



**HAVAYOLU ÇİZELGELEME PROBLEMLERİNDE YENİ BİR SAĞLAM
ÇİZELGELEME YAKLAŞIMI: SAĞLAM UÇAK ROTALAMA**

Aykan AKINCILAR

**DOKTORA TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MART 2018

Aykan AKINCILAR tarafından hazırlanan “HAVAYOLU ÇİZELGELEME PROBLEMLERİNDE YENİ BİR SAĞLAM ÇİZELGELEME YAKLAŞIMI: SAĞLAM UÇAK ROTALAMA” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Ertan GÜNER

Endüstri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Ömer Faruk BAYKOÇ

Endüstri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Mehmet Duran TOKSARI

Endüstri Mühendisliği, Erciyes Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Feyzan ARIKAN

Endüstri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Ümit Sami SAKALLI

Yöneylem Araştırması Anabilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 02/03/2018

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Aykan AKINCILAR

02/03/2018

HAVAYOLU ÇİZELGELEME PROBLEMLERİNDE YENİ BİR SAĞLAM ÇİZELGELEME YAKLAŞIMI: SAĞLAM UÇAK ROTALAMA

(Doktora Tezi)

Aykan AKINCILAR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mart 2018

ÖZET

Literatürde havayolu çizelgeleme problemleri için sağlam çizelgeleme yaklaşımları bulunmakla beraber bu yaklaşımların çoğu tanımlanan belirsizliğe kesin olarak dayanıklı çizelgeler üretmekten uzaktır. Oysa üretilen çizelgenin kesin sağlamlığı garanti etmesi gerekmektedir. Literatürdeki bu önemli boşluğu gidermek için bu tez kapsamında iki sağlam çizelge tanımı önerilmiştir. Havayolu çizelgeleme problemleri için önerilen bu yeni sağlamlık kavramı, uçak rotalama alt problemine uyarlanmış, eldeki sağlam uçak rotalama alt problemi için sağlam optimizasyon yaklaşımı kullanılarak bir matematiksel model geliştirilmiştir. Sonsuz sayıda kısıt içerdiğinden çözümsüz olan bu matematiksel model en kötü durum formülasyonu yöntemi kullanılarak çözümsüzlük halinden kurtarılmıştır. Halen büyük boyutlu bir optimizasyon problemi olan eldeki sağlam uçak rotalama alt problemi sütun oluşturma yaklaşımı tabanlı bir stratejiden yararlanılarak makûl zamanda çözülebilir hale getirilmiştir. Böylece, çözümsüzlük hali ortadan kaldırılabilmiştir. Daha sonra, geliştirilen metodolojinin uygulanabilirliği ve geçerliliği gerçek hayat verileri kullanılarak test edilmiş ve oldukça cesaret verici sonuçlar elde edildiği rapor edilmiştir. Son olarak, gelecek çalışmalar için birtakım öneriler üzerinde durulmuştur.

Bilim Kodu : 90610

Anahtar Kelimeler : Havayolu çizelgeleme problemleri, sağlam optimizasyon, sağlam çizelgeleme, sağlam uçak rotalama

Sayfa Adedi : 142

Danışman : Prof. Dr. Ertan GÜNER

A NEW APPROACH FOR ROBUST SCHEDULING IN AIRLINE SCHEDULING
PROBLEMS: ROBUST AIRCRAFT ROUTING

(Ph. D. Thesis)

Aykan AKINCILAR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

March 2018

ABSTRACT

Although there are few attempts for robust scheduling for airline operations planning in the literature, most of those works are far to ensure a certain immunization against pre-defined uncertainty. Whereas ensuring immunization must be ensured by a robust schedule. In order to fill this vital gap in the literature, in this thesis, two definitions are defined for robust scheduling in airline scheduling problems. This new robustness approach for airline scheduling problems is implemented for aircraft routing sub-problem. A mathematical model is developed by utilizing robust counterpart approach. Robust counterpart of aircraft routing sub-problem is intractable since it has infinite number of constraints. Via worst-case reformulation approach, that intractable model could be reduced to a tractable one. However, the problem at hand is still a very hard problem to solve to optimal since it is in the class of large-scale optimization problem. A column generation based strategy is utilized in order to deal with curse of dimensionality. Thus, the problem is able to be solved in a reasonable time. A case study is also employed for approving applicability and validity of the proposed methodology. In conclusion, it is reported that the proposed methodology produces significantly encouraging results. This dissertation comes to an end with some suggestions for future works.

Science Code : 90610

Key Words : Airline operations planning, robust optimization, robust scheduling, robust aircraft routing

Page Number : 142

Supervisor : Prof. Dr. Ertan GÜNER

TEŞEKKÜR

Doktor ünvanı almamı her zaman tavsiye eden, beni bu kariyere özendiren ve bugünleri görecektir olsa çok sevinecek olan rahmetli babama, tez çalışmam boyunca duaları, akli ve kalbiyle her zaman yanımda olan sevgili anneme, ve Prof. Dr. Duran Toksarı başta olmak üzere tüm TİK üyelerine teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. HAVAYOLU ÇİZELGELEME PROBLEMLERİ (HYÇP).....	5
2.1. Uçuş Çizelgeleme (UÇ) Alt Problemi.....	5
2.2. Filo Atama (FA) Alt Problemi	5
2.3. Uçak Rotalama (UR) Alt Problemi	7
2.4. Ekip Atama (EA) Alt Problemi.....	9
3. MATEMATİKSEL ALTYAPI.....	11
3.1. Uçak Rotalama Alt Probleminin Tanımı.....	11
3.2. Uçak Rotalama Alt Probleminde Kullanılan Şebeke Yapıları.....	11
3.2.1. Bağlantı şebekesi.....	12
3.2.2. Zaman çizelgesi şebekesi	12
3.2.3. Zaman aralığı şebekesi	13
3.3. Uçak Rotalama Alt Probleminin Doğal Kısıtları	14
3.3.1. Bağlantı kısıtları	14
3.3.2. Bakım kısıtları.....	15
3.3.3. Uçuş sınırı kısıtları	15

	Sayfa
3.3.4. Diğer kısıtlar.....	16
3.4. Uçak Rotalama Alt Probleminin Matematiksel Modeli.....	16
3.4.1. Grönkvist (2005)'in temel modeli.....	16
3.4.2. Grönkvist (2005)'in nihai modeli	18
3.4.3. Uçak rotalama alt probleminin temel matematiksel modeli	19
3.5. Üst Problem Oluşturma Yaklaşımı (Mevcut Yaygın Strateji)	23
3.6. Üst Problemin Çözümüne Kavuşturulması	25
3.7. Bir Optimizasyon Probleminde Belirsizliğin Başlıca Nedenleri	26
3.8. Sağlam Optimizasyon (SO) Nedir?	27
3.9. Sağlam Optimizasyonun Varsayımları	28
3.10. Sağlam Optimizasyonun Matematiksel Gösterimi.....	29
4. HAVAYOLU ÇİZELGELEME PROBLEMLERİNDE SAĞLAM ÇİZELGELEME.....	31
4.1. Havayolu Çizelgeleme Problemlerinde Kaynak Tipleri	31
4.2. Havayolu Çizelgeleme Probleminde Kullanılan Harekat Tarzları.....	32
4.3. Havayolu Çizelgeleme Probleminde Aksaklıkların Nedenleri	33
4.4. Yeniden Çizelgeleme (YÇ)	34
4.5. Sağlam Çizelgeleme (SÇ)	35
4.6. HYÇP Literatüründe Sağlam Çizelgeleme Yaklaşımları.....	38
4.7. HYÇP'nde Yeni Sağlam Çizelgeleme Tanımları	43
5. ÖNERİLEN SAĞLAM ÇİZELGELEME YAKLAŞIMININ SUR ALT PROBLEMİNE UYARLANMASI	45
5.1. Problemin Tanımlanması	45
5.2. Belirsiz Veriler	47
5.3. Önerilen Modelin Varsayımları	48

	Sayfa
5.4. Önerilen Nominal Modelin Matematiksel Gösterimi	50
5.5. Önerilen Nominal Modelin Sağlam Karşılığı	52
5.6. Önerilen Nihai Model	57
5.7. Önerilen Nihai Modelin Çözümü.....	59
6. UYGULAMA ÇALIŞMASI	61
6.1. Planlama Döneminde Gerçekleşen Gecikmeler	63
6.2. Belirsizlik Kümelerinin Oluşturulması	64
6.3. Geliştirilen SURM'leri.....	67
6.4. Mümkün Alt Çözümlerin Elde Edilmesi.....	69
6.5. Üst Problemin Geliştirilmesi.....	71
6.6. Üst Problemin Çözüme Kavuşturulması	71
6.7. En Kötü Durum Gecikmeleri (EKDG) ve Sağlamlık Maliyetleri.....	75
6.8. Deneysel Çalışma.....	89
6.9. Sonuçların Karşılaştırılması	92
7. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....	101
KAYNAKLAR	105
EKLER.....	111
EK-1. Aksaklıkların sınıflandırılması.....	112
EK-2. Nominal model ve sağlam modellerin mümkün çözüm sayıları.....	116
EK-3. 07.05.2015 tarihi için model ile elde edilen çözümde yer alan toplam 66 uçağın uçuş planı.....	120
EK-4. 07.05.2015 tarihi için model ile elde edilen çözümde yer alan toplam 67 uçağın uçuş planı.....	127
EK-5. Ocak, Şubat ve Mart aylarının EKDG'leri.....	134
EK-6. Ocak, Şubat ve Mart aylarında gereken uçak sayıları	137

Sayfa

ÖZGEÇMİŞ	140
DİZİN.....	142



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.1. Uçak arızalarından dolayı gerçekleşen tüm gecikmelerin detayları	63
Çizelge 6.2. δ_1 modeline göre 07.05.2015 tarihinde görev yapan 7 uçağın uçuş planı .	74
Çizelge 6.3. 01.01.2015-07.01.2015 arasında gerçekleşen gecikmeler	75
Çizelge 6.4. Nisan ayı en kötü durum gecikmeleri	76
Çizelge 6.5. Mayıs ayı en kötü durum gecikmeleri	77
Çizelge 6.6. Nisan ayı için UR ve SUR modellerinin gerektirdiği uçak sayıları.....	78
Çizelge 6.7. Mayıs ayı için UR ve SUR modellerinin gerektirdiği uçak sayıları.....	83
Çizelge 6.8. Nisan ayı için SURM'lerinin karşılaştırılması	94
Çizelge 6.9. Mayıs ayı için SURM'lerinin karşılaştırılması.....	95
Çizelge 6.10. Tüm planlama dönemi için SURM'lerinin karşılaştırılması	98

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. HYÇP'nin hiyerarşik yapısı.....	2
Şekil 3.1. Bağlantı şebekesine bir örnek.....	12
Şekil 3.2. Zaman çizelgesi şebekesine bir örnek	13
Şekil 3.3. Zaman aralığı şebekesine bir örnek	14
Şekil 5.1. UR alt probleminin çözümü.....	60
Şekil 5.2. SUR alt probleminin çözümü	60
Şekil 6.1. Uçak arızalarından dolayı gerçekleşen gecikmeler	63
Şekil 6.2. δ_{S1}^* SUR alt probleminde Nisan ayı sağlamlık maliyetleri	80
Şekil 6.3. δ_{S2}^* SUR alt probleminde Nisan ayı sağlamlık maliyetleri	80
Şekil 6.4. δ_{S3}^* SUR alt probleminde Nisan ayı sağlamlık maliyetleri	81
Şekil 6.5. δ_{S1}^* SUR alt probleminde Nisan ayı EKDG ve SM'leri	82
Şekil 6.6. δ_{S1}^* SUR alt probleminde Nisan ayı EKDG ve SM'leri	82
Şekil 6.7. δ_{S1}^* SUR alt probleminde Nisan ayı EKDG ve SM'leri	83
Şekil 6.8. δ_{S1}^* SUR alt probleminde Mayıs ayı sağlamlık maliyetleri	85
Şekil 6.9. δ_{S2}^* SUR alt probleminde Mayıs ayı sağlamlık maliyetleri	85
Şekil 6.10. δ_{S3}^* SUR alt probleminde Mayıs ayı sağlamlık maliyetleri	86
Şekil 6.11. δ_{S1}^* SUR alt probleminde Mayıs ayı EKDG ve SM'leri.....	87
Şekil 6.12. δ_{S2}^* SUR alt probleminde Mayıs ayı EKDG ve SM'leri.....	87
Şekil 6.13. δ_{S3}^* SUR alt probleminde Mayıs ayı EKDG ve SM'leri.....	88
Şekil 6.14. δ_{S1}^* için elde edilen rassal gecikmeler.....	90

Şekil	Sayfa
Şekil 6.15. δ_{s2}^* için elde edilen rassal gecikmeler.....	91
Şekil 6.16. δ_{s3}^* için elde edilen rassal gecikmeler.....	91



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Kısaltmalar	Açıklamalar
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AES	Absorbe edilme sağlamlığı
AESSÇ	Absorbe edilme sağlamlığına dayalı sağlam çizelgeleme
BDOP	Belirsiz doğrusal optimizasyon modeli
Bkz	Bakınız
EA	Ekip atama
DÇEBG	1000 simülasyon koşturmasında üretilen en büyük gecikmelerin dk cinsinden toplamını
DÇEKG	1000 simülasyon koşturmasında üretilen en küçük gecikmelerin dk cinsinden toplamını
DÇOG	1000 simülasyon koşturmasında üretilen ortalama gecikmelerin dk cinsinden toplamını
dd	diğer durumlarda
DOP	Doğrusal optimizasyon problemi
EKDG	En kötü durum gecikmeleri
FA	Filo atama
FAA	Federal Aviation Administration
FP	Filo planlama
FTC	Flight-time-credit
GKZ	Gerçekleşen kalkış zamanı
GVZ	Gerçekleşen varış zamanı
HYÇP	Havayolu çizelgeleme problemleri
KH	Kalkış havaalanı
NÇ	Nominal çizelgeleme
OP	Optimizasyon problemi
PKZ	Planlanan kalkış zamanı
PVZ	Planlanan varış zamanı

Kısaltmalar**Açıklamalar****RESOPT**

Sohoni ve diğerlerinin (2006) EA alt problemi için önerdikleri model

SÇ

Sağlam çizelgeleme

SIMAIR

HYÇP’nde kullanılan bir simülasyon yazılımı

SM

Sağamlık maliyeti

SO

Sağlam optimizasyon

SOM

Sağlam optimizasyon modeli

SUR

Sağlam uçak rotalama

SURM

Sağlam uçak rotalama modeli

TİK

Tez izleme kurulu

UÇ

Uçuş çizelgeleme

UK

Uçuş kodu

UR

Uçak rotalama

vb

ve benzeri

VH

Varış havaalanı

YÇ

Yeniden çizelgeleme

YÇP

Yeniden çizelgeleme problemi

YÇS

Yeniden çizelgeleme sağlamlığı

YÇSSÇ

Yeniden çizelgeleme sağlamlığına dayalı sağlam çizelgeleme

1. GİRİŞ

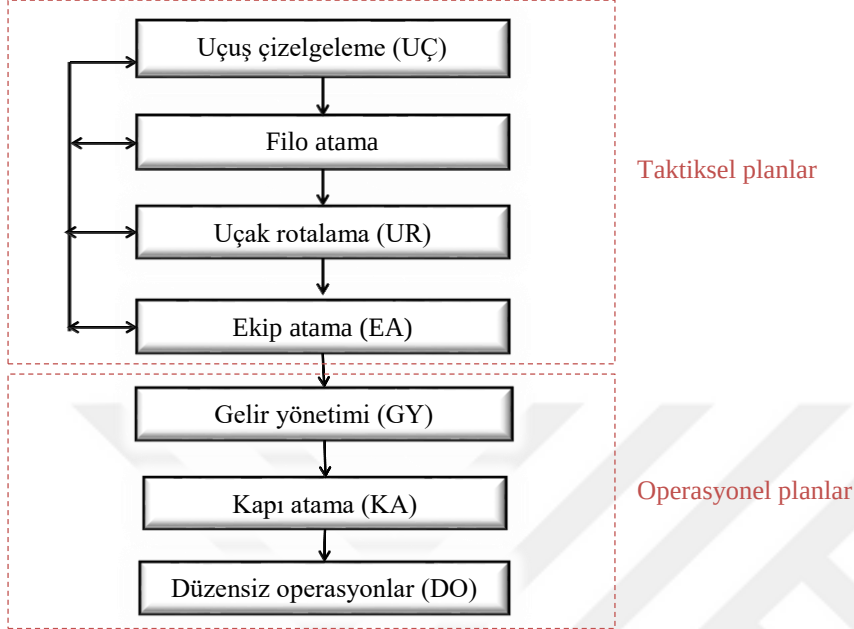
1978 yılında Amerika Birleşik Devletleri (ABD)'nde havayolu sektöründe özelleştirme hareketi gerçekleştirilmiştir ve bu hareket ile, ABD'de havayolu sektöründen devlet müdahalesi ve desteği çekilmiştir. Böylece, ABD havayolu firmaları bir taraftan operasyon planlarını tamamen bağımsız bir şekilde yapabilme özgürlüğüne kavuşmuşken diğer taraftan bu planları devlet desteği olmadan gerçekleştirmek zorunda kalmıştır. Böylece, 1978 yılından itibaren ABD havayolu firmalarının ticari hayatta kalabilmeleri için operasyon planlamanın etkin bir şekilde yapılması zorunluluğu ortaya çıkmıştır.

Özelleştirmeye gidilen havayolu sektöründe faaliyet gösteren bir havayolu firması, doğal olarak diğer firmalarla rekabet etmek zorunda kalmıştır. Bu rekabeti güçlü bir şekilde yapabilmek için operasyon planlarının çok iyi yapılması gerekmektedir. Büyük ölçekli bir havayolu firmasında, iyi bir plan ile kötü bir plan arasındaki maliyet farkının yılda yaklaşık birkaç milyar dolar (Barnhart ve Laporte, 2007) olduğu düşünüldüğünde, büyük ölçekli havayolu firmalarının ticari hayatta varlıklarını sürdürebilmek için bu planların mümkün olduğunca iyi yapılması hayati derecede önem taşımaktadır.

Bahsedilen operasyon planları, talepler göz önünde bulundurularak nereden nereye uçulacağı, bu uçuş ayaklarının hangi sıklıkta ve ne zaman yapılacağı gibi stratejik kararların verilmesi, bu uçuş ayalarının hangi tip uçakla gerçekleştirileceğinin belirlenmesi, hangi tip uçakla gerçekleştirileceği belirlenen uçuş ayaklarına o tipteki uçağın atanması, yine bu uçuş ayaklarına kokpit ekibinin, kabin ekibinin ve aktarmalı yolcuların atanması şeklinde açıklanabilir. Bu planların iyi bir şekilde yapılması ve hatta bu planların mümkün olduğunca bozulmadan gerçekleştirilebilmesi, bir havayolu firması için hayati önem taşımaktadır. Bu planların elde edilmesi problemi, literatürde *havayolu çizelgeleme problemleri (HYÇP)* olarak adlandırılmaktadır.

Tüm operasyon planlarının tek bir matematiksel model kullanılarak elde edilmesi ideal durumdur. Ancak, yukarıda bahsedilen tüm planların tek bir modelde ifade edilmesi oldukça güçtür. Böyle bir model kurulmuş olsa bile, HYÇP'lerinin genellikle büyük boyutlu optimizasyon problemi sınıfına girmesi nedeniyle bu modelin çözülmesi günümüzde genellikle mümkün değildir. Bu nedenle, HYÇP, çözümü daha kolay olan alt problemlere bölünmüştür. Bu yaklaşım ile herbir alt problem ayrı ayrı ve ardışık olarak çözüme

kavuşturularak nihai plan(lar) elde edilmeye çalışılmaktadır. Şekil 1.1’de, HYÇP’nin bahsedilen hiyerarşik yapısı verilmiştir.



