i,c) '"F112" uçuş numarasının uçuş "varış" şehri';
Ca("f112",c) = 1$(ord(c) eq 6);

Parameter Ca(i,c) '"F113" uçuş numarasının uçuş "varış" şehri';
Ca("f113",c) = 1$(ord(c) eq 3);

Parameter Ca(i,c) '"F114" uçuş numarasının uçuş "varış" şehri';
Ca("f114",c) = 1$(ord(c) eq 3);

```

```
Parameter Ca(i,c) '"F115" uçuş numarasının uçuş "varış" şehri';
Ca("f115",c) = 1$(ord(c) eq 1);
```

```
Parameter Ca(i,c) '"F116" uçuş numarasının uçuş "varış" şehri';
Ca("f116",c) = 1$(ord(c) eq 8);
```

```
Parameter Ca(i,c) '"F117" uçuş numarasının uçuş "varış" şehri';
Ca("f117",c) = 1$(ord(c) eq 8);
```

```
Parameter Ca(i,c) '"F118" uçuş numarasının uçuş "varış" şehri';
Ca("f118",c) = 1$(ord(c) eq 5);
```

```
Parameter Ca(i,c) '"F119" uçuş numarasının uçuş "varış" şehri';
Ca("f119",c) = 1$(ord(c) eq 5);
```

```
Parameter Ca(i,c) '"F120" uçuş numarasının uçuş "varış" şehri';
Ca("f120",c) = 1$(ord(c) eq 5);
```

```
Parameter Ca(i,c) '"F121" uçuş numarasının uçuş "varış" şehri';
Ca("f121",c) = 1$(ord(c) eq 5);
```

```
Parameter Ca(i,c) '"F122" uçuş numarasının uçuş "varış" şehri';
Ca("f122",c) = 1$(ord(c) eq 5);
```

```
*-----
* Uçuş verileri ile ilgili tablo oluşturuldu.
*-----
```

```
Table FlightData(i,*) 'uçuş verileri "dakika" '
```

	Depat	Arvat	Ftime	MTurnTime
F101	325	420	95	40
F102	420	480	60	40
F103	1140	1200	60	40
F104	630	705	75	40
F105	810	885	75	40
F106	1205	1275	70	40
F107	1020	1080	60	40
F108	1320	1380	60	40
F109	1090	1160	70	40
F110	1225	1295	70	40
F111	480	540	60	40
F112	780	840	60	40
F113	505	580	75	40
F114	685	760	75	40
F115	1415	1510	95	40
F116	420	525	105	40
F117	1045	1150	105	40
F118	600	660	60	40
F119	900	960	60	40
F120	1340	1410	70	40
F121	600	705	105	40
F122	1205	1315	110	40
O	210			
T	1650			
;				

```

Parameter Td(I) 'uçuş numarası "i" için ayrılış zamanları "dakika";
Td(I) = FlightData(I,'Depat');

Parameter T(i,j) '"ij" uçuş numaraları arasndaki uçuş süreleri"dakika";
T(I,j) = FlightData(I,'Ftime');

Parameter Ts(i) 'i uçuşunun sonunda uçağın bir sonraki uçuş için hazırlanma süres
Ts(i) = FlightData(I,'MTurnTime')

Parameter Tdo(i,k) 'uçuş numarası"o" için ayrılış zamanı "dakika";
Tdo(i,k)=FlightData('o','Depat');

Parameter T(j,i) 'uçuş numarası "o" için uçuş süresi "dakika";
T('o',i) = FlightData('o','Ftime');

Parameter Tdt(i,k) 'uçuş numarası "d" için ayrılış zamanı "dakika";
Tdt(i,k)=FlightData('t','depat');

Parameter Cd(i,c) '"o" uçuş numarasının uçuşa "başlangıç(orjin)" şehri';
Cd('o',c) = 1$(ord(c) eq 9);

Parameter Ca(i,c) '"o" uçuş numarasının uçuş "varış(destination)" şehirleri';
Ca("o",c) = 1$(ord(c) ne 9);

Parameter Cd(i,c) '"d" uçuş numarasının uçuşa "başlangıç(orjin)" şehirleri';
Cd('t',c) = 1$(ord(c) ne 10);

Parameter Ca(i,c) '"i" uçuş numarasının uçuş "varış(destination)" şehri';
Ca("t",c) = 1$(ord(c) eq 10);