Şekil 1.1. HYÇP’nin hiyerarşik yapısı (Bazargan, 2004: 34)

1990’lı yılların ortalarına kadar sezgisel yöntemler kullanılarak elde edilen bu planlar 1990’lı yılların sonlarında etkili yöneylem araştırması araçlarının kullanılması ile çok daha kârlı ve verimli bir hale getirilmiştir. Ancak, bu araçların son derece basit yöntemlerden ibaret olduğunu vurgulamakta fayda vardır. Yine bu yıllarda, hem bilgisayar sektöründeki, hem de optimizasyon alanındaki önemli gelişmeler ile ABD menşeli havayolu firmaları optimal planları kullanma çabası içine girmişlerdir. Böylece mümkün olan en iyi planların kullanılarak büyük miktardaki maliyetten kaçınılması amaçlanmaktadır. Bu arayış, akademik camianın da ilgisini çekmiştir. Özellikle 1990’lı yıllardan sonra HYÇP önem kazanmış, literatürde bu alanda önemli gelişmeler görülmüştür.

HYÇP için optimal sonucun elde edilmesi oldukça zordur. Ancak, bu başarılsa bile optimal çizelgenin yeterli olduğu kanısı yanlış bir kanı olacaktır çünkü elde edilen bu optimal çizelgenin bozulmayacağı, bu çizelgeyi uygulanamaz hale getirebilecek herhangi bir dış etken olmayacağı varsayılmaktadır. Gerçekte böylesine büyük bir sistemde yaşanan ufak bozulmaların bile eldeki çizelgelere büyük etkileri olabilmektedir. Özellikle orta ve büyük ölçekli havayolu firmaları bu durum ile başa çıkmak zorundadır. Genellikle yüksek maliyetleri beraberinde getiren bu bozulmalar da bilim dünyasının ilgisini çekmiştir.

Bozulmanın yol açabileceği ciddi sorunların *çığ etkisi* olarak adlandırılan kavram nedeniyle daha da büyümesi söz konusu olabilmektedir (Bkz. Bölüm 4.5). Dolayısı ile, Barnhart ve Cohn (2004) tarafından yapılan çalışmada da değinildiği gibi bozulmanın mümkün olduğunca hızlı çözülmesi hayati önem taşımaktadır. Bu amaçla, araştırmacılar, meydana gelen bozulmaları mümkün olduğunca hızlı çözmeye yönelmişlerdir. Bunun için, eldeki problem genellikle küme-kaplama, küme-ayırma gibi iyi bilinen problemlere dönüştürülmüş, çözüm yöntemi olarak da hızlı sonuç alındığından genellikle sezgisel yöntemler kullanılmıştır. Bu aşamada optimal çözüm yerine uygun çözüm bulunması bile çoğu zaman yeterli olabilmektedir. *Yeniden çizelgeleme problemi (YÇP)* olarak adlandırılan bu problemler üzerinde halen yoğun çalışmalar yapılmaktadır (Bkz. Bölüm 4.4).

Özellikle 2000’li yılların başından itibaren ise, literatürde sağlam çizelge üretilmesi üzerinde durulmaya başlanmıştır. Sağlam çizelge, kısaca, bozulmalara karşı dayanıklı bir çizelge olarak tanımlanabilir. Sağlam çizelge üretme hedefi, büyük boyutlu optimizasyon problemleri sınıfına girdiği için zaten çözümü oldukça zor olan HYÇP’ni daha da zorlaştırmakta, hatta çözümsüz problemler elde edilmesine yol açabilmektedir. Yine de, tüm zorluklara rağmen, sahip olduğu potansiyel katkı nedeniyle HYÇP’nde sağlam çizelgeleme literatürde hayli ilgi görmektedir ve yazar tarafından bu ilginin artarak devam edeceği öngörülmektedir.

Bu tez kapsamında, literatürde kayda değer birçok gelişme görülmesine rağmen hâlâ önemli ölçüde eksikleri olan HYÇP’nde sağlam çizelgeleme üzerinde durulmuştur. Literatürde mevcut eksikliklerden yola çıkılarak *tip I sağlam çizelge* ve *tip II sağlam çizelge* olmak üzere iki yeni tanım öne sürülmüş, bu tanımlardan birincisine oldukça uygun olan *sağlam optimizasyon (SO)* yaklaşımı kullanılarak *tip I sağlam çizelge* üreten bir matematiksel model elde edilmiştir. Önerilen yaklaşım, uçak rotalama (UR) alt problemine uyarlanmış, eldeki UR alt problemi için sağlam çizelgeler üretecek matematiksel model(ler) geliştirilmiştir. Çözümsüz olan bu model(ler) birtakım matematiksel operasyonlar ile çözülebilir hale getirilmiştir. Eldeki model, birçok orta ve büyük havayolu firması için hâlen büyük boyutlu optimizasyon problemi sınıfına girmektedir. Bu nedenle, HYÇP literatüründe sıklıkla kullanılan ve *mevcut yaygın strateji* (Bkz. Bölüm 3.9) olarak adlandırılan çözüm metodolojisi benimsenmiştir. Daha sonra, geliştirilen yaklaşım bir gerçek hayat problemine uygulanmıştır. Gerçek hayat verileri kullanılarak yapılan bu uygulama çalışması ile sağlam çizelgelerin genellikle oldukça makûl maliyetle, hatta çoğu zaman ek maliyete gerek

kalmadan elde edilebileceği görülmüştür. Tez kapsamında önerilen bu yaklaşım ile böylesine umut verici sonuçlar elde edilmesi, önerilen yaklaşımın değerini önemli ölçüde arttırmaktadır. Kısacası, önerilen yaklaşım ile sağlam çizelge(ler) oldukça makûl maliyetle kesin olarak garanti edildiğinden bu yeni yaklaşımın HYÇP’nde sağlam çizelgeleme literatüründe yapı taşı olması beklenmektedir.

Bir sonraki bölümde, HYÇP daha kapsamlı bir şekilde tartışılmış; Bölüm 3’te, okuyucunun ihtiyaç duyabileceği matematiksel altyapı verilmiş; Bölüm 4’te HYÇP’nde sağlam çizelgeleme kavramı ile ilgili kavramlar tanıtılmış ve ilgili literatür incelenmiş; Bölüm 5’te, önerilen sağlam çizelgeleme yaklaşımı UR alt problemine uyarlanmış; Bölüm 6’da gerçek veriler kullanılarak bir önceki bölümde ele alınan UR alt problemi çözüme kavuşturulmuş; son bölümde ise sonuç ve değerlendirmeler ile gelecek çalışmalar için önerilere yer verilmiştir.

2. HAVAYOLU ÇİZELGELEME PROBLEMLERİ (HYÇP)

Bir önceki bölümde, HYÇP'nin genellikle daha küçük problemlere bölünerek ele alındığından bahsedilmiş idi. Bu bölümde, HYÇP'ni oluşturan bu alt problemler, daha açık bir ifade ile uçuş çizelgeleme (UÇ) alt problemi, filo atama (FA) alt problemi, UR alt problemi ve ekip atama (EA) alt problemi kısaca tanıtılmaktadır.

2.1. Uçuş Çizelgeleme (UÇ) Alt Problemi

UÇ alt problemi, havayolu firmasının hangi noktadan hangi noktaya uçuş yapacağı, bu uçuşların hangi sıklıkta ve ne zaman olacağı gibi sorulara cevap arayan alt problemidir. Talep tahmini, politik, stratejik ve operasyonel kısıtlar gibi belirlenmesi oldukça zor unsurlar bu alt problemin doğasında vardır. Dolayısıyla UÇ alt probleminin –özellikle– modellenmesi oldukça zordur. Aynı zamanda, orta ölçekli bir havayolu firması için bile UÇ alt problemi büyük boyutlu optimizasyon problemi sınıfına girmektedir ki bu tür problemlerin optimal çözümünü elde etmek oldukça zordur.

Tüm bu zorlukların yanında, UÇ alt probleminin çözümü ile ortaya çıkan *uçuş çizelgesinin* elde edilmesi bir havayolu firması için belki de en önemli aşamadır. Çünkü bu alt problemden elde edilen uçuş çizelgesi, diğer tüm alt problemlerde girdi olarak kullanılmaktadır. Bu sebeple, bu alt problemin üzerinde dikkatle durulmalıdır.

Herbir havayolu firmasının kendine has stratejik ve operasyonel kısıtları, faaliyet gösterdiği ülkenin politik kısıtları gibi çok çeşitlilik gösteren faktörlerden ötürü UÇ alt problemi için genel bir matematiksel model verilememiştir. UÇ alt problemleri için Kim ve Barnhart (2007), Pita ve diğerleri (2014), Sun (2015), Abdelghany ve diğerleri (2017) örnek olarak verilebilir.

2.2. Filo Atama (FA) Alt Problemi

Stratejik hedeflerin gerçekleştirilmesi, faaliyet gösterilen ülkenin yasal kısıtları, eskiyen uçakların yenilenmesi, zamanla değişen talepler gibi birçok nedenden ötürü özellikle orta ve büyük ölçekli havayolu firmalarının bünyesinde birkaç filo tipi bulunmaktadır. Havayolu firmasının bünyesinde bulunacak filo tiplerinin belirlenmesi ve bu filo tiplerinde kaç adet

uçak bulunması gerektiği problemi, literatürde *filo planlama (FP)* problemi olarak adlandırılmaktadır. FA alt problemi ise, önceden belli olan uçuş çizelgesindeki her bir uçuş ayağının hangi filo tipine ait uçak ile gerçekleştirileceğinin belirlenmesi problemi olarak tanımlanabilir. Bir başka deyişle, FA alt problemi, nereden nereye ne zaman uçuş yapılacağı ve her bir uçuş ayağının talep tahminleri kullanılarak bu uçuş ayaklarının hangi tip uçakla gerçekleştirileceğinin belirlenmesidir. Burada, FP problemi ile FA alt probleminin birbirinden farklı problemler olduğuna dikkat edilmelidir.

Smith (2004) tarafından önerilen, sadece temel kısıtları içeren bir FA alt probleminin matematiksel modeli aşağıdaki gibidir:

Kümeler

A: havaalanları, $a \in A$

F: uçuş ayakları, $i \in F$

L: filo tipleri, $l \in L$

T: tüm kalkış ve inişler, $t \in T$

$CL(l)$: l filosuna atanabilecek uçuş ayakları kümesi

$I(l, a, t)$: $\{l, a, t\}$ kombinasyonuna uygun uçuş ayakları kümesi

$O(l, a, t)$: $\{l, a, t\}$ kombinasyonuna uygun olmayan uçuş ayakları kümesi

Parametreler

N_l : l tipi filoda bulunan uçak sayısı

Cap_l : l tipi uçakların yolcu kapasitesi

C_{li} : l tipi filonun i uçuş ayağına atanmasının maliyeti

R_{li} : l tipi filonun i uçuş ayağına atanmasından elde edilecek kâr

Değişkenler

$$x_{li} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } l \text{ tipi filo } i \text{ uçuş ayağına atanırsa} \\ 0, & \text{diğerde} \end{cases}$$

$y_{lat^+} = t$ arkından hemen sonra a havaalanında yerde kalan l tipi uçak sayısı

$y_{lat^-} = t$ arkından hemen önce a havaalanında bulunan l tipi uçak sayısı

Matematiksel model

$$\max_{x_{li}: l \in L, i \in F} \sum_{l \in L} \sum_{i \in F} (R_{li} - C_{li}) x_{li} \quad (2.1)$$

s.t.

$$\sum_{l \in L} x_{li} = 1, \forall i \in F \quad (2.2)$$

$$y_{lat^-} + \sum_{i \in I(1,a,t)} x_{li} - y_{lat^+} - \sum_{i \in O(1,a,t)} x_{li} = 0, \forall l \in L, \forall a \in A, \forall t \in T \quad (2.3)$$

$$\sum_{a \in A} y_{la0^-} + \sum_{i \in CL(1)} x_{li} \leq N_1, \forall l \in L \quad (2.4)$$

$$x_{li} \in \{0,1\}, \forall l \in L, \forall i \in F \quad (2.5)$$

$$y_{lat^-}, y_{lat^+} \geq 0 \text{ ve tamsayı}, \forall l \in L, \forall a \in A, \forall t \in T \quad (2.6)$$

Burada, Eş. 2.1, elde edilen kârın ençoklanması; Eş. 2.2, her uçuş ayağına yalnız bir filo tipi atanmasını; Eş. 2.3, yerde kalan ve atanan filo tipindeki uçak sayısı dengesini; Eş. 2.4, filodaki uçak sayısından fazla uçak kullanılmamasını; Eş. 2.5 ve Eş. 2.6 ise karar değişkenlerinin yapısını ifade etmektedir.

Pita ve diğerleri (2014), Dumas ve diğerleri (2009), Ko ve diğerleri (2017), Ma ve diğerlerinin (baskıda) çalışmaları FA alt problemi ile ilgili çalışmalara örnek olarak verilebilir. FA alt problemi için daha detaylı bilgi için okuyucuya Sherali ve diğerleri (2006)'nin çalışması önerilir.

2.3. Uçak Rotalama (UR) Alt Problemi

Uçuş ve filo atama planlarının elde edilmesi ile birlikte, hangi uçuş ayağının hangi filo tipi ile gerçekleştirileceği artık bilinmektedir. Ancak, bu uçuş ayaklarının ilgili filodaki hangi uçakla gerçekleştirileceği henüz belli değildir. UR alt problemi, basitçe, hangi uçuş ayağının hangi uçakla gerçekleştirileceği planının elde edilmesi problemi olarak tanımlanabilir.

UR alt problemi genellikle büyük boyutlu optimizasyon problemi sınıfına girdiğinden bu problemlerin çözümü için literatürde *mevcut yaygın strateji* olarak adlandırılan çözüm stratejisi benimsenmektedir. Bu yaklaşım, önce tüm mümkün alt çözümlerin oluşturulması, daha sonra gerçek problemi küme-kaplama, küme-ayırma, küme-paketleme gibi gelişmiş

çözüm yöntemleri bulunan problem tiplerine benzeterek bilgisayar ortamında elde edilen mümkün alt çözümlerden hangilerinin seçileceğinin kararının verilmesi olarak tanımlanabilir. Bu stratejiye, Bölüm 3.10’da daha detaylı bir şekilde yer verilmiştir.

Yukarıda bahsedilen strateji bir UR alt problemine uygulandığında geliştirilebilecek nihai modellere Bazargan (2004) tarafından önerilen model örnek olarak verilebilir. Bazargan (2004) tarafından önerilen model aşağıda gösterilmiştir:

Kümeler

S: mümkün alt çözümler kümesi, $s \in S$

F: uçuş ayakları kümesi, $i \in F$

Parametreler

$c_s = s$ mümkün alt çözümünün maliyeti

$$\delta_{si} = \begin{cases} 1, & i \text{ uçuş ayağı eğer } s \text{ mümkün alt çözümünde yer alıyorsa} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$$

Değişkenler

$$x_s = \begin{cases} 1, & \text{eğer } s \text{ mümkün alt çözümü nihai çözümde yer alıyorsa} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$$

Matematiksel model

$$\min_{x_s: s \in S} \sum_{s \in S} c_s x_s \quad (2.1)$$

s.t.

$$\sum_{s \in S} \delta_{si} x_s = 1, \quad \forall i \in F \quad (2.2)$$

$$x_s \in \{0,1\}, \quad \forall s \in S \quad (2.3)$$

Kabbani ve Patty (1992), Cordeau ve diğerleri, (2001), Bartholomew-Biggs ve diğerleri (2003), Weide ve diğerleri (2010) ile Khaled ve diğerleri (2018)’nin çalışmaları UR alt problemi için örnek olarak verilebilir.

Bu tezin asıl amacı, yeni bir bakış açısı ile HYÇP’nde sağlam çizelgeleme çalışmalarına yeni bir soluk getirmektir. Bu amaçla, iki yeni tanım önerilmiş, bu tanımlardan ilkinin sağlayan model(ler) geliştirilmiştir. Önerilen model(ler) UR alt problemine uyarlanmış, uygun çözüm stratejisi kullanılarak nihai bir çözüme ulaşılmıştır. Böylece, önerilen model(ler)in HYÇP’ne uygulanabilirliği gösterilmiştir. UR alt problemi pilot problem olarak seçildiğinden bu alt problemin yapısı daha iyi bilinmelidir. Bu nedenle, Bölüm 3.1 -3.4, UR alt probleminin daha detaylı tanıtılmasına ayrılmıştır.

2.4. Ekip Atama (EA) Alt Problemi

Bir uçuş ayağı gerçekleştirilirken uçakta kokpit ekibi ve kabin ekibi olmak üzere iki tür ekip bulunmaktadır. Günümüz şartlarında, bu ekipler bir uçuş ayağında olmazsa olmaz ekiplerdir. Kokpit ekibi ve kabin ekibi farklı kısıtlara sahip olduklarından kokpit ekibi ve kabin ekibi için iki ayrı EA alt probleminden bahsetmek daha doğru olacaktır. Her iki EA alt problemi için de, UR alt problemine benzer olarak, UÇ ve FA alt problemlerinin çıktısı girdi olarak kullanılmaktadır. EA alt problemi, hangi uçuş ayağının hangi filo tipi ile gerçekleştirileceği bilindiği varsayımı altında bu uçuş ayaklarını gerçekleştirecek ekiplerin (genellikle kokpit ve kabin ekiplerinin) ilgili uçuş ayağına atanması problemi olarak tanımlanabilir.

Genellikle, UR alt problemine benzer olarak EA alt problemi için de benzer bir strateji uygulanarak eldeki problem küme-kaplama, küme-ayırma gibi tek kısıt kümesi içeren ve etkin çözüm yöntemleri geliştirilmiş, iyi bilinen problemlerden birine dönüştürülmektedir. Örnek olarak, EA alt problemi için bu stratejiyi benimseyen Lapp (2012) tarafından geliştirilen matematiksel model aşağıda verilmiştir.

Kümeler

S: mümkün alt çözümler kümesi, $s \in S$

F: uçuş ayakları kümesi, $i \in F$

Parametreler

$c_s = s$ mümkün alt çözümünün maliyeti

$$\delta_{si} = \begin{cases} 1, & i \text{ uçuş ayağı eğer } s \text{ mümkün alt çözümünde yer alıyorsa} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$$

Değişkenler

$$x_s = \begin{cases} 1, & \text{eğer } s \text{ mümkün alt çözümü nihai çözümde yer alıyorsa} \\ 0, & \text{diğerde} \end{cases}$$

Matematiksel model

$$\min_{x_s: s \in S} \sum_{s \in S} c_s x_s \quad (2.4)$$

s.t.

$$\sum_{s \in S} \delta_{si} x_s = 1, \quad \forall i \in F \quad (2.5)$$

$$x_s \in \{0,1\}, \quad \forall s \in S \quad (2.6)$$

Daha önce değinildiği gibi, kokpit ekibi ve kabin ekibinin uçuş kısıtları birbirinden farklı olduğundan EA alt problemini kendi içinde ikiye ayırmak mümkündür. Burada, dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan biri, Eş. 2.4 – 2.6 ile verilen matematiksel modelin aynı planlama periyodunda kokpit ve kabin ekipleri için ayrı ayrı uygulanması gereğidir.

Dikkat edilirse, EA ve UR alt problemleri birbirlerinden farklı alt problemler olsa da, EA alt problemi ile UR alt problemi için önerilen modeller birbirine çok benzemektedir. Görsel olarak birbirinin aynısı gibi görünen bu iki matematiksel modelin arasındaki fark mümkün alt çözümlerin elde edilmesi aşamasındadır. Basitçe, birbiri ardınca atanabilecek ardışık iki uçuş ayağı için gerekli şartlar uçaklar ve ekipler için değişebilmektedir. Örneğin bir kokpit ekibi genellikle günde en fazla 1 veya 2 uçuş yapabiliyorken bir uçağın günde 4 uçuş ayağını gerçekleştirmesine izin verilebilmektedir.

Yan ve Chang (2002), Yan ve Tu (2002), Deng ve Lin (2011) ile Ramirez ve diğerleri (2014)'nin çalışmalarında EA alt problemi ele alınmıştır.

3. MATEMATİKSEL ALTYAPI

Bu tez çalışmasında önerilen sağlam çizelgeleme yaklaşımının uygulanabilirliğinin gösterilmesi için bu yaklaşım UR alt probleme uyarlanmıştır. Bu nedenle, UR alt probleminin detaylandırılması faydalı olacaktır. Bu amaçla, bir önceki bölümde HYÇP'nin alt problemlerine genel olarak değinildikten sonra, bu bölümde ilk olarak UR alt probleminin teorisine yer verilmiştir. Daha açık bir ifadeyle, bu bölümde UR alt problemi için kullanılan şebeke yapıları, UR alt probleminin doğal kısıtları, temel matematiksel modeli ve literatürde UR alt probleminin çözümü için sıklıkla kullanılan çözüm metodolojisi sunulmuştur (Bkz. Bölüm 3.1 – 3.6). Sonrasında, bu tez çalışmasının asıl amacı olan HYÇP'nde sağlam çizelge(ler) elde edilmesinde sağlam optimizasyon (SO) yaklaşımından yararlanıldığından SO yaklaşımı matematiksel olarak tanıtılmıştır (Bkz. Bölüm 3.7 – 3.10). Böylece, bu tez kapsamında yararlanılan üst düzey matematiksel kavramlar kapsamlı bir şekilde aktarılmaya çalışılmıştır.

3.1. Uçak Rotalama Alt Probleminin Tanımı

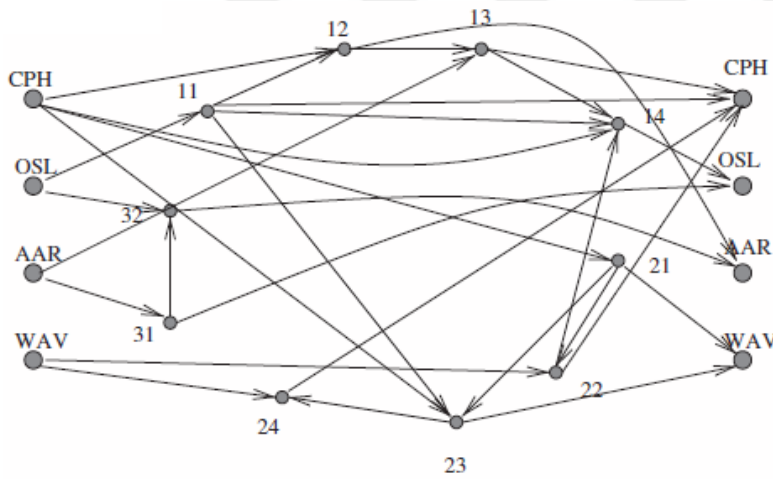
UR alt problemi, belli olan bir uçuş çizelgesinde hangi uçuş ayağının hangi filo ile gerçekleştirileceğinin bilindiği varsayımı altında uçakların uçuş ayaklarına atanması problemidir. Bir UR alt probleminde, filo kısıtları, uçakların bakım kısıtları gibi kısıtlar bulunabilir iken dikkate alınan amaç fonksiyonu ise genellikle toplam kârın ençoklanmasıdır. Kenan ve diğerleri (baskıda)'nin çalışması toplam kârın ençoklandığı en güncel çalışmalardan birisidir.

3.2. Uçak Rotalama Alt Problemde Kullanılan Şebeke Yapıları

Bu alt bölümde, UR alt problemde kullanılan şebeke yapıları tanıtılmıştır. Bu şebeke yapılarında dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, genellikle sadece *mümkün* uçuş ayaklarının gösterilmesidir. Bir başka ifadeyle, bu şebeke yapıları, daha önce belirtilen kısıtlar gözetilerek oluşturulduğundan ek kısıtlara gerek kalmamaktadır. Böylece, UR alt problemde önemli ölçüde boyut indirgemesi gerçekleştirilmiş olmaktadır.

3.2.1. Bağlantı şebekesi

Bağlantı şebekesinde, faaliyet düğümlerdedir. Herbir düğüm uçuş ayaklarını gösterirken yönlü arklar da bu uçuş ayaklarını birbirine bağlar. Yani, bir i düğümü, (i, j) arkı ile j düğümüne bağlanır ve ilgili kaynağın (uçak, ekip, vs) I_i uçuş ayağından hemen sonra I_j uçuş ayağını gerçekleştireceğini gösterir. Burada, uçuşların kalkış zamanları, varış zamanları, kalkış yeri, varış yeri, uçakların havaalanında yükleme, indirme vb uçuş görevlerinin tam olarak yerine getirilebilmesi için gerekli olan süre gibi çizelge detayları açık olarak gösterilmez ancak bunların tümüne riayet edilir. Kaynak ve bataklık düğümleri ise, sırasıyla planlama ufku başında ilgili kaynağın nerede ve kaç tane olduğunu ve planlama ufku sonunda nerede ve kaç tane olması gerektiğini gösterir. Bağlantı şebekesine ilişkin bir örnek Şekil 3.1’de verilmiştir.

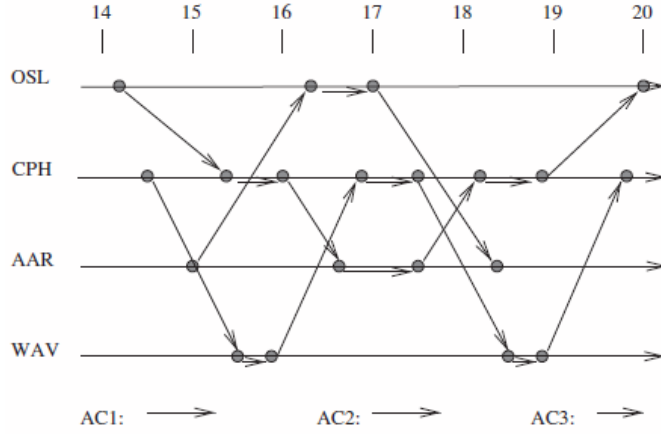


Şekil 3.1 Bağlantı şebekesine bir örnek (Clausen ve diğerleri, 2010)

3.2.2. Zaman çizelgesi şebekesi

İlk defa Gershkoff (1987) tarafından geliştirilen zaman çizelgesi şebekesinde faaliyet arklardadır. Dikey düzlem zamanı gösterirken yatay düzlem yer (havaalanı) bilgisini içerir. Zaman çizelgesi şebekesinde, düğümler olayları (varış veya kalkış) ifade ederken yönlü arklar ise bu olayların birbirini izlediğini gösterir. Burada, çizelge bilgileri açıkça gösterilmektedir. Yine aynı şekilde kaynak ve bataklık düğümleri bulunmaktadır. Bağlantı şebekesine benzer olarak, Bölüm 3.3’te belirtilen kısıtlar açıkça ifade edilmese de bu

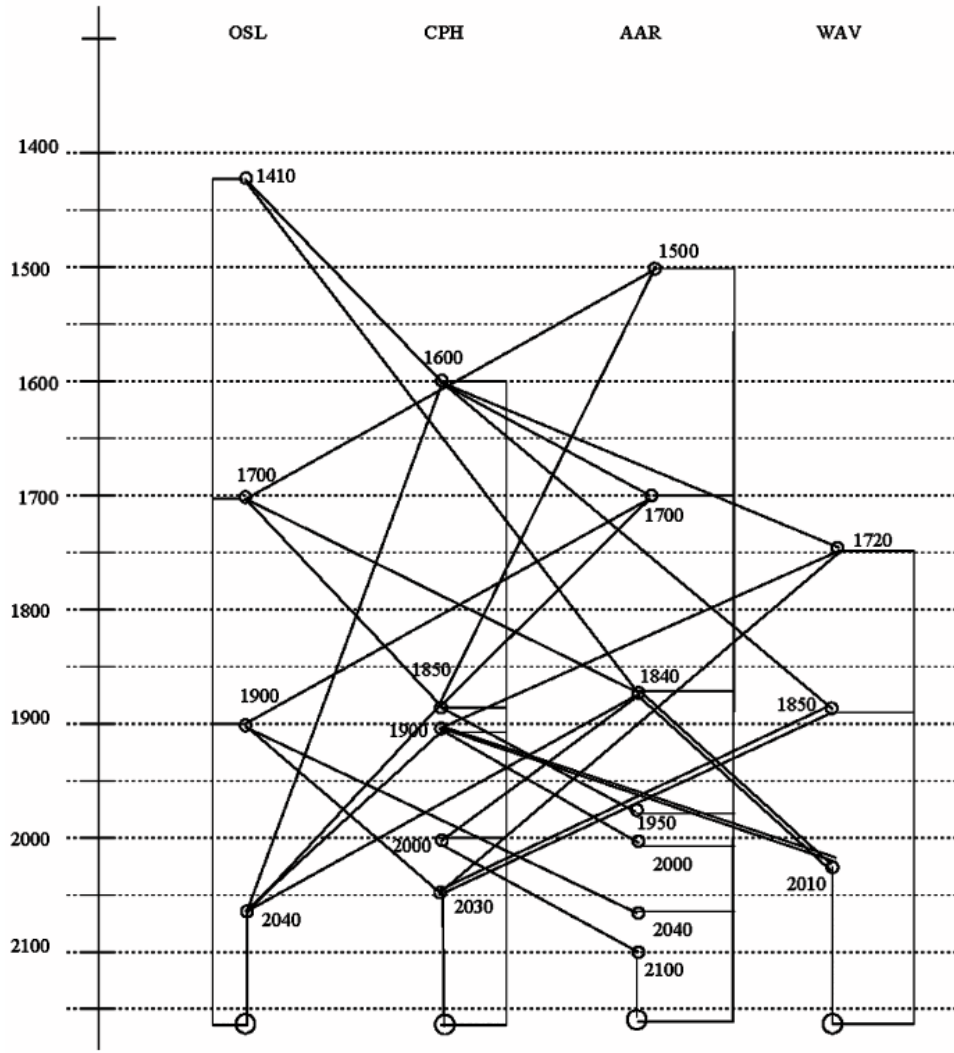
kısıtlara mutlaka riayet edilir (Clausen ve diğerleri, 2010). Şekil 3.2’de örnek bir zaman çizelgesi yer almaktadır.



Şekil 3.2. Zaman çizelgesi şebekesine bir örnek (Clausen ve diğerleri, 2010)

3.2.3. Zaman aralığı şebekesi

Argüello (1997) tarafından geliştirilen zaman aralığı şebekesinde arklar ve düğümler planlama ufku boyunca dinamik bir şekilde üretilir. Zaman çizelgesi şebekesinden farklı olarak daha önceden belirlenen bir zaman aralığı (genelde 30 dakika) söz konusudur. Zaman aralığı şebekesinde bu aralık içindeki ve aynı havaalanındaki tüm olaylar tek bir düğüm ile gösterilir. Böylece problem boyutunun önemli ölçüde düşürülmesi hedeflenmektedir. Buna ödünleşik olarak, bu şebekenin kullanıldığı problemlerde optimal çözümler elde edilmiş olsa bile –bazı olaylar şebekede tam zamanında gösterilmediği için– bu çözümlerin gerçek sistemde optimal olduğunu garanti etmek güçtür. Yine de, problem boyutunun düşürülmesindeki önemli avantajından ötürü, bu şebekeler de HYÇP literatüründe yer edinebilmiştir. Şekil 3.3, zaman aralığı şebekesine bir örnek olarak verilebilir.



Şekil 3.3. Zaman aralığı şebekesine bir örnek (Clausen ve diğerleri, 2010)

3.3. Uçak Rotalama Alt Probleminin Doğal Kısıtları

Bu alt bölümde, UR alt probleminde mevcut olan doğal kısıtlar açıklanacaktır. Bu kısıtlar dört grup altında toplanmış olup bu gruplar aşağıda verilmiştir (Grönkvist, 2005):

3.3.1. Bağlantı kısıtları

Bağlantı kısıtları, bir uçuş ayağına atanan bir uçağın bu uçuş ayağını gerçekleştirdikten sonra başka bir uçuş ayağına atanabilmesi için gerekli olan temel kısıtlardır. Örneğin, bir i uçuş ayağını gerçekleştiren bir k uçağının j uçuş ayağına atanabilmesi için j uçuş ayağının kalkış havaalanının i uçuş ayağının varış havaalanı ile aynı olması gerekmektedir. Elbette j uçuş ayağının –planlanan– kalkış saatinin i uçuş ayağının –planlanan– iniş saatinden

sonra olması da gerekli temel şartlardan birisidir. Bunun dışında, bir k uçağının atandığı iki ardışık uçuş ayağının arasında belli bir sürenin olması istenmektedir. Bu süre, önceki uçuş ayağından yolcuların inmesi, bir sonraki uçuş ayağı yolcularının uçağa binmesi, aynı şekilde bagajların uçağa yüklenmesi ve uçaktan boşaltılması, aktarmalı yolcuların bir sonraki uçuş ayağının atandığı kapıya gitmesi gibi süreleri kapsamaktadır. Havaalanlarına ve uçak tiplerine göre değişebilen bu süreye *boş zaman* (turn-around time) denilmektedir. Dolayısı ile bir k uçağının atandığı iki ardışık uçuş ayağının arasında *boş zaman* bulunması da bir diğer temel kısıttır.

3.3.2. Bakım kısıtları

Uluslararası uçuş kurallarına göre uçakların tipleri, gerçekleştirdikleri uçuşların süreleri, uçuş sıklıkları, vb kriterler göz önünde bulundurularak düzenli olarak bazı bakımlardan geçmeleri yasal gerekliliktir. Uçaklara uygulanmak üzere, Federal Aviation Administration (FAA) tarafından havayolu firmalarına zorunlu kılınan çeşitli bakım türleri vardır. Bu bakım türleri, süreleri, kapsamaları ve sıklıkları birbirinden farklı olan A-tipi, B-tipi, C-tipi ve D-tipi bakım olmak üzere 4 gruba ayrılmıştır (Bazargan, 2004). A-tipi bakım gözle yapılmaktadır. Bu bakım tipi, motor, kanat frenleri, vb ana sistemlerin çalışıp çalışmadığının kontrolü olup genellikle 60 saat uçuştan sonra yapılmaktadır. B-tipi bakım ise tüm hareket sistemlerinin gözle test edilmesi ve yağlanması kapsamaktadır. Bu bakım türü 300-600 saat uçuştan sonra yapılmaktadır. C- ve D-tipi bakımlar ise çok daha kapsamlı bakımlar olup her 1-4 yılda bir yapılmaktadır.

Bu bakımların gerçekleştirilmesi her havaalanında mümkün olmamaktadır çünkü her havaalanına bakım istasyonu kurulması havayolu firması açısından hayli masraflı olabilmektedir. Dolayısı ile genellikle her 3-4 günde bir herbir uçağın bakım istasyonu bulunan bir havaalanına iniş yapması istenmektedir. Bakım kısıtları, çok genel olarak bakım zamanı gelen uçakların bakım istasyonu bulunan bir havaalanına iniş yapması ve belli bir süre bu havaalanında kalması şeklinde tarif edilebilir.

3.3.3. Uçuş sınırı kısıtları

Bazı uçak tiplerinin bazı havaalanlarına inmesi ve kalkması yasak olabilmektedir. Bunun dışında, yakıt deposu büyüklüğü, uçağın havada kalma süresi gibi nedenlerle bazı uçak

tiplerinin bazı uçuş ayaklarını gerçekleştirmesi mümkün olmayabilir. Bunun dışında, havayolu firması, bazı uçaklarının gün sonunda belli havaalanlarında olmasını isteyebilir. Bu tip kısıtlar da uçuş sınırı kısıtlarını oluşturmaktadır.

3.3.4. Diğer kısıtlar

Bir UR alt probleminde, yukarıda gruplanan kısıtların haricinde başka kısıtlar da söz konusu olabilmektedir. Örneğin, bir havayolu firması her uçağının bir günde en fazla belli sayıda uçuş ayağını gerçekleştirmesine izin veriyor olabilir, veya EA alt problemine bağlı olarak ekip elemanlarının boş uçuş ile taşınmasını isteyebilir. Havayolu firmasının politikası gereği veya birtakım yaptırımlardan ötürü bunun gibi daha birçok kısıtın göz önünde bulundurulması gerekebilir.

3.4. Uçak Rotalama Alt Probleminin Matematiksel Modeli

Bu alt bölümde, Grönkvist (2005)'in modelinden esinlenilerek UR alt probleminin temel matematiksel modeli sunulmuştur. UR alt problemi için önerilen bu model(ler) büyük oranda bir günlük mümkün çözümler temelinde haftalık veya birkaç haftalık planlama ufkuna sahiptir.

3.4.1. Grönkvist (2005)'in temel modeli

Bu alt bölümde, Grönkvist (2005)'de aynı zamanda *kuyruk atama* olarak da isimlendirilen UR alt problemi için geliştirilen matematiksel model, –orijinalinden farklı olarak– bakım kısıtları dahil edilmeden tanıtılacaktır. Grönkvist (2005)'in modeli, Bölüm 3.2.1'de değinilen bağlantı şebekesi temel alınarak geliştirilmiştir. Daha sonra, bu tez çalışmasında UR alt problemi için geliştirilen temel matematiksel model sunulmuştur. Grönkvist (2005)'in modeli, aşağıda verilmektedir.

Kümeler

F: uçuş ayakları (düğümler)

K: uçaklar

P_k : k uçağına atanmış olan önceki uçuş ayakları

R_k : k uçağının gerçekleştirmesine izin verilmeyen uçuş ayakları (havaalanı, kalkış/varış zamanı, vb sebeplerle)

Parametreler

c_{ijk} : k uçağının i uçuş ayağından hemen sonra j uçuş ayağına atanmasının maliyeti

Değişkenler

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } k \text{ uçağı } i \text{ uçuş ayağından hemen sonra } j \text{ uçuş ayağına atanırsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

Matematiksel model

$$\min_{x_{ijk}: i \in F, j \in F, k \in K} \sum_{i \in F} \sum_{j \in F} \sum_{k \in K} c_{ijk} x_{ijk} \quad (3.1)$$

s.t.

$$\sum_{j \in F} x_{jik} - \sum_{j \in F} x_{ijk} = 0, \quad \forall i \in F, \quad \forall k \in K \quad (3.2)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in F} x_{ijk} = 1, \quad \forall i \in F \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in F} x_{ijk} = 1, \quad \forall i \in P_k, \quad \forall k \in K \quad (3.4)$$

$$\sum_{j \in F} x_{ijk} = 0, \quad \forall i \in R_k, \quad \forall k \in K \quad (3.5)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, \quad \forall i, j \in F, \quad \forall k \in K \quad (3.6)$$

Bağlantı şebekesi hatırlanacak olursa, yukarıda tamamı verilen matematiksel modelde düğümler uçuş ayaklarını, yönlü arklar ise bu uçuş ayaklarının birbiri ardınca gelmesini ifade etmektedir. Yani, bir i düğümü aslında i uçuş ayağını gösteriyor iken bir (i, j) arkı ise i

uçuş ayağından sonra j uçuş ayağının gerçekleştirilmesini ifade etmektedir. Grönkvist (2005)'in modeli daha detaylı açıklanacak olursa; Eş. 3.1, uçuş ayaklarına atanan uçakların toplam maliyetin enazlamasını; Eş. 3.2, herbir düğüme giren ve çıkan ark dengesini; Eş. 3.3, her düğümün yani herbir uçuş ayağının gerçekleştirilmesini; Eş. 3.4 ve Eş. 3.5, daha önce bahsedilen bağlantı kısıtları göz önünde bulundurulduğunda bir k uçağının mutlaka gerçekleştirilmesi ve kesinlikle gerçekleştirilmemesi gereken uçuş ayaklarını; Eş. 3.6, ise x_{ijk} karar değişkenini ifade etmektedir. Burada, Eş. 3.4 gereksiz olmasına rağmen matematiksel modelin daha iyi anlaşılması için bu kısıta modelde yer verilmiştir (Grönkvist, 2005).