Parameter A(mt,k) 'Eğer k uçağı A tipi bakıma ihtiyacı varsa =1';
A('A',k) = 1$(r(k) le 450);

Parameter Cmt(mt,c) '"m" tipi bakım verebilen şehirler = 1';
Cmt('A',c) = 1$MC(c);

Scalar M 'Yeterince büyük bir sayı' ;
M = 2000;

Binary variables
X(I,J,K) 'i ve j uçuş bacakları ardışık olarak k uçağı tarafından uçulursa=1';

Variables
z 'kullanılabilir kalan yasal uçuş saatinin maliyeti'
;

Equations
maliyet 'Kullanılabilir uçuş zamanı en küçükleyen amaç fonksiyonu'

Ucus_Kapsam(i) 'Her uçuşa bir uçak atanmasını sağlar.'
Ucak_Kapsam_1(k) 'Her uçağın, bir başlangıç uçuş bacağına atanmasını sağlar.
Ucak_Kapsam_2(k) 'Her uçağın sonlanan bir uçuş'
* 'bacağına atanmasını garantiler.
Akis_Koruma_1(i,k) '"i" düğüme gelen akışın "i" düğümünden çıkan akışa '
* 'eşit olmasını sağlayan akış koruma kısıtıdır.
Akis_Koruma_2(k) 'Yapay kaynak ve yapay havuz için akış koruma kısıtıdır.'
Kalan_Ucus_Saati(k) 'Uçakların "remain" kalan yasal uçuş saatleri'
Zaman_uyumu_1(i,j,k) 'Uçuşlar arasındaki zaman uyumunu sağlayan kısıttır.'
Zaman_uyumu_2(i,j,k) 'Yapay kaynaktan başlayacak uçuşlar için'
* 'zaman uyumu sağlayan kısıttır.'
Zaman_uyumu_3(i,j,k) 'Yapay havuza gerçekleştirilecek uçuşlar'
* 'için zaman uyumunu sağlayan kısıttır.'

```

```

Hava_alani_uyumu_1(i,j) 'Uçuş numaralarının hava alanlarına göre uyumunu sağlar.'
Hava_alani_uyumu_2(i,j,k) '(Kaynak)Uçuşların hava alanlarına göre uyumunu sağlar.'
Hava_alani_uyumu_3(k) '(Havuz)Uçuşların hava alanlarına göre uyumunu sağlar.'
Kesintisiz_Ucus_1 'F101 ve F111 uçuşları aynı uçak tarafından gerçekleştirilsin'
Kesintisiz_Ucus_2 'F119 ve F107 uçuşları aynı uçak tarafından gerçekleştirilsin'
Gun_sayisi_uzrden_bakim(k) 'günlük istanbulda bakıma girmesi gereken uçaklar'
adaa_basl_ucak(i,k) 'Adanada geceleyen uçak kümesi kısıtı'
adaa_basl_ucak(i,k) 'Adanada geceleyen uçak kümesi kısıtı'
Anka_basl_ucak(i,k) 'Ankarada geceleyen uçak kümesi kısıtı'
istl_basl_ucak(i,k) 'Istanbulda geceleyen uçak kümesi kısıtı' ;
maliyet.. z =e= sum(k, r(k))- sum((i,j,k), (1/r(k))*T(I,j)*x(I,j,k));
Ucus_Kapsam(i)$n(i).. sum((j,k),x(i,j,k)) =e= 1;
Ucak_Kapsam_1(k).. sum((i,j),x(i,j,k)$f(i)) =e= 1;
Ucak_Kapsam_2(k).. sum((i,j), x(i,j,k)$l(j)) =e= 1;
Akis_Koruma_1(i,k)$n(i).. sum(j,x(I,j,k))- sum(J,x(J,I,k))=e= 0;
Akis_Koruma_2(k).. sum((i,j),x('o',j,k)) - sum((i,j), x(i,'t',k)) =e= 0;
Kalan_Ucus_Saati(k).. sum((i,j), (T(I,j)*x(I,j,k))) =l= r(k);
Zaman_uyumu_1(i,j,k)$n(i)$n(j).. Td(I)+ T(I,j)+ Ts(i) - Td(J) =l= M*(1- x(i,j,k)) ;
Zaman_uyumu_2(i,j,k).. Tdo('o',k) + T('o',i) - Td(I) =l= M*(1-x('o',j,k));
Zaman_uyumu_3(i,j,k).. Td(I) + T(I,'t')+ Ts(i) - Tdt('t',k) =l= M*(1-x(i,'t',k));
Hava_alani_uyumu_1(i,j).. sum(k,x(i,j,k)) =l= sum(c, (Cd(j,c)*Ca(i,c)));
Hava_alani_uyumu_2(i,j,k).. x(i,j,k)$ord(i) eq 23) =l= sum((c), (Cd(j,c)
*Ca(i,c)));
Hava_alani_uyumu_3(k)$km_A(k).. sum((i,j,mt,c),x(i,j,k)$((ord(j)
eq 24)$ord(i) ne 23)) *Ca(i,c)*Cmt(mt,c)*A(mt,k))=e= 1;
Kesintisiz_Ucus_1.. sum((i,j,k)$((ord(i) eq 1)$ord(j) eq 11)),x(i,j,k)=e= 1 ;
Kesintisiz_Ucus_2.. sum((i,j,k)$((ord(i) eq 19)$ord(j) eq 7)),x(i,j,k)=e= 1;
Gun_sayisi_uzrden_bakim(k)$km_W(k)..
sum((i,j)$istson(i),x(i,j,k)$ord(j) eq 24))=e=1;
adaa_basl_ucak(i,k)$f(i)$adaa(k).. sum((j)$ada(j), x(i,j,k)) =e= 1;
anka_basl_ucak(i,k)$f(i)$anka(k).. sum((j)$ank(j), x(i,j,k)) =e= 1;
istl_basl_ucak(i,k)$f(i)$istl(k).. sum((j)$ist(j), x(i,j,k)) =e= 1;

```