3.4.2. Grönkvist (2005)'in nihai modeli

Yukarıda verilen modelin –bakım kısıtları dahil edilmemesine rağmen– orta ölçekli bir havayolu firmasına bile uygulandığında çözümü çok zor bir problem ile karşı karşıya kalınması kuvvetle muhtemeldir. Büyük boyutlu optimizasyon problemi sınıfına giren bu tür problemlerin çözümü için geliştirilmiş birtakım yöntemler mevcuttur. Bu yöntemlerden en çok kullanılanlar Langrange ayrıştırması (Yan ve Yang, 1996; Mak ve Boland, 2000; Andersson ve Värbrand, 2004), Dantzig-Wolfe ayrıştırması (Metrane ve diğerleri, 2010; Andersson, 2001; Andersson ve Värbrand, 2004), gezgin satıcı problemi olarak formüle etme (Clarke ve diğerleri 1997; Barnhart ve diğerleri 1998; Mak ve Boland, 2000; Mak ve Boland, 2006; Mak ve Boland, 2007), en kısa yol problemi olarak formüle etme (Cordeau ve diğerleri, 2001; Weide ve diğerleri, 2010) ve eldeki UR alt problemini küme-ayırma, küme-kaplama gibi iyi bilinen üst problemlere dönüştürme (Kabbani ve Patty, 1992; Bazargan, 2004; Grönkvist, 2005; Maher ve diğerleri, 2018) olarak sıralanabilir.

Bölüm 3.4.1'de verilen temel modelin makul şartlarda çözülebilmesi için küme-ayırma tabanlı üst problem oluşturma yaklaşımı benimsenmiştir. Aşağıda verilen üst problem genellikle büyük boyutlu bir problem olduğundan, bu problemin çözüme kavuşturulması için sütun oluşturma yöntemi kullanılmıştır.

Kümeler

F: uçuş ayakları (düğümler)

S: mümkün alt çizelgeler

Parametreler

c_s : s çizelgesinin maliyeti

$$\delta_{si} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } s \text{ çizelgesi } i \text{ uçuş ayağını içeriyorsa (kapsıyorsa)} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$$

Değişkenler

$$x_s = \begin{cases} 1, & \text{eğer } s \text{ çizelgesi çözümde yer alıyorsa} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$$

Matematiksel model

$$\min_{x_s: s \in S} \sum_{s \in S} c_s x_s \quad (3.7)$$

s.t.

$$\sum_{s \in S} \delta_{si} x_s = 1, \quad \forall i \in F \quad (3.8)$$

$$x_s \in \{0,1\}, \quad \forall s \in S \quad (3.9)$$

Burada, Eş. 3.7, toplam maliyetin enazlanmasını; Eş. 3.8, herbir uçuş ayağının kapsanmasını; Eş. 3.9 ise karar değişkeninin yapısını ifade etmektedir. Dikkat edilirse, Eş. 3.1-6 ile ifade edilen UR alt problemi, uygun çözümlerin bilgisayar ortamında üretilmesi ile Eş. 3.7 – 3.9 haline dönüştürülmüştür. Böylece, *mevcut yaygın strateji* olarak adlandırılan, Bölüm 3.6’da detaylı bir şekilde açıklanan ve büyük boyutlu optimizasyon problemi sınıfına giren birçok HYÇP alt probleminde sıklıkla kullanılan bu stratejinin, Grönkvist (2005) tarafından da uygulandığı açıkça görülmektedir.

3.4.3. Uçak rotalama alt probleminin temel matematiksel modeli

Bu alt bölümde, Grönkvist (2005)’in modeli temel alınarak oluşturulan ve UR alt probleminin temel modeli olarak sunulan matematiksel model (λ) tanıtılacaktır. Bu modelin planlama ufku bir gün olarak belirlenmiştir. Grönkvist (2005)’in modeline benzer olarak, bu model de bağlantı şebekesi temel alınarak oluşturulmuştur. Grönkvist (2005)’in modelinden en büyük farkı ise Grönkvist (2005)’in modelindeki bağlantı şebekesi bağlantı kısıtlarına

göre oluşturulurken, bu çalışmada tam bağlı bir şebekenin söz konusu olmasıdır. Bir başka deyişle, Grönkvist (2005)'in bağlantı şebekesindeki tüm arklar bağlantı kısıtlarını sağlıyor iken, önerilen bağlantı şebekesinde bağlantı kısıtlarını sağlayan ve sağlamayan tüm arklar yer almaktadır. Bağlantı kısıtları açısından uygun olmayan arkların kullanımını modelde yer alan bazı kısıtlar engellemektedir. Bu kısıtlar, Andersson ve Värbrand (2004)'ün önerdikleri modeldeki kısıtlara benzemektedir.

Bir UR alt probleminin matematiksel modelinde mutlaka bulunması gereken bağlantı kısıtları, –Andersson ve Värbrand (2004)'ün önerdikleri modelde olduğu gibi– Eş. 3.4 ve Eş. 3.5'in daha açık formüle edilmesi ile oluşturulmaya çalışılmıştır. Böylece daha büyük bir şebeke elde edilirken tez çalışmasının ana konusu belirsizliğe karşı duyarsız bir çizelge –başka bir deyişle sağlam çizelge– oluşturulması olduğundan uçuş ayaklarında meydana gelebilecek belirsiz gecikmelerin modelde açıkça ifade edilmesi sağlanmıştır. Ayrıca, Grönkvist (2005), küme-ayırma tabanlı bir üst problem tanımlamışken bu tez kapsamında küme-kaplama tabanlı bir üst problem tanımlanmıştır. Aşağıda, bu tez çalışmasında UR alt problemi için temel model olarak önerilen matematiksel model (λ) verilmektedir.

Kümeler

F: uçuş ayakları (düğümler)

K: uçaklar

Parametreler

c_{ijk} : k uçağının i uçuş ayağından hemen sonra j uçuş ayağına atanmasının maliyeti

f_i : i uçuş ayağının uçuş süresi

ta_i : i uçuş ayağı için gereken en az boş zaman (turn-around time) (dk)

dpt_i : i uçuş ayağının kalkış zamanı (tekerlerin kalkış pistinden ayrıldığı an)

art_i : i uçuş ayağının varış zamanı (tekerlerin iniş pistine değdiği an)

dpa_i : i uçuş ayağının kalkış havaalanı

ara_i : i uçuş ayağının varış havaalanı

M : çok büyük bir sayı

Değişkenler

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } k \text{ uçağı } i \text{ uçuş ayağından hemen sonra } j \text{ uçuş ayağına atanırsa} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$$

Matematiksel model

$$\lambda : \min_{x_{ijk} : i \in F, j \in F, k \in K} \sum_{i \in F} \sum_{j \in F} \sum_{k \in K} c_{ijk} x_{ijk} \quad (3.10)$$

s.t.

$$\sum_{j \in F} x_{jik} - \sum_{j \in F} x_{ijk} = 0, \forall i \in F, \forall k \in K \quad (3.11)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in F} x_{ijk} \geq 1, \forall i \in F \quad (3.12)$$

$$x_{ijk} [\text{art}_i - (\text{dpt}_j - \text{ta}_j)] \leq 0, \forall i, j \in F, \forall k \in K \quad (3.13)$$

$$x_{ijk} [\text{dpa}_j - \text{ara}_i] = 0, \forall i, j \in F, \forall k \in K \quad (3.14)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, \forall i, j \in F, \forall k \in K \quad (3.15)$$

Burada, Eş. 3.10, uçuş ayaklarına atanan uçakların toplam maliyetini; Eş. 3.11, herbir düğüme giren ve çıkan ark dengesini; Eş. 3.12, herbir uçuş ayağının (düğümün) gerçekleştirilmesini; Eş. 3.13, k uçağına i uçuş ayağından hemen sonra j uçuş ayağı atanmışsa j uçuş ayağının kalkış zamanının i uçuş ayağının varış zamanından ve j uçuş ayağı için gerekli olan boş zamandan sonra olmasını; Eş. 3.14, k uçağına i uçuş ayağından hemen sonra j uçuş ayağı atanmışsa j uçuş ayağının kalkış havaalanının i uçuş ayağının varış havaalanı ile aynı olmasını; Eş. 3.15 ise x_{ijk} karar değişkenlerinin yapısını ifade etmektedir. Burada $\text{art}_i = \text{dpt}_i + f_i$ olduğuna dikkat edilmelidir.

Ayrıca, $y_{ij} = \sum_{k \in K} x_{ijk}$ olduğu halde, aşağıda verilen Eş. 3.16'daki sistem ile Eş. 3.17'deki sistem birbirine denktir.

$$\begin{cases} \sum_{k \in K} \sum_{j \in F} x_{ijk} \geq 1, \forall i \in F \\ x_{ijk} [\text{art}_i - (\text{dpt}_j - \text{ta}_j)] \leq 0, \forall i, j \in F, \forall k \in K \\ x_{ijk} [\text{dpa}_j - \text{ara}_i] = 0, \forall i, j \in F, \forall k \in K \end{cases} \quad (3.16)$$

$$\begin{cases} \sum_{k \in K} \sum_{j \in F} x_{ijk} \geq 1, \forall i \in F \\ y_{ij} [\text{art}_i - (\text{dpt}_j - \text{ta}_j)] \leq 0, \forall i, j \in F \\ y_{ij} [\text{dpa}_j - \text{ara}_i] = 0, \forall i, j \in F \end{cases} \quad (3.17)$$

Bu durumda, $y_{ij} = \sum_{k \in K} x_{ijk}$ olduğu halde, λ 'daki Eş. 3.13 ve Eş. 3.14 sırasıyla Eş. 3.18 ve Eş. 3.19 olarak yazılabilir.

$$y_{ij} [\text{art}_i - (\text{dpt}_j - \text{ta}_j)] \leq 0, \forall i, j \in F \quad (3.18)$$

$$y_{ij} [\text{dpa}_j - \text{ara}_i] = 0, \forall i, j \in F \quad (3.19)$$

Eş. 3.18 ve Eş. 3.19 ile λ 'dan, $i * j * (k - 1)$ adet kısıt azaltılmış olmaktadır ki bu da gerçek hayat problemlerinde ciddi bir boyut indirgemesi anlamına gelmektedir.

Ayrıca, Eş. 3.18, $(\text{art}_i - (\text{dpt}_j - \text{ta}_j) - M(1 - y_{ij})) \leq 0, \forall i, j \in F$ şeklinde de yazılabilir. Bu bilgiler ışığında, bu tez çalışmasında UR alt problemi için temel model olarak önerilen matematiksel model (λ') şu şekilde de yazılabilir:

$$\lambda': \min_{x_{ijk}: i \in F, j \in F, k \in K} \sum_{i \in F} \sum_{j \in F} \sum_{k \in K} c_{ijk} x_{ijk} \quad (3.20)$$

s.t.

$$\sum_{j \in F} x_{jik} - \sum_{j \in F} x_{ijk} = 0, \forall i \in F, \forall k \in K \quad (3.21)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in F} x_{ijk} \geq 1, \forall i \in F \quad (3.22)$$

$$\text{art}_i - (\text{dpt}_j - \text{ta}_j) - M(1 - y_{ij}) \leq 0, \forall i, j \in F \quad (3.23)$$

$$y_{ij} [\text{dpa}_j - \text{ara}_i] = 0, \forall i, j \in F \quad (3.24)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, \forall i, j \in F, \forall k \in K \quad (3.25)$$

Eş. 3.20-5, bir başka deyişle λ' , bu tez çalışmasında UR alt problemi için önerilen temel modeli göstermektedir. Burada, $y_{ij} = \sum_{k \in K} x_{ijk}$ ve haliyle $y_{ij} \in \{0,1\}, \forall i, j \in F$ olduğu unutulmamalıdır.

3.5. Üst Problem Oluşturma Yaklaşımı (Mevcut Yaygın Strateji)

Büyük boyutlu optimizasyon problemlerinin çözüme kavuşturulması günümüzde genellikle oldukça zordur. Bunun için problemin boyutunu –mantıklı bir şekilde– indirgeyen yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlardan birisi de *üst problem oluşturma yaklaşımı*dır. Karmaşık kısıtlara sahip olan orijinal problem, etkili çözüm araçları geliştirilmiş ve iyi bilinen bir probleme dönüştürülerek çözüm elde edilmeye çalışılır. Bunun için öncelikle karmaşık kısıtları sağlayan tüm mümkün çözümler bilgisayar ortamında üretilir. Üretilen tüm mümkün çözümlerin oluşturduğu yeni çözüm kümesinde bu aşamaya kadar göz ardı edilmiş daha basit kısıt(lar) göz önünde bulundurularak nihai çözüm elde edilir. Bu yaklaşımın UR alt probleminde nasıl kullanıldığı aşağıda daha detaylı şekilde açıklanmıştır:

- i. *Üst problemin oluşturulması:* Bu aşamada, eldeki problem küme-kaplama (set-covering), küme-ayırma (set-partitioning), küme-paketleme (set-packing) gibi iyi bilinen problemlere dönüştürülmeye çalışılır. Üst problem adı verilen bu problemin mümkün alt çözümleri tüm uçuş ayaklarının kapsanması kısıtı haricindeki tüm kısıtları sağlamaktadır.
- ii. *Bir günlük mümkün alt çizelgelerin oluşturulması:* Bu aşamada, önerilen modelde var olan tüm kısıtların sağlandığı bir günlük mümkün alt çizelgeler oluşturulur. Daha önce de belirtildiği gibi, bu mümkün alt çizelgeler tüm uçuş ayaklarının kapsanması kısıtı haricindeki tüm kısıtları tamamen sağlamaktadır.
- iii. *Mümkün alt çizelgelerin birleştirilmesi:* Bir önceki aşamada oluşturulan mümkün alt çizelgeler bu aşamada birleştirilerek 2-3 günlük veya haftalık mümkün alt çizelgeler elde edilir.
- iv. *En iyi çizelgenin belirlenmesi:* Belki de en zor safhadır. Çünkü büyük bir havayolu firması için milyarlarca mümkün alt çözüm elde edilebilmektedir. Bu çözümler arasından optimal sonucun etkin bir şekilde bulunması günümüzde çok kolay değildir.

UR alt probleminin zorluğu da buradan kaynaklanmaktadır. Öyle ki, birçok problem için ya optimal sonuç bulunamamakta, ya da optimale yakın olduğu tahmin edilen bir sonuç ile yetinilmektedir. Bu durumda, problem boyutunun azaltılması gerekmektedir. Problem boyutunun azaltılması için baskınlık (dominance), değişken eleme (variable elimination), ve değişken birleştirme (variable aggregation) gibi boyut azaltma teknikleri geliştirilmiştir (Barnhart ve Cohn, 2004). Bunlar kuvvetli araçlar olmasına rağmen eldeki OP'nin etkin bir şekilde çözülebilmesi için genellikle yeterli olmamaktadır. Bu durumda, sütun oluşturma gibi mümkün alt çözümleri iterasyonlar boyunca azaltan bir yaklaşımın da çözüm aşamasında benimsenmesi gerekebilmektedir. Bunun yanında, yan kısıtlı en kısa yol algoritmaları gibi şebeke tabanlı yöntemler de sıklıkla uygulanmaktadır. Sezgisel ve meta-sezgisel yöntemler gibi kesin çözüm üretmeyen fakat çok daha hızlı çözüm üreten yöntemler de bir diğer popüler çözüm yaklaşımlarıdır.

Aşağıda, küme-kaplama, küme-ayırma, küme-paketleme modelleri verilmiştir. Burada F uçuş ayakları kümesini; S , mümkün alt çözümler kümesini; $\mathbf{c} \subseteq \mathbb{R}^n$, mümkün alt çözümlerin maliyetini; $\mathbf{r} \subseteq \mathbb{R}^n$, mümkün alt çözümlerin sağladığı faydayı; $\mathbf{x} \in \Pi \subseteq \mathbb{I}^n$, mümkün alt çözümleri; $a_{is} \in \mathbf{A} \subseteq \mathbb{I}^{m \times n}$, 1 değerini alıyorsa $i \in F$ uçuş ayağının $s \in S$ çizelgesinde gerçekleştirildiğini, 0 değerini alıyorsa gerçekleştirilmediğini göstermektedir.

Küme-kaplama modeli matematiksel olarak Eş. 3.26-8'de gösterilmiştir.

$$\min_{\mathbf{x}} \mathbf{c}^T \mathbf{x} \quad (3.26)$$

s.t.

$$\mathbf{Ax} \succeq \mathbf{1} \quad (3.27)$$

$$\mathbf{x} \in \{0,1\}^n \quad (3.28)$$

Küme-ayırma problemi matematiksel olarak Eş. 3.29 – 3.31'de gösterilmiştir.

$$\min_{\mathbf{x}} \mathbf{c}^T \mathbf{x} \quad (3.29)$$

s.t.

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{1} \quad (3.30)$$

$$\mathbf{x} \in \{0,1\}^n \quad (3.31)$$

Küme-paketleme problemi matematiksel olarak Eş. 3.32 - 34'te gösterilmiştir.

$$\max_{\mathbf{x}} \mathbf{r}^T \mathbf{x} \quad (3.32)$$

s.t.

$$\mathbf{A}\mathbf{x} \preceq \mathbf{1} \quad (3.33)$$

$$\mathbf{x} \in \{0,1\}^n \quad (3.34)$$

Bilindiği üzere, gerçek hayatta karşılaşılan UR alt problemi çoğunlukla büyük boyutlu OP sınıfına girmektedir. Gerçek hayatta, UR alt problemlerinde kesin çözüme ulaşılması çok güç olduğu için karar vericiler ciddi sıkıntılar yaşayabilmektedirler. Bu güçlüklerin üstesinden gelmek için birçok araştırmacı tarafından –özellikle UR, EA alt problemlerinde kullanılan– yukarıda bahsedilen yaklaşım benimsenmiştir (örnek için Bkz. Wolsey (1998); Grönkvist (2006); Weide ve diğerleri (2010); ve Dunbar ve diğerleri (2012)). Bu nedenle, bu strateji HYÇP literatüründe *mevcut yaygın strateji* olarak anılır (Gopalakrishnan ve Johnson, 2005).

3.6. Üst Problemin Çözüme Kavuşturulması

Üst problem oluşturma yaklaşımı (mevcut yaygın strateji), karar vericiyi karmaşık kısıtlardan kurtarıırken karar değişkenlerinin içerdiği kararlar genişlediğinden çok fazla sayıda karar değişkeni oluşturur. Bu aşamada, mevcut yaygın strateji ile elde edilen çok sayıdaki karar değişkeni ile nasıl başa çıkılacağı sorusu gündeme gelmektedir. Literatürde, çok sayıdaki karar değişkeni ile mücadele etmek için geliştirilmiş yöntemler mevcuttur. Bu yöntemlerden iki tanesi şöyledir (Gopalakrishnan ve Johnson, 2005):

- i. *Satır Yaklaşımı*: Mümkün alt çözüm kümesinden –genellikle– rastgele seçilen n adet mümkün alt çözümün optimal sonucu bulunur ve bu n adet alt çözüm mümkün alt çözüm kümesinden silinerek yerine bulunan optimal çözüm eklenir.
- ii. *Sütun Yaklaşımı*: Mümkün alt çözüm kümesinden n adet mümkün alt çözüm seçilir. Bu alt küme, tüm uçuş ayakları göz önünde bulundurularak optimal çözüme kavuşturulur. Elde edilen indirgenmiş maliyet (reduced cost) değerlerine göre çözümü iyileştirecek

çözüm(ler) seçilerek eldeki alt kümeye ilave edilir. Bu işlem, tüm mümkün alt çözüm kümesi için daha iyi bir sonuç elde edilemeyene kadar devam eder.

Bu yöntemlerin yanı sıra, baskınlık, değişken eleme ve değişken birleştirme gibi boyut azaltma teknikleri de mevcuttur (Barnhart ve Cohn, 2004). Bu tez kapsamında oluşturulan üst problemin çözümü için yukarıda bahsedilen satır yaklaşımından yararlanılmıştır.

3.7. Bir Optimizasyon Probleminde Belirsizliğin Başlıca Nedenleri

Klasik bir optimizasyon problemi (OP), girdi ve çıktıları kesin olarak tanımlanmış bir sistemde tüm kaynakların belirli kısıtlar altında olabilecek en iyi şekilde kullanılması sağlanarak sistemin mümkün olan en iyi çıktı düzeyine ulaştırılması problemidir. Modelleme, gerçek bir sistemin başka bir platformda mümkün olduğunca gerçeğe benzer bir şekilde ifade edilmesi iken model ise gerçek bir sistemi başka bir platformda temsil eden bir başka sistem olarak tanımlanabilir. Ancak, gerçek hayatta bir sistemin tam anlamıyla birebir modellenmesi, sistemin girdi ve çıktılarındaki belirsizlik, varsayımlar, modellemenin yapıldığı platformda ele alınamayan –örneğin matematiksel modellemede matematiksel olarak ifade edilemeyen– kısıtlar, durumlar, vb sebeplerden ötürü neredeyse imkansızdır. Bir sistem, matematiksel olarak ifade edilebilse, bir başka deyişle bir matematiksel model ile temsil edilebilse dahi, karar değişkenleri ve/veya parametrelerin belirsizliğinden ötürü gerçek sistem yine tam olarak ifade edilememektedir. Statik yapıdaki bir OP'nin matematiksel modeli oluşturulurken kullanılacak karar değişkeni ve parametrelerin belirlenmesinde karşılaşılabilecek olası belirsizliklerin sebepleri aşağıda özetlenmeye çalışılmıştır (Ben-Tal ve diğerleri, 2009; Beyer ve Sendhoff, 2007):

- i. *Sistem dizaynındaki hatalar:* Sistemi hangi parametre ve karar değişkenlerinin karakterize ettiğinin veya bunların sistemi nasıl karakterize ettiğinin tam olarak belirlenememesinden kaynaklanan hatalardır. Bu durum, matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir. Sistemin çıktı fonksiyonu $f(x)$ ile gösteriliyor olsun. Burada, sistemi karakterize eden parametre ve karar değişkenleri arasındaki ilişki tam olarak belirlenemediğinden elde edilen çıktı (y) aslında $y = \bar{f}(x')$ olacaktır.
- ii. *Tahmin hataları:* Sistemi hangi parametre ve karar değişkenlerinin karakterize ettiği bilinmesine rağmen parametreler henüz mevcut olmadığından ölçülebilir değildir ve bu

yüzden tahmin edilmek zorundadır. Tahmin hataları, sistemi karakterize eden parametrelerin hatalı tahmin edilmesinden dolayı kaynaklanan hatalardır.

- iii. *Ölçüm hataları:* Sistemi hangi parametre ve karar değişkenlerinin karakterize ettiği bilinmemektedir ve bunlar ölçülebilir. Ölçüm hataları, bu parametrelerin hatalı ölçülmesinden kaynaklanan hatalardır.
- iv. *Uygulama hataları:* Sistemi karakterize eden parametreler, karar değişkenleri ve optimal sonuç sırasıyla $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $x \in \mathbb{R}^n$ ve $x^* \in \mathbb{R}^n$ ile gösteriliyor olsun. Nominal değerler kullanılarak oluşturulan modelin çözümünden elde edilen sonuç, bir başka deyişle x^* vektörü, gerçek sisteme uygulanamıyor olabilir. Her ne kadar x^* eldeki model için optimal sonuç olsa da elde edilen sonucun gerçek sistemde uygulanabilir olmamasından kaynaklanan hatalara uygulama hataları denir.

Yukarıda bahsedilen hatalar, elde edilen parametre ve/veya karar değişkenlerin nominal değerlerin ve/veya bunlar arasındaki ilişkilerin yanlış belirlenmesine neden olmaktadır. Bu noktada, bu ilişkilerin ve/veya değerlerin belirsizlik altında ele alınması gündeme gelmektedir.

3.8. Sağlam Optimizasyon (SO) Nedir?

Bir modelin, gerçek sistemi mümkün olduğunca iyi temsil etmesi istenir. Matematiksel modellemede sistemin doğru bir şekilde ifade edilebilmesi, varsayımlar, parametre, kısıtlar, karar değişkenleri gibi problem girdi ve çıktıların kesin ve doğru bir şekilde tanımlanması ile başarılabilir. Ancak, gerçek hayatta bahsedilen bu koşul, durum ve değerlerin kesin olarak belirlenebilmesi neredeyse imkansızdır. Bu nedenle, –her ne kadar optimal sonucu garanti eden bir yöntem kullanılıyor olsa dahi– her karar verici aslında belirsizlik ortamında hareket etmektedir. SO, bu belirsizlik ortamında dahi kesin ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlayan bir karar verme yaklaşımıdır. Kısaca, SO, gerçek hayatta kesin olarak belirlenemeyen fakat bir küme şeklinde ifade edilebilen parametre ve/veya karar değişkenlerini barındıran bir matematiksel modelin tüm belirsizlik kombinasyonlarında bile uygun çözüm olabilecek bir optimal çözüme kavuşturulması anlamına gelmektedir.

SO, belirsizlik ortamında dahi tam anlamıyla güvenilir sonuçlar sunmayı amaçlar. Bu amacın başarılması, bir SO modeli (SOM)’nin tüm belirsizlik durumlarını dikkate alması ile sağlanır. Geliştirilen bir SOM için bulunan bir uygun çözüm, daha önceden bilinen hangi

belirsizlik durumu meydana gelirse gelsin modeldeki tüm kısıtların sağlanacağını garanti eder. Bir SOM'nin optimal sonucu ise tüm belirsizlik durumlarında bile bütün kısıtları sağlayacak en iyi çözümü garanti etmektedir. Böylece karar verme ortamında var olan belirsizlik ortadan kaldırılmaya çalışılır.

Aslında, SO kavramının kökleri Abraham Wald'ın 1940'lı yıllarda oyun teorisinde geliştirdiği *maximin modeline* dayanır (Bkz. Wald (1939), Wald (1945) ve Wald (1950)). SO da Wald'ın geliştirdiği maximin modeline benzer olarak belirsizlik durumunda en kötü senaryoya göre karar vermektedir. Böylece belirsizlik ortamında dahi tam anlamıyla güvenilir sonuçlar elde edilmesi amaçlanmaktadır. SO kavramına ilk defa Soyster (1973) tarafından değinilmiş, sonraki 25 yıl boyunca SO kavramı sadece birkaç çalışmada dile getirilmiştir. Bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler ve konveks OP'leri için hızlı sonuç veren iç nokta yöntemleri (interior point methods) gibi yöntemlerin sağladığı avantajlar sayesinde Ben-Tal ve Nemirovski (Ben-Tal ve Nemirovski, 1998; 1999 ve 2000), El Ghaoui (El Ghaoui ve Lebret, 1997; El Ghaoui ve diğerleri 1998) ile Vandenberghe ve Boyd (Vandenberghe ve Boyd, 1996)'un 1990'lı yılların sonunda yaptıkları çalışmalar SO'nun günümüzdeki cazibesine büyük katkı sağlamıştır. SO, optimizasyon yöntemlerindeki gelişmeler, donanım ve yazılım alanındaki ilerlemeler sayesinde asıl olarak 2000'li yıllarda ilgi çekmeye başlamıştır.

3.9. Sağlam Optimizasyonun Varsayımları

SO yaklaşımı, büyük yararlar sağlamaktadır. Bunun yanında, SO yaklaşımı elbette birtakım varsayımları da içermektedir. Bu varsayımlar, SO yaklaşımının sağladığı büyük avantajların yanı sıra SO ile elde edilen çıktıyı az da olsa zayıflatmaktadır. Yine de, kazanılan yararların yanında bu varsayımların görmezden gelinebileceği rahatlıkla söylenebilir. SO yaklaşımının barındırdığı varsayımlar şöyle özetlenebilir (Ben-Tal ve diğerleri, 2009):

- i. Bir OP'nin, daha önceden tanımlanmış fakat bilinmeyen birtakım kararların alınmasını gerektirdiğinden aslında bir karar verme problemi olduğu açıktır. Bir OP'nde, karar değişkenlerinin *belirsiz* karar değişkeni ve/veya parametreler ile ilişkisi açısından i) *burada ve şimdi*; ve ii) *bekle ve gör* olmak üzere iki farklı tip karar tanımlanabilir. *Burada ve şimdi* kararlar önceden belirlenebilir kararlardır. Bu ifade, karar değişkenlerinin *belirsiz* karar değişkeni ve/veya parametrelerden bağımsız değer aldığı

anlamına gelmektedir. *Bekle ve gör* kararlarında ise, bazı karar değişkenlerinin belirlenebilmesi için bazı *belirsiz* karar değişkeni ve/veya parametrelerin kesin olarak bilinmesine ihtiyaç vardır. Bir başka deyişle, *bekle ve gör* yapısına sahip karar değişkenleri modeldeki *belirsiz* karar değişkeni ve/veya parametrelerin bir fonksiyonudur. Bir SOM’nde yer alan tüm karar değişkenlerinin *burada ve şimdi* kararlar olduğu varsayılmaktadır.

- ii. Belirsiz verilerin gerçek değeri, bir başka deyişle kesin olarak bilinmeyen tüm karar değişkenleri ve parametrelerin gerçekte aldığı değer, daha önceden tanımlanmış olan bir belirsizlik kümesi (Θ)’nin elemanı olmak zorundadır.
- iii. Bir SOM’nde tüm kısıtların sağlanması zorunludur.

3.10. Sağlam Optimizasyonun Matematiksel Gösterimi

Bu alt bölümde, SO’nun matematiksel gösterimi, Ben-Tal ve diğerlerinin (2009) çalışması temel alınarak verilmiştir. Bir doğrusal OP (DOP)’nde $\mathbf{x}$, karar değişkenlerini; $\mathbf{c}$ ve $\mathbf{d}$, amaç fonksiyonu parametrelerini; $\mathbf{A}$, kısıtların parametrelerini; $\mathbf{b}$, kısıtların sağ taraf değerlerini; Π ise uygun çözüm kümesini ifade ediyor olsun. Böylece, bir DOP Eş. 3.35’teki gibi genelleştirilebilir:

$$\min_{\mathbf{x}} \{\mathbf{c}^T \mathbf{x} + \mathbf{d} \mid \mathbf{A}\mathbf{x} \leq \mathbf{b}, \mathbf{x} \in \Pi\} \quad (3.35)$$

Bir DOP’nde küme olarak belirlenmiş belirsiz veri(ler) mevcut ise, bu problem DOP_{Ω} şeklinde gösterilen bir belirsiz DOP (BDOP)’ne dönüşmektedir. Bir BDOP, aslında, Eş. 3.35’teki OP’lerinin bir koleksiyonu olarak ifade edilebilir:

$$\min_{\mathbf{x}} \{\mathbf{c}^T \mathbf{x} + \mathbf{d} \mid \mathbf{A}\mathbf{x} \leq \mathbf{b}, \mathbf{x} \in \Pi\}_{(\mathbf{c}, \mathbf{A}, \mathbf{b}, \mathbf{d}) \in \Theta} \quad (3.36)$$

Burada, Ω , belirsizlik kümesini ifade etmektedir ve bulanık olmayan (crisp) bir kümedir. m , SOM’ndeki kısıt sayısını; n ise SOM’ndeki karar değişkeni sayısını, bir başka deyişle $\mathbf{x}$ vektörünün boyutunu gösteriyor olsun. Bu durumda, $\Theta \subseteq \mathbb{R}^{(m+1) \times (n+1)}$ olacaktır. Bir SOM’nde belirsizlik kümesi basitçe Eş. 3.37’deki gibi formüle edilebilir:

$$\Theta = \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{c}^T & d \\ \mathbf{A} & \mathbf{b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_0^T & d_0 \\ \mathbf{A}_0 & \mathbf{b}_0 \end{bmatrix} + \sum_1^L \zeta_1 \begin{bmatrix} \mathbf{c}_0^T & d_0 \\ \mathbf{A}_0 & \mathbf{b}_0 \end{bmatrix} \mid \zeta \in \Pi \subseteq \mathbb{R}^1 \right\} \quad (3.37)$$

Eş. 3.37’de Θ kümesindeki her bir eleman bir belirsizlik durumunu göstermektedir. Bir başka deyişle bu kümenin her bir elemanı belirsiz olan parametre ve/veya karar değişkenlerinin belirsiz durumlarının bir kombinasyonudur. Θ kümesi tüm belirsizlik durumlarını içermektedir ve Θ kümesindeki her bir eleman için tanımlanmış olan $\min_{\mathbf{x}} \{ \mathbf{c}^T \mathbf{x} + d \mid \mathbf{A} \mathbf{x} \leq \mathbf{b}, \mathbf{x} \in \Pi \}$ OP’nden oluşan çok sayıdaki DOP’lerinden bahsedilmektedir.

Bu noktada, bir BDOP için Eş. 3.36’da tanımlanan koleksiyonun, her belirsizlik kombinasyonu için tanımlanan farklı OP’lerinin nasıl bir araya getirileceği sorusu gündeme gelmektedir. Ben-Tal ve diğerlerine (2009) göre, bu sorunun cevabı Eş. 3.38 – 3.40 ile verilmektedir.

Eğer bir $\mathbf{x}$ çözümü, Eş. 3.38’deki şartları sağlıyorsa BDOP için bir *uygun çözüm*dür denir.

$$\mathbf{A} \mathbf{x} \leq \mathbf{b}, \forall (\mathbf{c}, \mathbf{A}, \mathbf{b}, d) \in \Theta \quad (3.38)$$

Bir $\mathbf{x}$ uygun çözümünün SOM’ndeki amaç fonksiyonu değeri, bir başka deyişle $\mathbf{x}$ uygun çözümünün *sağlam değeri* $\hat{c}(\mathbf{x})$ ile gösteriliyor olsun. $\hat{c}(\mathbf{x})$, Eş. 3.39’da, matematiksel olarak ifade edilmektedir.

$$\hat{c}(\mathbf{x}) = \sup_{(\mathbf{c}, \mathbf{A}, \mathbf{b}, d) \in \Theta} \{ \mathbf{c}^T \mathbf{x} + d \} \quad (3.39)$$

Bir DOP’nin belirsizlik altındaki hali olan BDOP’nin SO yaklaşımı kullanılarak modellenmesi ile elde edilen SOM’ne ilgili BDOP’nin *sağlam karşılığı* (SK) denir. Öyleyse, orijinal hali Eş. 3.36’da verilen belirsizlik içeren OP’nin SK Eş. 3.40’ta formüle edildiği gibidir.

$$\min_{\mathbf{x}} \left\{ \sup_{(\mathbf{c}, \mathbf{A}, \mathbf{b}, d) \in \Theta} \{ \mathbf{c}^T \mathbf{x} + d \} \mid \mathbf{A} \mathbf{x} \leq \mathbf{b}, \mathbf{x} \in \Pi, \forall (\mathbf{c}, \mathbf{A}, \mathbf{b}, d) \in \Theta \right\} \quad (3.40)$$

4. HAVAYOLU ÇİZELGELEME PROBLEMLERİNDE SAĞLAM ÇİZELGELEME

Her ne kadar özellikle 1990'lı yılların ortasından itibaren HYÇP'nin alt optimal sonuçları yerine bu problemlerin optimal sonuçlarını arama eğilimi artmış olsa da, 2020'li yıllara yaklaştığımız günümüz HYÇP literatüründe optimal sonuçların elde edilmesi halinde bile birtakım zayıflıkların devam edeceği artık anlaşılmıştır. Genellikle hiyerarşik bir yapıda çözüme kavuşturulmaya çalışılan alt problemlerin sonuçlarının kendisinden sonra çözülen – bazı– alt problemlerin girdisi olarak kullanılması, karar vericiyi zaten çoğunlukla alt optimal sonuca itmektedir. Bunun yanı sıra, orta ölçekli bir havayolu firması için bile büyük boyutlu optimizasyon problemleri sınıfına giren problemler söz konusu olabilir ve böylesine büyük bir sistemde meydana gelecek aksaklıkların etkisi de oldukça büyük olacaktır. Bu nedenle, 1990'lı yıllardan itibaren bu aksaklıkların en az maliyetle, başka bir deyişle en hızlı şekilde nasıl çözüleceği üzerinde durulmaya başlanmıştır. Bu problemler, HYÇP literatüründe *yeniden çizelgeleme problemleri (YÇP)* olarak adlandırılmaktadır. Oldukça ilgi gören bu yeni çalışma alanı, günümüzde de önemini sürdürmektedir. Bunun yanında, 1990'lı yılların son birkaç yılında başlamış olmakla birlikte özellikle 2000'li yıllarda, aksaklıklarla baş etmek yerine aksaklıklara dayanıklı planlar üretme çabası da bilim dünyasının ilgisini oldukça çekmektedir. Önü hayli açık olan bu yeni çalışma alanı, bu tez çalışmasının ana konusunu oluşturmaktadır. Bu bölümde, HYÇP'nde sağlam çizelgeleme (SÇ) genel hatlarıyla tanıtılacak olup bazı önemli detaylar sunulacak ve SÇ'nin HYÇP'ndeki muhtemel yeri tartışılacaktır.

4.1. Havayolu Çizelgeleme Problemlerinde Kaynak Tipleri

HYÇP'nde, çeşitli kaynaklar söz konusudur ve bu kaynakların *herbirinin* mümkün olan en iyi biçimde planlanması gerekmektedir. Bahsi geçen bu kaynaklar şöyle sıralanabilir:

- i. Uçak
- ii. Kabin ekibi
- iii. Uçuş ekibi
- iv. Yolcular
- v. Ekipman, teçhizat ve malzemeler
- vi. Diğerleri

Bu kaynaklar arasında hiç şüphesiz en önemli kaynak uçaklardır. Çünkü bir uçağın satın alma maliyeti, kiralama maliyeti, bakım maliyeti, bakım kısıtları, mekanik kısıtlar, uçuş maliyeti ve havayolu firmasının barındırdığı filo çeşitliliği ve kapasitesi düşünülecek olursa en kıt kaynak uçaklardır denilebilir. Bunun yanında, kabin ekibi ve uçuş ekibinin de önemi hayli yüksektir. Birçok havayolu firmasının en büyük iki değişken maliyet kaleminin yakıt giderlerinden sonra ekip giderlerinin olduğu rapor edilmiştir (Barnhart ve Cohn, 2004). Dolayısı ile kabin ve uçuş ekipleri atamasının da etkin bir şekilde yapılması oldukça önemlidir. Havayolu firması açısından bir diğer önemli kaynak da yolculardır. Aksaklıktan ötürü yolcuların maruz kaldığı zorluklar, hizmet kalitesi, yolcu haklarının korunması gibi çok kritik ve hassas konular açısından yolcuların kanaatleri ve ilgili havayolu firmasına besledikleri hisler, bu havayolu firmasını tekrar seçmeleri veya seçmemelerinde önemli bir rol oynamaktadır. Çünkü yolcuların memnuniyetsizlikleri genellikle bu tip aksaklıkların meydana gelmesi ile bir anda ortaya çıkabilmekte veya beklenmedik derecede artabilmektedir. Yolcuların aynı havayolu şirketinin müşterisi olarak kalmalarını sağlamanın önemi göz önünde bulundurulduğunda yolcuların da havayolu firması açısından büyük önemi olan bir diğer kaynak olduğu görülecektir.

4.2. Havayolu Çizelgeleme Probleminde Kullanılan Harekat Tarzları

Bir HYÇP’nde uçuş ayakları bazında uygulanması muhtemel olan hareket tarzları şunlardır:

- i. Uçuş: İlgili uçuş ayağının fiili olarak gerçekleştirilmesidir.
- ii. Erteleme: Uçuş ayağının kalkış saatinin planlama ufku dahilinde daha sonraki bir zamana ertelenmesidir.
- iii. İkili yer değiştirme: Daha önceden ataması yapılan herhangi iki uçuş ayağının ilgili kaynağının (uçaklarının/ekiplerinin, vb) yer değiştirmesidir.
- iv. Uçuş ayağını iptal etme: Daha önceden planlanan bir uçuş ayağının iptal edilerek gerçekleşmemesi durumudur.
- v. Uçuş yön değiştirme: İlgili uçuş ayağına atanan kaynağın planlanan havaalanından kalkış yaparak planlanan havaalanından farklı bir havaalanına iniş yapmasıdır.
- vi. Uçuş ayağı atlama: İlgili uçuş ayağına atanan bir kaynağın planlanan havaalanından kalkış yaparak planlanan havaalanına iniş yapmayarak çizelgedeki bir sonraki uçuş ayağını gerçekleştirip ilgili havaalanına iniş yapmasıdır.