```
MODEL rotal /all/;

option limrow =0;
option limcol =0;

Solve rotal using mip minimizing z;

display z.l;
display x.l;
display km_A;
display km_w;
display Kalan_Ucus_Saati.l;
display Kalan_Ucus_Saati.up;
```

Model çalıştırıldıktan sonra elde edilen sonuçlar Ek-3'de gösterilmiştir.

Ek-3 GAMS'de örnek uygulamanın sonuçları

```

                LOWER      LEVEL      UPPER      MARGINAL
---- VAR z          -INF      2447.014      +INF          .
    z kullanılabilir kalan yasal uçuş saatinin maliyeti

**** REPORT SUMMARY :          0      NONOPT
                                0      INFEASIBLE
                                0      UNBOUNDED

GAMS Rev 137  MS Windows                      10/24/07 07:30:10 Page 5
İlkay ORHAN, Eylül 2007 & Bütünleşik Uçak Bakım ve Rota Planlama
E x e c u t i o n

----   369 VARIABLE z.L          =      2447.014 kullanılabilir ka
                                           yasal uçuş saatin
                                           aliyeti

----   370 VARIABLE X.L i ve j uçuş bacakları ardışık olarak k uçağı taraf
                                           n uçulursa=1

                k1          k2          k3          k4

F101.F111      1.000
F102.F114                1.000
F103.F108                1.000
F104.F112                1.000
F105.F109                1.000
F106.T            1.000
F107.F103                1.000
F108.T            1.000
F109.F106                1.000
F110.F120      1.000
F111.F118      1.000
F112.F119                1.000
F113.F104                1.000
F114.F105                1.000
F115.T                                1.000
F116.F121                                1.000
F117.F122                                1.000
F118.F110      1.000
F119.F107                1.000
F120.T            1.000
F121.F117                                1.000
F122.F115                                1.000
O   .F101      1.000
O   .F102                1.000
O   .F113                1.000
O   .F116                                1.000

----   371 SET km_A "A" bakımına girecek uçak kümesi_UÇUŞ-SAATİ ÜZERİNDEN

k2,      k3

```

---- 372 SET km_W "3aylık" bakımına girecek uçak kümesi_TAKVİM-ZAMANI ÜZERİN
DEN

k1

---- 373 EQUATION Kalan_Ucus_Saati.L Uçakların "remain" kalan yasal uçuş saa
tleri

k1 355.000, k2 350.000, k3 450.000, k4 520.000

---- 374 EQUATION Kalan_Ucus_Saati.Up Uçakların "remain" kalan yasal uçuş sa
atleri

k1 850.000, k2 400.000, k3 450.000, k4 750.000