- vii. Boş uçuş: Orijinal çizelgede herhangi bir uçuş ayağına atanmamış olan, ancak havayolu şirketinin filosunda bulunan bir uçağın YÇP'nin çözümü veya başka bir sebep için başka bir yerdeki uçuş ayağını gerçekleştirmek üzere bulunduğu yerden bu yere boş olarak uçurulması işlemidir.
- viii. Ekip elemanlarının başka bir yere taşınması: Ekip elemanlarının bulunduğu yerden başka bir yere yolcu gibi taşınmasıdır. Bu durum, ekip elemanları taşımadan önce konaklamak zorundaysa ekibin konaklama masrafları, ekibin taşınacağı koltukların yolcuya satılmaması gibi nedenlerden ötürü havayolu firması için maliyete neden olmaktadır.
- ix. Rezerve ekip kullanımı: Havayolu firmaları, her ihtimale karşı genellikle merkez(ler)de bulunan, görevlendirilmemiş bir ekip havuzu barındırırlar. Bu ekip elemanları, sadece acil durumlarda göreve çağırılırlar ve ona göre ücret alırlar.

Bir HYÇP'nin ve/veya YÇP'nin çözümünde yukarıdaki hareket tarzları kullanılarak en iyi çözüm elde edilmeye çalışılmaktadır. Boş uçuş, uçaklara has bir hareket tarzı iken ekip elemanlarının başka bir yere taşınması ekiplere mahsus bir hareket tarzıdır.

Bu tez kapsamında sadece *uçuş*, *erteleme* ve *boş uçuş* hareket tarzlarına izin verilmektedir.

4.3. Havayolu Çizelgeleme Probleminde Aksaklıkların Nedenleri

HYÇP'nin çözümü olarak elde edilen bir çizelgenin büyük bir dikkat, çaba ve gayret sarf edilerek hazırlandığı bilinmektedir. Yine de, birtakım aksaklıkların meydana gelmesi kaçınılmazdır. Çünkü sistemde hava durumu, havaalanında meydana gelebilecek beklenmedik durumlar gibi tahmin edilmesi neredeyse imkansız olan birçok iç ve dış etken mevcuttur. Aşağıda, bir uçuş çizelgesini aksatması muhtemel başlıca sebepler sıralanmıştır:

- i. Uçak arızaları
- ii. Ekip eleman(lar)ının göreve gelmemesi
- iii. Hava şartları
- iv. Yoğun hava/yer trafiği
- v. Uçuş için gerekli olan ekipman, teçhizat ve/veya malzeme yokluğu veya yetersizliği
- vi. Havaalanı kapasite kısıtları

4.4. Yeniden Çizelgeleme (YÇ)

Bir havayolu firmasında tüm planların bir arada olduğu bir modelin optimal çözümü tasavvur edilse dahi bu çözüm pratikte uygun çözüm olma özelliğini yitirebilecektir. Bunun sebebi, gerçek hayatta belirsizlik altında hareket edilirken geliştirilen modelde parametrelerin –ve hatta– karar değişkenlerinin kesin değerler olduğunun varsayılmasıdır. Bölüm 4.3’te bahsedilen sebeplerden herhangi biri bir uçuş ayağının zamanında gerçekleştirilememesine veya iptal edilmesine sebep olabilmektedir. Hatta bu sorundan ötürü başka uçuş ayaklarının da gecikmesi, iptal edilmesi, vb gibi aksaklıkların meydana gelmesi mümkündür. Bir uçuş ayağında meydana gelen aksaklığın çizelge ilerledikçe diğer uçuş ayaklarına olan etkisinin giderek büyümesine *çığ etkisi* denilmektedir. Etkinin giderek büyümesi beklenen bir durumdur, çünkü birbirinden bağımsız olduğu varsayılan kaynaklar aslında birbirleri ile etkileşim halinde olduğundan alt problemler de birbirinden bağımsız değildir. Örneğin, saat 16:00’da kalkış yapması planlanan ve 1 saat uçuş süresi olan XY1000 uçuş ayağını gerçekleştirecek uçağın, kokpit ekibinin, kabin ekibinin ve –varsa– bu uçuş ayağındaki aktarmalı yolcularının saat 17:00’de varış havaalanında olması bekleniyor olsun. Eldeki planlara göre, bu havaalanından, kokpit ekibi saat 17:30’daki XY2000 uçuş ayağını, kabin ekibi saat 17:30’daki XY3000 uçuş ayağını, uçak ise saat 17:30’daki XY4000 uçuş ayağını gerçekleştirecek olsun ve aktarmalı yolcunun da saat 17:30’daki XY5000 uçuş ayağı ile ikinci uçuşunu gerçekleştireceği varsayılın. İki ardışık uçuş ayağının arasında bulunması gereken boş zamanın 30 dk olduğu varsayıldığında, 1 saat geciken XY1000 uçuş ayağının saat 17:00 yerine 18:00’de varış havaalanında olması ile, 30 dk’lık boş zaman da düşünüldüğünde XY2000, XY3000, XY4000 ve XY5000 uçuş ayaklarının da birer saat gecikeceği açıktır. Bir başka deyişle, geciken XY1000 uçuş ayağındaki tüm kaynaklar gecikmektedir ve bu nedenden ötürü bu kaynakların atandıkları bir sonraki uçuş ayakları da gecikmiştir. Saat 18:00’e kadar, bir başka ifadeyle 1 saat geciken XY1000 uçuş ayağının uçağı varış havaalanına inene kadar geciken kaynakların yerine yeni atamalar yapılmaz ise geciken her bir kaynak atandığı bir sonraki uçuş ayağını da geciktireceğinden bu uçuş ayağındaki tüm kaynaklar da gecikecektir ve sadece bir XY1000 uçuş ayağının 1 saatlik gecikmesi, havayolu firmasına onlarca saatlik gecikmeye mal olabilecektir.

Yeniden çizelgeleme (YÇ), kısaca, bir havayolu firmasının operasyonel planlarında meydana gelen aksaklıkların giderilmesi olarak tanımlanabilir. YÇP ise bu aksaklıkların giderilmesi

problemidir. Herhangi bir nedenden ötürü eldeki plan(lar)da bir aksaklık meydana geldiğinde, havayolu firması öncelikle uçaklarla ilgili olumsuzluğu gidermeye çalışır. Daha sonra, ekiplerin kalkış ve varış zamanları ve/veya uçak tipleri değişen uçuş ayaklarına kısıtları sağlayacak şekilde yeniden atanması sağlanır. Uçak, kabin ekibi ve uçuş ekibi kaynakları için uygun bir çözüm elde edildikten sonra yolcularla ilgili problem ele alınır. Son olarak, gerekiyorsa uçuş için önemli olan ekipman, teçhizat ve malzemeler de tekrar planlanarak YÇP çözülmüş olur. YÇP ile ilgili çalışmalara Kohl ve diğerleri (2007), Clausen ve diğerleri (2010), Bazargan (2004: 140-56) ve Yu (1998: 1-44)'nın çalışmaları örnek olarak verilebilir.

Meydana gelen bir aksaklık genelde birden fazla alt problemi etkilemektedir. Örneğin bir uçuş ayağının uçak arızasından ötürü gecikmesi, ilgili uçağa atanan bir sonraki uçuş ayağının, ilgili uçağa atanan kabin ve kokpit ekiplerinin ve –varsa– aktarmalı yolcuların da gecikmesine sebep olabilir. Bu nedenden ötürü, bu etkinin büyüyerek devam etmesini önlemek için meydana gelen aksaklığın en kısa zamanda giderilmesi gerekmektedir. YÇP'nin belki de en önemli zorluğu aksaklık meydana geldiğinde bunun en kısa zamanda çözülmesi zorunluluğudur.

Hızlı bir şekilde çözüme kavuşması gereken YÇP'nin optimal sonuçlarına ulaşmak oldukça zor olmaktadır. Çoğu zaman alt optimal sonuçlar ile yetinildiğinden katlanılan maliyet daha çok olmaktadır. YÇP'nin oldukça önemli olan bu olumsuz yanlarından ötürü, HYÇP literatüründe 2000'li yılların başından itibaren SÇ yaklaşımları görülmeye başlanmıştır. Bölüm 4.5-6'da, HYÇP'nde SÇ yaklaşımları detaylı bir şekilde anlatılmaktadır.

4.5. Sağlam Çizelgeleme (SÇ)

Bir önceki bölümde bahsedilen aksaklıklar ve bu aksaklıkların yarattığı çıkış etkisinden dolayı büyük ölçekteki bir havayolu firmasının katlanması gereken maliyet yılda birkaç milyar dolar olarak tahmin edilmektedir (Barnhart ve Laporte, 2007). Dolayısıyla çıkış etkisinden kaçınmak için meydana gelen bir aksaklığın mümkün olan en kısa zamanda çözülmesi gerekmektedir. Ancak, havayolu firmalarının büyük bir bölümü taktiksel ve operasyonel planlarını maliyeti enazlayacak ve/veya kaynakların kullanımını ençoklayacak şekilde hazırlamaktadır. Bu da, aylak (gevşek) değişkenlerin mümkün olduğunca enazlanması demektir. Böylece, çizelgede meydana gelmesi neredeyse kaçınılmaz olan aksaklıkların

giderilmesi çok daha güç hale gelmektedir. Bir başka deyişle, aylak değişkenler ne kadar küçük değer alırsa çıkış etkisi de o kadar büyüyecek ve buna bağlı olarak YÇP'nin çözümü bir o kadar zor ve maliyetli olacaktır. Dolayısı ile plan yapıcılar tarafından şu soru sorulmalıdır: '*bir optimal çizelge gerçekte (pratikte) ne kadar optimaldir?*' (Barnhart ve Cohn, 2004).

Bu soru ile birlikte SÇ kavramı geliştirilmiştir. Yukarıda verilen aksaklık tanımından hareketle *sağlam çizelgeleme (SÇ)*, kısaca, meydana gelebilecek aksaklıklara karşı dayanıklı çizelgeler elde edilmesi olarak tanımlanabilir. Bir başka deyişle, SÇ, kullanılan verilerdeki belirsizliğe rağmen planlama döneminde meydana gelebilecek muhtemel bozulmalara mümkün olduğunca maruz kalmayan, böylece ek maliyetlere katlanılmasına mümkün olduğunca az neden olan çizelgeler elde etmektir. *Sağlamlık* kavramı ise bozulmaya dayanıklı planlama yapılması olarak tanımlanabilir.

Beklendiği gibi, bir sağlam çizelge elde etmek, kaynak kullanımını ençoklayan veya maliyeti enazlayan bir nominal çizelge üretmekten daha yüksek maliyetli olacaktır. Ancak, daha kazançlı gibi gözüken bir nominal çizelge, bozulmalara karşı dayanıksız olacaktır ve meydana gelmesi neredeyse kaçınılmaz olan bu bozulmaların telafisi genellikle yüksek maliyetlere katlanmayı gerektirdiğinden bu durumun toplam maliyeti sağlam çizelge elde etme maliyetine kıyasla –genellikle– daha fazla olacaktır. Genel olarak, SÇ maliyetinin, nominal çizelgeleme (NÇ) maliyeti ve bozulma(lar)ın telafisi için katlanılan maliyetin toplamlarından çok daha az olduğu rahatlıkla söylenebilir. Bu tez çalışması boyunca sağlam çizelge üretme maliyeti *sağlamlık maliyeti (SM)* olarak adlandırılacaktır ve NÇ ile YÇ maliyetlerinin –beklenen– ilişkisi Eş. 4.1 ve Eş. 4.2'de matematiksel olarak ifade edilmiştir.

$$\tilde{M}_{SÇ} \geq \tilde{M}_{NÇ} \quad (4.1)$$

$$\tilde{M}_{SÇ} \leq \tilde{M}_{NÇ} + \tilde{M}_{YÇ} \quad (4.2)$$

Burada, $\tilde{M}_{SÇ}$, bir sağlam çizelge üretmenin yaklaşık maliyetini; $\tilde{M}_{NÇ}$, bir nominal çizelge üretmenin yaklaşık maliyetini; $\tilde{M}_{YÇ}$, ise nominal çizelgede meydana gelen bozulmaların telafisi için uygulanacak olan YÇ'nin yaklaşık maliyetini göstermektedir.

SÇ veya YÇ farklı şekillerde yapılabilir. Bir başka deyişle, bir sistemde sabit bir planlama ufkunda birbirinden farklı sağlam çizelgeler üretilebileceği gibi bir bozulma meydana geldiğinde YÇP de birbirinden farklı şekillerde çözüme kavuşturulabilir. Aynı zamanda bir nominal çizelgenin de farklı şekillerde hazırlanması mümkündür. Bu nedenle Eş. 4.1 ve Eş. 4.2’de yaklaşık değerler kullanılmıştır. Son olarak, sağlamlık ile maliyet arasında bir ödünleşim olduğu vurgusunu yapmakta fayda vardır.

Clausen ve diğerlerine (2010) göre bir HYÇP’nde iki tip sağlamlık bulunmaktadır: i) *absorbe edilme sağlamlığı (AES)*; ve ii) *yeniden çizelgeleme sağlamlığı (YÇS)*. *Absorbe edilme sağlamlığı*, çizelgede bazı zaman boşluklarının oluşturulması temeline dayanmaktadır. Bir başka deyişle, çizelgenin sıkıştırılmasından ziyade, bu zaman boşluklarının büyüklüğünün ve çizelgedeki en uygun yerinin, çizelge boyunca meydana gelen bozulmaları absorbe edebilecek şekilde belirlenmesi ile sağlamlık elde edilmeye çalışılmaktadır. Elbette, zaman boşluklarının nerede, hangi değeri alacağını belirlenmesi başlı başına karmaşık bir optimizasyon problemi (OP) olarak düşünülebilir. Yine de, büyük çaplı bozulmalarda absorbe edilme sağlamlığının yeterli olmayacağı düşünülmektedir. Bunun yerine, meydana gelmesi kaçınılmaz olan bozulmaları en az maliyetle giderebilen çizelgelere ihtiyaç olduğu görüşü de oldukça yaygındır. Böylece, yeniden çizelgeleme sağlamlığı kavramı ortaya çıkmaktadır. Anlaşılabileceği üzere, *yeniden çizelgeleme sağlamlığı*, bozulma(lar) meydana geldiğinde bu bozulma(lar)ı gidermek için katlanılacak –genellikle tahmini– maliyetlerin NÇ’de hesaba katılması olarak tanımlanabilir. *Nominal çizelgeleme*, hiçbir sağlamlık kaygısı güdülmeden, HYÇP’ndeki bir alt problemin çözüme kavuşturulması anlamına gelmektedir. Bir başka deyişle, YÇS, Bölüm 4.1’de bahsedilen herhangi bir kaynak için bir nominal çizelge üretilirken YÇP’nin de bu safhada göz önünde bulundurulmasıdır. Böylece, meydana gelmesi muhtemel olan herhangi bir aksaklığın giderilmesi için katlanılacak olan maliyetin de NÇ maliyetine eklenerek toplam maliyet enazlanmaya çalışılmaktadır. Buradaki en büyük sıkıntı ise hangi kaynakta hangi bozulma(lar)ın ne zaman meydana geleceği ve bu bozulmalardan ötürü uygulanacak YÇ maliyetinin ne olacağı gibi sorulara yanıt vermenin oldukça güç olmasıdır.

Buna göre SÇ, tanımı Clausen ve diğerleri (2010) tarafından verilen sağlamlığa benzer şekilde benimsediği sağlamlık türüne göre ikiye ayrılabilir: i) *absorbe edilme sağlamlığına dayalı SÇ (AESSÇ)*; ve ii) *yeniden çizelgeleme sağlamlığına dayalı SÇ (YÇSSÇ)*. Bu

durumda, AESSÇ'de AES elde edilmek suretiyle çizelge(ler) sağlamlaştırılırken YÇSSÇ'de ise çizelge(ler) YÇS bazında oluşturulmaya çalışılmaktadır.

Yine de, literatürde, sağlamlığın nasıl ölçülebileceği, hangi çizelgenin diğerinden daha sağlam olduğunun belirlenebilmesi, sağlamlığın kesin olarak sağlanıp sağlanmaması gibi SÇ ile ilgili birtakım önemli kavramsal boşluklar vardır. Nihai çizelgenin belirlenebilmesi için çizelgelerin sağlamlığının ölçülebilir hale getirilmesi şarttır. Bu nedenle, bu tez kapsamında, farklı bir bakış açısı ile *tip I sağlam çizelge* ve *tip II sağlam çizelge* olmak üzere iki farklı SÇ tanımı önerilmiştir.

4.6. HYÇP Literatüründe Sağlam Çizelgeleme Yaklaşımları

HYÇP'nde SÇ yaklaşımları ile ilgili çalışmalar 2000'li yılların başlarında görülmeye başlanmıştır. SÇ yaklaşımlarında, gerçek hayatta kaçınılmaz olan bozulmaların oluşturulacak çizelgede meydana gelmesi engellenmeye veya bunların çizelge boyunca yaratacağı olumsuz etkiler azaltılmaya çalışılmaktadır. Bu çalışmalarda, nominal çizelgeyi sağlam çizelge haline getirecek bir fikir kapsamında yeni çizelgeler önerilmiştir. Örneğin, UR alt probleminde elde edilen mümkün rotalar kısa süreli olursa meydana gelecek bozulma(lar)ın uçaklar üzerindeki etkisinin azalacağı düşünülmüştür. Mümkün rotalardaki görev süresini mümkün olduğunca küçük tutmaya çalışmak nominal çizelgeyi sağlam çizelge haline getirmek için geliştirilen fikirlerden biridir. Bu bölümde, HYÇP'nde bugüne kadar yapılmış, temel taşı sayılabilecek SÇ yaklaşımları tanıtılmıştır.

HYÇP'nde tipik olarak önce UR alt probleminin çözüme kavuşturulduğunu belirten Schaefer ve Nemhauser (2006), FA, UR ve EA alt problemlerinin çözüme kavuşturulmasından sonra bu çizelgeleri değiştirmeyecek şekilde uçuş çizelgesini revize ederek tüm çizelgeleri sağlamlaştırma fikrini benimsemişlerdir. EA alt problemi de çözüldükten sonra uçuş ayakları için planlanan sürelerin mümkün olduğunca arttırılması ile karşılaşılması neredeyse kaçınılmaz olan bozulmalara karşı dayanıklı, yani bir sağlam çizelge elde edilmesi hedeflenmiştir. Önerilen model ile son derece önemli olan EA maliyeti sabit tutularak sağlam bir çizelge elde edilmiştir. Aynı zamanda havayolu firmaları için çok önemli olan uçuş ayaklarının tam vaktinde gerçekleştirilmesi performansı da arttırılmıştır.

Rosenberger ve diğerleri (2004), sağlam FA çizelgesi elde etmek için bir yaklaşım önermişlerdir. Bu çalışmanın ana fikri, aktarma merkezlerinin bozulmalara karşı daha duyarlı olmasından ötürü sistemdeki tüm aktarma merkezlerinin mümkün olduğunca izole edilerek FA çizelgesini sağlam FA çizelgesine dönüştürmektir. Çalışmada, bir FA çizelgesinin sağlamlığının ölçülmesinde *karşılıklı bağlanabilirlik* adı verilen bir performans ölçütü tanımlanmıştır. Bir çizelgenin karşılıklı bağlanabilirliğinin ölçülebilmesi için *merkez bağlanabilirlik metriği* adında bir metrik geliştirilmiştir. Bu metrik ne kadar küçük değer alırsa merkez o kadar izole edilmiş demektir, yani çizelge o kadar sağlamdır. Yazarlar, bahsedilen sağlam çizelgenin oluşturulabilmesi için iki farklı matematiksel model önermişlerdir. Birinci modelde bir mümkün çizelgenin merkez bağlanabilirlik metriği için bir eşik değeri belirlenerek toplam FA maliyeti enazlanmaya çalışılmış iken ikinci modelde toplam FA maliyeti için bir eşik değeri belirlenerek merkezlerin izole edilme seviyesi ençoklanmaya çalışılmıştır. SIMAIR simülasyon yazılımı kullanılarak klasik FA modelinden elde edilen çözüm ile önerilen modellerden elde edilen çözümler kıyaslanmıştır. Simülasyon çalışmasının neticesinde, sağlam çizelge elde edilmesi için katlanılan ek maliyetlere rağmen uçuş ayağı iptallerinde önemli derecede azalma ve uçuş ayakların tam vaktinde gerçekleştirilmesi performansında iyileşme olduğu rapor edilmiştir.

Lan ve diğerleri (2005), bağlantılı uçuş ayaklarındaki bozulmalardan olumsuz etkilenen aktarmalı yolcuların sayısını ve toplam gecikmeyi enazlamak olarak belirledikleri iki amaç için çözüm yaklaşımları geliştirmişlerdir. Bağlantılı uçuş ayaklarındaki bozulmalardan olumsuz etkilenen aktarmalı yolcuların sayısını enazlamak için FA ve UR planlarını sabit tutarak uçuş çizelgesini yeniden düzenlemişlerdir. Bu düzenlemeyle gecikmesi gereken bazı uçuş ayakları zamanında gerçekleştirilebilmiş veya daha az geciktirilmiştir. Böylece, aktarmalı yolcuların gecikme süresinde ve bir sonraki uçuş ayağını kaçıran aktarmalı yolcu sayısında önemli iyileşmeler elde edilmiştir. İkinci amaç olan toplam gecikmenin enazlanması için ise, stokastik bir yaklaşım önerilmiştir. Burada ana fikir, zekice hazırlanmış bir UR çizelgesi ile toplam gecikmenin enazlanabileceğidir. Bunun başarılması için, aylak değişkenlerin optimal şekilde dağıtılması önerilmiştir. Yazarlar, bir çizelgede meydana gelen gecikmeleri *bağımsız gecikmeler* ve *yayılan gecikmeler* olmak üzere ikiye ayırmışlardır. Yayılan gecikmeler, bağımsız gecikmeler ve UR çizelgesinin bir fonksiyonudur. Öncelikle, her uçuş ayağı için bağımsız gecikmeler tahmin edilmiş, daha sonra her mümkün UR çizelgesinde oluşacak beklenen yayılan gecikmeler hesaplanmıştır. Bağımsız ve yayılan gecikmelerin toplamı neticesinde ilgili mümkün UR çizelgesinin

toplam beklenen gecikmesi bulunmuş, nihai olarak da toplam beklenen gecikmeyi enazlayan UR çizelgesi belirlenmiştir.

Ageeva ve Clarke (2004), farklı bir sağlamlık kriteri belirlemişlerdir. Çalışmada, UR çizelgesi mümkün olduğunca esnek hale getirilerek sağlam UR çizelgesi elde etmeye çalışılmaktadır. Geliştirilen fikir ise, bir UR çizelgesinde ne kadar çok ikili yer değiştirme hareketini yapmak mümkün olursa çizelgenin de o kadar sağlam olacağıdır. Çalışmada bir UR çizelgesinin sağlamlığını ölçmek için *fırsat indeksi* isminde bir performans ölçütü tanımlanmıştır. Geliştirilen fırsat indeksine göre önerilen sağlam çizelgenin nominal çizelgeden %35 daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir.

Ehrgott ve Ryan (2002), EA çizelgesi için bir sağlamlık yaklaşımı önermişlerdir. Bu çalışmada, EA alt probleminin bir safhası olan ekip eşleme probleminde bir ekibin bir sonraki uçuş ayağını da mümkün olduğunca aynı uçakta gerçekleştirmesi hedeflenmiştir. Böylece, UR alt problemde meydana gelecek bozulmaların EA alt problemi üzerindeki etkisi azaltılmaya çalışılmıştır. Elde edilen çizelgenin sağlamlığının ölçülmesi için geliştirilen indeks, bir ekip eğer EA çizelgesinde kendisine atanmış olan bir sonraki seferi de aynı uçakla gerçekleştiriyorsa sıfır değerini alıyorken eldeki EA çizelgesi bir sonraki uçuş ayağı için ekibin farklı bir uçağa geçmesini gerektiriyorsa meydana gelebilecek bir gecikmenin çizelge üzerindeki potansiyel bozulma etkilerini hesaplayan bir fonksiyon dahilinde değer almaktadır. Önerilen model, EA çizelgesi maliyetini %1 oranında arttırırken geliştirilen indeks değerini ise 2 kata kadar iyileştirmektedir.

Litraturde sağlam çizelge elde etmek için geliştirilen yaklaşımlardan bazıları da YÇ maliyetini hesaplamaya çalışarak modele entegre etmişlerdir. Yen ve Birge (2000) ve Schaefer ve diğerleri (2005), geliştirdikleri modellerin amaç fonksiyonuna YÇ maliyetini de dahil etmişlerdir. Yen ve Birge (2000) EA alt probleminin çözümü için stokastik bir model geliştirmişlerken Schaefer ve diğerleri (2005) ise, yine benzer olarak, ele alınan EA alt problemindeki belirsizliği beklenen maliyetlerin bulunması ile gidermeyi tercih etmişlerdir. Schaefer ve diğerleri (2005)'nin çalışmasında, mümkün uçuş çiftlerinin beklenen maliyetleri enazlanmaya çalışılmıştır. Uçuş çiftlerinin beklenen maliyetinin bulunması için iki farklı model önerilmiştir. YÇP'nin çözümünde ise ilgili ekip müsait olana kadar uçuş ayağının erteleneceği (pushback) varsayımı yapılmıştır. Önerilen modellerin performansı FTC

(flight-time-credit) ölçütü ile değerlendirilmiştir. Önerilen modeller SIMAIR kullanılarak test edilmiş ve nominal çizelgeden daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir.

EA alt problemi için geliştirilen bir başka sağlam çizelge yaklaşımı da Shebalov ve Klabjan (2002)'ın önerdikleri modeldir. Bu çalışmada, bir bozulmanın üstesinden gelebilmek için sıklıkla kullanılan ikili yer değiştirme hareketine mümkün olduğunca izin veren bir EA çizelgesi elde etmek hedeflenmiştir. Bir başka deyişle, EA çizelgesi boyunca muhtemel ikili yer değiştirme hareketi sayısı ençoklanmaya çalışılmıştır. Böylece, bir bozulma meydana geldiğinde üstesinden daha kolay gelinebileceği düşünülmüştür. Önerilen yaklaşım modellenerek çözüme kavuşturulduğunda NÇ maliyetinde gayet az bir artış ile amaç fonksiyonu değeri olan ikili yer değiştirme hareketi yapabilen ekip sayısında 5-10 kat artış elde edilmiştir. Shebalov ve Klabjan (2002)'ın benimsedikleri fikir ile Ageeva ve Clarke (2004)'ın benimsedikleri fikir aslında birbirinin aynısı olmakla beraber bu fikir ilk çalışmada EA alt problemine uyarlanmışken ikinci çalışmada UR alt problemine uyarlanmıştır.

Bölüm 4.3'te belirtilen aksaklık sebeplerinden biri olan ekip elemanlarının göreve gelmemesinden dolayı meydana gelebilecek aksaklıklara karşı dayanıklı bir çizelge elde etmeyi hedefleyen Sohoni ve diğerleri (2006), rezerve kokpit ekiplerinin optimizasyonu ile EA çizelgesini sağlam çizelge haline getirme fikrini benimsemişlerdir. Çalışmada, EA alt probleminde genellikle ekip elemanlarının planlama dönemi boyunca hazır halde bulunduğu varsayıldığından ekip elemanlarının göreve gelmemesinden dolayı meydana gelen aksaklıkların sık yaşandığı belirtilerek kokpit ekiplerinin tatil hakları ve gerçekleştirmek zorunda oldukları alıştırma uçuşları bu durumun iki temel sebebi olarak gösterilmiştir. Ekip elemanlarının göreve gelmemesinin önüne geçebilmek için gerçekleştirilemeyecek uçuş ayakları tahmin edilerek önerilen RESOPT modeline entegre edilmiştir. RESOPT modeli ile kokpit ekiplerinden ötürü gerçekleştirilemeyen uçuşların yerine getirilmesi için rezerve kokpit ekiplerinden sağlanan fayda ençoklanmaya çalışılmıştır. Önerilen modelin çözülmesi ile sağlam EA çizelgesi elde edilmiştir. Test sonuçlarına göre rezerve kokpit ekiplerinden sağlanan faydanın arttırıldığı gözlenmiştir.

Bazı uçuş ayaklarına olan talep bazı dönemlerde artış gösterebilmektedir. Müşteri memnuniyeti, pazar payı hakimiyeti gibi birtakım sebeplerden ötürü bu taleplerin karşılanabilmesi için havayolu firmaları tarafından bu uçuş ayaklarına ekstra sefer tanımlanabilmektedir. Bahsedilen talep artışı ihtimalinin planlama döneminde bilindiğini

varsayan Tekiner ve diğerleri (2009), tanımlanması muhtemel olan ekstra uçuş ayaklarını kolayca absorbe edebilen bir EA çizelgesi elde etmeyi hedeflemişlerdir. Çalışmada, ekstra uçuş ayakları tanımlansa bile erteleme veya iptal kararlarını gerektirmeyen bir EA çizelgesi üretilerek nominal çizelgenin sağlam çizelge haline getirilmesi fikri benimsenmiştir. Sağlam çizelge elde edilmesi için benimsenen hareket tarzları A ve B olmak üzere iki grupta toplanmıştır. A grubu hareket tarzlarında basit bir ikili yer değiştirme hareketi ile ekstra uçuş ayağı gerçekleştirilebilmekte iken B grubu hareket tarzlarında ise ekstra uçuş ayağı diğer görevlerini etkilememek sureti ile bir ekibe yeni bir görev olarak eklenebilmektedir. Her iki grupta da boş uçuş hareket tarzı kullanılabilir. Elde edilen sağlam çizelgeler, nominal çizelgeler ile kıyaslandığında azımsanacak derecede maliyet artışı ile çizelgede herhangi bir gecikme ve/veya erteleme kararına gerek kalmaksızın ekstra uçuşların yapılabilir hale geldiği gösterilmektedir. Böylece ekstra uçuş tanımlanması halinde katlanılması kuvvetle muhtemel olan yüksek YÇ maliyetlerinden kaçınılmış olunmaktadır. Burada, uçuş çizelgesine ekstra uçuş ayağı eklenmesinin aksaklık olarak nitelendirildiğine dikkat edilmelidir. Tanımlanan ekstra uçuş mevcut çözüm kümesini değiştireceğinden, çok büyük olasılıkla eldeki EA çizelgesini kullanılamaz duruma getireceğinden ve yeni çözüm kümesinde yeni bir optimal çözümün elde edilmesi gerekeceğinden bu durum da bir aksaklık olarak değerlendirilebilir.

Dunbar ve diğerleri (2014), Dunbar ve diğerleri (2012) de yayılan gecikmelerin maliyetini enazlayan çalışmalarını genişleterek UR ve EA alt problemlerinde yayılan gecikmeleri enazlayan stokastik tabanlı iki algoritma önermişler ve bir önceki çalışmadan daha iyi gecikmeler elde edildiğini rapor etmişlerdir.

Bruecker ve diğerleri (2015) ise, bir uçak bakım firmasının uçak bakımlarını yapan personeli için stokastik kısıtlar ile sağlam çizelge elde etmeye çalışmışlardır.

Görüldüğü gibi, gerçek hayat uygulamalarında sağlam çizelgeler ile önemli derecede iyileştirmeler elde edilebilmektedir. HYÇP’nde daha çok yeni olan SÇ yaklaşımlarının zaten büyük boyutlu olan HYÇP’nin karmaşıklığını genellikle arttırmasına rağmen vaat ettiği kayda değer iyileştirmeler ve barındırdığı büyük fırsatlar sebebiyle literatürde daha çok yer bulması beklenmektedir. Bu sebeple, HYÇP için sağlam çizelgeler üreten bir metodolojinin geliştirilmesi bu tez çalışmasının asıl hedefi olarak belirlenmiştir. Bölüm 3.7 – 3.10’da tanıtılan yaklaşımı böyle bir hedef için çok uygun bir araç olarak gözükmektedir.

Bu tez çalışmasında, SO yaklaşımının HYÇP’nde sağlam çizelge elde edilmesi için nasıl kullanılacağı gösterilmiş, önerilen metodoloji UR alt problemine uyarlanmış ve gerçek hayat verileri kullanılarak geliştirilen uygulama çalışmasında oldukça sevindirici sonuçlar elde edilmiştir.

4.7. HYÇP’nde Yeni Sağlam Çizelgeleme Tanımları

Bir önceki bölümde, 2000’li yılların başında başlayan HYÇP’nde sağlam çizelgeleme yaklaşımlarından detaylı olarak bahsedilmişti. Bu çalışmalar ile heyecan uyandıran sonuçlar elde edilebilmiştir. Yine de, sağlam çizelge iddiasında bulunan bu çalışmaların bir çoğunun aslında sağlam çizelgeyi garanti etmediği, sadece elde edilen çizelge ile sistemin daha sağlam olacağı öngörüsüne dayandığı açıkça görülebilir. Literatürde belli varsayımlar altında ve tam olarak tanımlanan bir aksaklığa karşı sağlam çizelgeyi *garanti eden* bir yaklaşım yok denecek kadar azdır. Oysa, bir sağlam çizelgenin belli varsayımlar altında sistemin belli aksaklıklardan etkilenmemesini garanti etmesi gerekmektedir.

Bir önceki bölümde bahsedilen çalışmalar hatırlanacak olursa, böyle bir yaklaşım için verilebilecek en kuvvetli, belki de tek örnek Tekiner ve diğerleri (2009) olacaktır. Daha önceden açıkça tanımlanmış olan bir veya birkaç aksaklığa karşı sağlam çizelge elde edilmesini makul bir maliyetle garanti eden bir yaklaşım, havayolu firmaları açısından elbette çok kıymetli olacaktır. Bu tez çalışmasının amacı, literatürdeki bu boşluktan hareketle daha önceden tanımlanmış bir veya birkaç aksaklığa karşı tam anlamıyla dayanıklı bir çizelge elde edilmesini sağlayacak bir metodoloji geliştirmektir.

Bu amaçla, yeni bir bakış açısı ile *tip I sağlam çizelge* ve *tip II sağlam çizelge* olmak üzere iki yeni tanım önerilmiştir. *Tip I sağlam çizelge*, meydana gelmesi muhtemel olan, daha önceden açıkça tanımlanmış aksaklık(lar)ın önüne –bazı varsayımlar altında– *kesin olarak* geçebilen bir çizelge olarak tanımlanırken; *tip II sağlam çizelge* ise, meydana gelmesi muhtemel olan, daha önceden açıkça tanımlanmış aksaklık(lar)dan ötürü oluşan YÇP’nin kabul edilebilir şartlar altında çözüme kavuşturulabildiğini *kesin olarak* garanti eden bir çizelge şeklinde tanımlanmaktadır. Böylece, HYÇP literatüründe mevcut olan sağlam bir çizelgenin aslında sağlam olup olmadığı, sağlamlığın ölçülebilmesi, vb gibi birçok boşluk bu tanımlar ile birlikte giderilmiştir.

Bu tanımlar ışığında, HYÇP için bir sağlam çizelgeleme yaklaşımı geliştirilmiştir. Bölüm 3.7 – 3.10 dikkatle incelenirse, SO yaklaşımının özellikle *tip I sağlam çizelge* için çok uygun olacağı görülebilir. Böylece, bir sonraki bölümde bu tez çalışmasında benimsenmiş olan sağlamlık kavramına çok uygun olan SO yaklaşımının HYÇP’ne nasıl uygulanabileceği araştırılmıştır. Zaten büyük boyutlu optimizasyon problemi sınıfına giren HYÇP problemlerine SO yaklaşımı uygulandığında HYÇP’nin çok daha karmaşık bir hal almaları beklenen bir sonuçtur. Çözumsuz problemlere varabilen yeni formülasyonların çözülebilir hale getirilmesi için birtakım matematiksel operasyonlar uygulanmıştır. Böylece çözülebilir hale gelen, ancak yine de genellikle büyük boyutlu optimizasyon problemi sınıfına giren eldeki problemler için uygun çözüm yöntemleri geliştirilerek sağlam çizelgeler elde edilebilmiştir. Gerçek hayat verileri üzerinde geçerliliği test edilen sağlam çizelgeleme yaklaşımı oldukça sevindirici sonuçlar vermiştir.

Özetle, yeni bir bakış açısı ile önerilen yeni tanımlar, bu tez çalışmasının literatüre önemli katkılarından biridir. Bunun yanında, bu tanımlara uygun çizelge üretebilecek metodolojinin geliştirilmesi ise bu tez çalışmasının literatüre asıl katkısı olarak değerlendirilebilir.

5. ÖNERİLEN SAĞLAM ÇİZELGELEME YAKLAŞIMININ SUR ALT PROBLEMİNE UYARLANMASI

Bölüm 4.6 – 4.7’de mevcut literatür ile ilgili yorumlar yapılmış ve sağlam çizelge kavramı için orijinal bir bakış açısı getirilerek yeni sağlam çizelge tanımları önerilmiş idi. Bu tez kapsamında önerilen sağlamlık kavramının HYÇP’ne uygulanabilirliğini test etmek için belki de en önemli kaynak olan uçaklar seçilmiştir. Bir başka deyişle, önerilen sağlamlık kavramı *sağlam uçak rotalama (SUR)* alt problemine uyarlanmıştır. *SUR alt problemi*, kısaca, her uçuş ayağının belli bir sebepten ötürü belli bir süre gecikebileceğini bilen ve buna dayanıklı olan zeki bir uçak rotalama planının oluşturulması olarak tanımlanabilir.

Bu bölümde, HYÇP için önerilen sağlamlık kavramının SUR alt problemine uyarlanması detaylandırılmaktadır. Bunun için, öncelikle ele alınan problem detaylı bir şekilde tanımlanmış, daha sonra geliştirilen matematiksel model(ler) tanıtılmıştır. Son olarak, geliştirilen matematiksel model(ler)in çözümü için benimsenen çözüm stratejisinden bahsedilmiştir.

5.1. Problemin Tanımlanması

Bu tez kapsamında, büyük bir havayolu firması ile temasa geçilmiş ve reel sektördeki mevcut durum, gerçek hayatta karşılaşılan güçlükler, vb konular hakkında yetkililerden bilgi alınmıştır. Bu görüşmelerde, gerçek hayatta çok sık karşılaşıldığı belirtilen uçak arızalarının önüne geçilmesinin öncelikle tercih edileceği yetkililer tarafından çok açık bir şekilde dile getirilmiştir. Bir aksaklığın muhtemel sebep(ler)i üzerinde durmak, bu tez kapsamında önerilen sağlam çizelge tanım(lar)ı için de çok uygundur, çünkü meydana gelen bozulmaları iyi tanımlanan aksaklıkların sebeplerine indirgemek bu aksaklıklar ile bir daha *kesin olarak* karşılaşmamak için gereklidir.

Bir HYÇP’nde, havayolu firması sadece ilgili aksaklığa maruz kalmamakta, Bölüm 4.4’te bahsedilen herhangi bir aksaklığın yol açabileceği çığ etkisi ile de baş etmek zorunda kalabilmektedir. Kaldı ki, havayolu firması yetkilileri aksaklıkların meydana getirdiği gecikmelerden ziyade bu gecikmelerden ötürü katlanmak zorunda kalınan çığ etkisinden kurtulmak istediklerini beyan etmişlerdir. Daha önceden tanımlanmış bir aksaklığın –belli varsayımlar altında– tamamen önüne geçilebildiği iddiası, aynı zamanda muhtemel çığ

etkisinin de önüne geçilebildiği anlamına geldiği için büyük önem taşımaktadır. Bir başka deyişle, *tip I sağlam çizelge* ile maruz kalınan aksaklıkla beraber –belki de daha önemlisi– çözümü çok zor olabilecek, hatta çözümsüz durumların meydana gelmesine yol açabilecek muhtemel çığ etkisi de ortadan kaldırılmış olmaktadır.

Önerilen matematiksel modelde ana fikir, gerçekleşip gerçekleşmeyeceği ve ne kadar süreceği belli olmayan uçak arızalarından kaynaklanan gecikmelerin her uçuş ayağının normal uçuş süresine eklenmesi ile bu sebepten ötürü yaşanabilecek tüm gecikme ihtimallerine karşı güvenilir bir SUR çizelgesi elde etmektir. Bu durumda, uçak arızalarından ötürü yaşanacak gecikmelerin öngörülmesi gerekmektedir.

Tahmin edileceği gibi, hangi uçuş ayağında uçak arızasının meydana geleceği ve ne kadar süreceği önceden kesin olarak bilinmemektedir. Bu durumda, eldeki SUR alt probleminin aslında belirsizlik ortamında hareket edilen bir OP olduğu açıkça anlaşılabacaktır. Bu nedenle, SUR alt probleminin klasik OP olarak modellenmesi belki de uygulanamayacak sonuçlar elde edilmesine yol açabileceğinden bu OP için belirsizlik altında karar verme yaklaşımlarından birisi uygulanmalıdır.

Varsayımları ve vaat ettiği *tutuculuk (conservatism)* özelliğinden ötürü, SO'nun, *tip I sağlam çizelge* elde edilmesi için çok kuvvetli bir araç olduğu açıktır. Bundan dolayı, bu tez çalışmasında SUR alt probleminin çözüme kavuşturulması için SO yaklaşımı benimsenmiştir. Bu sayede, belli varsayımlar altında bazı aksaklıkların önüne *kesin olarak* geçilebildiği iddia edilebilmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi bu iddia HYÇP literatürü için çok değerli bir iddiadır ve bu tez çalışmasının ana hedefini oluşturmaktadır.

Kısacası, bu tez çalışmasında ele alınan spesifik problem, uçak arızalarından kaynaklanan gecikmelerin –belli varsayımlar altında– tamamen önüne geçildiği *tip I sağlam çizelge* elde edilmesi olarak belirlenmiştir. Böylece, tez çalışmasında önerilen sağlamlık kavramının HYÇP'ne uygulanabilirliği uçak arızalarından kaynaklanan SUR alt problemi üzerinden gösterilmeye çalışılmıştır. Belirsizlik altında olan bu OP için uçuş çizelgesi, uçak arızalarından meydana gelen gecikmelerin ne zaman hangi uçuş ayağında meydana geldiği ve ne kadar sürdüğü gibi ham veriler temasa geçilen havayolu firmasından alınmış, eldeki OP'nin girdisi olarak kullanılabilecek şekilde işlenerek önerilen matematiksel modele uyarlanmıştır.

5.2. Belirsiz Veriler

SO yaklaşımı, belirsiz veri(ler) ile başa çıkmayı tutuculuk kavramı kapsamında sağladığından ötürü, eldeki SUR alt problemi için gayet etkili bir çözüm aracı olacağı düşünülmektedir. Yukarıda tanımı yapılan belirsizlik altındaki OP’nde, uçuş süreleri, yükleme, boşaltma gibi işlemler için gerekli olan boş zaman, uçak arızalarından kaynaklanan gecikmelerin süresi gibi parametreler tanımlanmıştır. Bu parametrelerin gerçek hayatta tam olarak belirlenmesi neredeyse imkansız olmakla beraber önerilen SUR modeli (SURM)’nde uçuş süreleri, boş zaman gibi parametreler ve tüm karar değişkenlerinin gerçek değerler olduğu, uçak arızalarından ötürü meydana gelen gecikmelerin süresinin ise belirsiz olduğu varsayılmıştır.

Daha önce bahsedildiği gibi, büyük ölçekli bir havayolu firması ile gerçek veri elde edilmesi için temasa geçilmiş ve yapılan temaslar sonucunda ham veri elde edilebilmiştir. Havayolu firmasının elinde bulunan mevcut sistem, internet tabanlı bir takip sistemidir ve bir aksaklık meydana geldiğinde bu aksaklığın niteliği, yaşanan gecikmenin süresi, vb detay bilgileri bir araya getirmektedir. Bu sistemde yalnızca gecikmeler kayıt altına alınırken iptal kararları depolanmamaktadır ve yaşanan tüm gecikmeler sebeplerine bağlı olarak kodlanmış olup uçak arızalarını aşağıdaki kodlar ifade etmektedir:

- i. *Kod 01:* Teknik arızalardan ötürü meydana gelen gecikmeler.
- ii. *Kod 41:* Uçaklarda meydana gelen bir arızadan dolayı yaşanan gecikmeler.
- iii. *Kod 51:* Motor(lar)a kuş girmesi, yıldırım, türbülans, aşırı yüklenme gibi etkenlerden oluşan arızalardan ötürü yaşanan gecikmelerdir.

Tüm gecikme kodları ve bu kodların aksaklığın sebebine göre gruplandırılmış listesi EK-1’de verilmiştir.

SUR alt problemi için geliştirilen ve Bölüm 5.5’te verilecek olan matematiksel modelde, belirsizlik kümesi, Θ , uçak arızalarından dolayı yaşanan gecikmelerin uçuş ayağı bazındaki en büyük ve en küçük sürelerinden oluşmaktadır. Dolayısı ile belirsizlik kümesi aralık (interval) yapısında tanımlanmış olmaktadır. Bir başka deyişle, tanımlanan belirsizlik kümesi bir polihedral kümedir ki polihedral küme en tutucu özelliğe sahip küme yapısıdır denilebilir. Böylece, nadir gerçekleşen ancak çılg etkisi ile büyük maliyetlere yol açabilen

bozulmaların bile tamamen önüne geçilmesi hedeflenmiştir. Genellikle, tutuculuk özelliği ile sağlamlık maliyeti arasında bir ödünleşim olduğundan çok tutucu veya az tutucu modeller istenmemekte, bu ödünleşimin makul ölçülerde olduğu bir tutuculuk özelliği arzu edilmektedir. Ancak havayolu firması gibi oldukça karmaşık ve yüksek maliyetli sistemlerde veya köprü, bina vb gibi insan hayatının söz konusu olduğu sistemlerde tutuculuk özelliğinin yüksek olmasının istenmesi normaldir, hatta şarttır denilebilir. Böylece, tutuculuk özelliğinin yüksek olmasından dolayı maliyet artacak, ancak elde edilen çıktı belirsizliğe karşı bir o kadar dayanıklı olacaktır.

5.3. Önerilen Modelin Varsayımları

Eldeki SUR alt problemi için SO yaklaşımının benimsendiğinden bahsedilmiştir. Dolayısı ile, geliştirilen model de bir SOM olacaktır. SURM olarak isimlendirilen bu modelin varsayımları aşağıda verilmektedir:

- i. Tanımlanmış olan tüm karar değişkenleri ‘burada ve şimdi’ cinsinden karar(lar)ı içermektedir.
- ii. Modeldeki tüm kısıtlar sağlanmak zorundadır.
- iii. Uçak arızalarından dolayı yaşanan gecikmelerin süresi, bir başka deyişle gerçekleşen gecikme değerleri, belirsizlik kümesinin bir elemanı olmak zorundadır. Bir başka deyişle, bir uçuş ayağında uçak arızalarından dolayı yaşanan gecikme, belirsizlik kümesinde o uçuş ayağında yaşanabilecek gecikmeler için tanımlanan alt ve üst sınırı aşamaz.
- iv. Eldeki uçuş çizelgesi, tek tip filo ile gerçekleştirilmektedir ve her uçak özdeş olup her uçak aynı mevcut çizelgeye eşit maliyetle atanmaktadır.
- v. Bakım (maintenance) kısıtları göz önünde bulundurulmamaktadır.
- vi. Tüm uçuş ayaklarının uçuş süreleri bilinmektedir.
- vii. Uçakların taksi süreleri bilinmektedir.
- viii. Tüm uçuş ayakları eşit önemlidir ve eşit maliyetlidir.
- ix. Sadece uçuş, erteleme ve boş uçuş hareket tarzlarına izin verilmekte olup ikili yer değiştirme, uçuş ayağının iptali, çizelgede olmayan başka bir havaalanına iniş, çizelgedeki bir sonraki havaalanına iniş gibi diğer hiçbir hareket tazına izin verilmemektedir.
- x. Bir uçak bir günde en fazla 4 uçuş yapabilmektedir.

- xi. Havayolu firması, ilgili günde uçuş ayaklarının tümünü gerçekleştirmek için gerekli olan uçakları kendi filosunda yeterli sayıda olmasa bile kiralama, vb gibi yöntemlerle her daim karşılayabilmektedir. Bir başka deyişle, eldeki uçak sayısının sınırsız olduğu kabul edilmiştir.
- xii. Boş uçuş maliyeti, fazladan bir günlüğüne kullanılan bir uçağın maliyetine göre önemsenmeyecek derecede düşüktür.

Burada, anlaşılabilirliğin artırılması için belki de son 3 maddenin daha detaylı açıklanması gerekebilir. x' uncu varsayım, literatürde de sıklıkla kullanılan bir kısıt olup, bazı ülkelerdeki yasal düzenleme gereğidir. Bu düzenleme gereği, bir uçağa bir günde en fazla 4 uçuş ayağı atanabilmektedir.

xi' inci varsayım ile, ele alınan SUR alt probleminde filodaki uçak sayısı için bir üst limit olmadığı belirtilmektedir. Gerçek verilerin alındığı havayolu firması yetkililerinden edinilen bilgiye göre ilgili günde planlanan uçuş ayaklarını gerçekleştirmek için filodaki uçak sayısı yeterli olmaz ise bir başka havayolu firmasından rahatlıkla uçak kiralanabilmektedir.

Takdir edilir ki, dışarıdan uçak kiralanması oldukça maliyetli olacaktır. Aynı zamanda, satın alma maliyeti, uçakların tümünün gün sonunda havaalanında park etmesi maliyeti, bakım maliyetleri, vergiler, vb gibi sebeplerden ötürü havayolu firmaları filolarında fazla uçak bulundurmamak istemez. Bu ödünleşim sebebiyle, havayolu firmasının filosunda bulundurması gereken uçak tiplerinin ve bu tipteki uçak sayılarının en az maliyetle belirlenmesi önemli bir problem olarak havayolu firmasının önünde durmaktadır. Bu problem, literatürde *filo planlama (FP)* olarak adlandırılmaktadır ve havayolu taşımacılığı sektörü ile ilgili yine akademik camia tarafından ilgi görmüş bir başka problemdir. Tüm bu maliyetler düşünülecek olursa, ister filoda bulunan bir uçağın ister dışarıdan kiralanmış bir uçağın bir günlük kullanımı oldukça maliyetlidir ve Bölüm 5.4 – 5.6'da UR alt problemi ve SUR alt problemi için önerilen matematiksel modellerde uçak kullanımından doğacak toplam maliyetin enazlanması amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Ancak, filodaki tüm uçakların aynı tip ve özdeş oldukları belirtilen iv' inci varsayım dikkate alındığında, belirlenen bu amaç fonksiyonu kullanılan uçak sayısının enazlanmasına indirgenebilmektedir.

x_{ii} 'inci varsayım ise, x_i 'inci varsayımda bahsedilen bir uçağın bir günlük kullanımının oldukça maliyetli olmasından hareketle, boş uçuş hareket tarzının maliyetinin bu maliyete kıyasla önemsiz kabul edildiğini belirtmektedir. Bir başka deyişle, boş uçuş gerçekleştirmek pahasına ilgili günde kullanılacak uçak sayısı azaltılabiliyorsa bu boş uçuş(lar)ın gerçekleştirilmesi gerektiği öngörülmüştür. Tam da bu nedenle, Bölüm 5.6'da verilen nihai model, literatürde sıklıkla kullanılan küme-ayırma yerine küme-kaplama tabanlı bir üst problem olarak tanımlanmıştır. Üst problemin küme-kaplama veya küme-ayırma problem tiplerinin hangisi kullanılarak belirleneceği konusunda daha detaylı açıklamalara Bölüm 5.6'da yer verilmiştir.

5.4. Önerilen Nominal Modelin Matematiksel Gösterimi

Bu alt bölümde, UR alt problemi için matematiksel model önerilmiştir. Bu tez çalışmasında, belirsizlik içermeyen bu modelden *nominal model* olarak söz edilecek ve δ_0 (ve daha sonra δ_1) ile gösterilecektir. Bu model geliştirilirken Bölüm 3.4.3'te önerilen matematiksel model temel alınmış olup aynı zamanda Bölüm 5.3'te verilen varsayımlar (*iii* hariç) da göz önünde bulundurulmuştur. Daha açık ifade edilirse, δ_0 'ın Bölüm 3.4.3'te verilen λ ve λ' 'den farkı Bölüm 5.3'te verilen x' uncu maddenin, yani Eş. 5.6'nın modele eklenmesidir. Bahsi geçen nominal model (δ_0) şöyle formüle edilebilir:

Kümeler

F: uçuş ayakları (düğüm)

K: uçaklar

Parametreler

c_{ijk} : k uçağının i uçuş ayağından hemen sonra j uçuş ayağına atanmasının maliyeti

ta_i : i uçuş ayağı için gereken en az boş zaman (turn-around time) (dk)

dpt_i : i uçuş ayağının kalkış zamanı (tekerlerin kalkış pistinden ayrıldığı an)

art_i : i uçuş ayağının varış zamanı (tekerlerin iniş pistine değdiği an)

dpa_i : i uçuş ayağının kalkış havaalanı

ara_i : i uçuş ayağının varış havaalanı

M : çok büyük bir sayı

Değişkenler

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } k \text{ uçağı } i \text{ uçuş ayağından hemen sonra } j \text{ uçuş ayağına atanırsa} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$$

Matematiksel model

$$\delta_0 : \min_{x_{ijk} : i \in F, j \in F, k \in K} \sum_{i \in F} \sum_{j \in F} \sum_{k \in K} c_{ijk} x_{ijk} \quad (5.1)$$

s.t.

$$\sum_{j \in F} x_{jik} - \sum_{j \in F} x_{ijk} = 0, \forall i \in F, \forall k \in K \quad (5.2)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in F} x_{ijk} \geq 1, \forall i \in F \quad (5.3)$$

$$art_i - (dpt_j - ta_j) - M(1 - y_{ij}) \leq 0, \forall i, j \in F \quad (5.4)$$

$$y_{ij} [dpa_j - ara_i] = 0, \forall i, j \in F \quad (5.5)$$

$$\sum_{i \in F} \sum_{j \in F} x_{ijk} \leq 4, \forall k \in K \quad (5.6)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in F, \forall k \in K \quad (5.7)$$

Burada, Eş. 5.1, uçuş ayaklarına atanan uçakların toplam maliyetini; Eş. 5.2, herbir düğüme giren ve çıkan ark dengesini; Eş. 5.3, her düğümün yani herbir uçuş ayağının gerçekleştirilmesini; Eş. 5.4, k uçağına i uçuş ayağından hemen sonra j uçuş ayağı atanmışsa j uçuş ayağının kalkış zamanının i uçuş ayağının varış zamanından ve j uçuş ayağı için gerekli olan boş zamandan sonra olmasını; Eş. 5.5, k uçağına i uçuş ayağından hemen sonra j uçuş ayağı atanmışsa j uçuş ayağının kalkış havaalanının i uçuş ayağının varış havaalanı ile aynı olmasını; Eş. 5.6, herbir uçağın günde en fazla 4 uçuş ayağına atanmasını; Eş. 5.7 ise x_{ijk} karar değişkenlerinin yapısını ifade etmektedir. Son olarak,

$$y_{ij} = \sum_{k \in K} x_{ijk} \text{ 'dir.}$$

Burada dikkate değer önemli bir nokta, y_{ij} 'nin yapısında aslında yeni bir kararı barındırmadığıdır. y_{ij} , tamamen x_{ijk} karar değişkenlerine bağlı bir fonksiyondur. Bir başka

deyişle, önerilen modelde y_{ij} değişkenleri için çözüm uzayında bir değer aranmaz, bunlar x_{ijk} karar değişkenlerine bağlı olarak bir değer alır. Bu durum, çözüm uzayında y_{ij} değişkenleri için boyut tanımlanmadığı anlamına gelir. Bu nedenle, δ_0 modelinde y_{ij} bir karar değişkeni olarak tanımlanmamıştır.

Yine dikkat edilirse, δ_0 'da normalde bulunması gereken uçak sayısı ile ilgili herhangi bir kısıt bulunmamaktadır. Bunun nedeni, Bölüm 5.3'te xi'inci maddede verilen uçak sayısında bir üst sınır olmadığı varsayımdır. Havayolu firması yetkilileri, bir başka havayolu firmasının uçaklarını kiralayarak kullanabildiklerini ifade etmişlerdir. Ancak, bir günlük bile olsa, fazladan uçak kullanımı oldukça maliyetli olmaktadır. Bunun yanında, filoda bulunan uçakların gece havaalanında park etme maliyeti, bakım maliyetleri, vergiler, vb gibi önemli derecede yüksek maliyetlerden ötürü, filoda mümkün olduğunca az sayıda uçak bulundurulmaya çalışılır. Bu sebeplerden ötürü, bir uçağın bir günlük kullanımı her hâlükârda yüksek bir maliyete sebep olacaktır. δ_0 'da da bu durum göz önünde bulundurularak, uçak kullanımının toplam maliyetinin enazlanması amaç fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Bu durum, daha sonra tanımlanacak olan UR ve SUR modellerinde de geçerlidir.

5.5. Önerilen Nominal Modelin Sağlam Karşılığı

Gerçek hayatta önceden belli olmayan gecikmeler sıklıkla meydana gelebilmektedir. Dolayısı ile, aslında belirsizlik ortamında hareket edilmektedir. Bu durumda her ne kadar δ_0 için optimal çözüm elde edilmiş olsa da elde edilen çizelgenin gerçek hayatta –tüm planlama ufku boyunca– optimal çözüm olarak kalması bir yana uygulanamama ihtimali yüksektir. Doğal olarak, gecikmelerin meydana gelmemesi, gelse bile etkisinin hissedilmemesi büyük önem taşımaktadır. Ancak, böylesine yoğun bir sistemde meydana gelen beklenmeyen gecikmelerin artan etkisi (çığ etkisi) genellikle hayli büyük olmaktadır (Bkz. Bölüm 4.4).

Bu istenmeyen durum ile başa çıkabilmenin yegane yolu çizelgeleri elde ederken bu gecikmeleri de hesaba katmaktır. Bu sebepten ötürü, δ_0 'ya gecikmelerin de dahil edilmesi gerekmektedir. δ_1 , gecikmelerin de dahil edildiği temel UR probleminin matematiksel modelini ifade etmektedir.

$$\delta_1 : \min_{x_{ijk} : i \in F, j \in F, k \in K} \sum_{i \in F} \sum_{j \in F} \sum_{k \in K} c_{ijk} x_{ijk} \quad (5.8)$$

s.t.

$$\sum_{j \in F} x_{jik} - \sum_{j \in F} x_{ijk} = 0, \forall i \in F, \forall k \in K \quad (5.9)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in F} x_{ijk} \geq 1, \forall i \in F \quad (5.10)$$

$$art_i + d_i - (dpt_j + d_j - ta_j) - M(1 - y_{ij}) \leq 0, \forall i, j \in F \quad (5.11)$$

$$y_{ij} [dpa_j - ara_i] = 0, \forall i, j \in F \quad (5.12)$$

$$\sum_{i \in F} \sum_{j \in F} x_{ijk} \leq 4, \forall k \in K \quad (5.13)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in F, \forall k \in K \quad (5.14)$$

Unutulmamalıdır ki, Bölüm 5.4'te yer alan kümeler, parametreler ve değişkenler alt başlıklarında yapılan tüm tanımlamalar hem δ_1 modelinde, hem de sonraki δ_s modellerinde aynen geçerlidir. Bunun haricinde, d_i , i uçuş ayağının geciktiği süreyi ifade etmektedir. Bu gecikmenin, Bölüm 5.2'de değinildiği gibi sadece uçak arızaları ile sınırlı olduğu unutulmamalıdır. Normal şartlar altında bu gecikmelerin olmadığı, daha açık bir ifadeyle $d_i = 0, \forall i \in F$ olduğu varsayılmaktadır. $d_i = 0, \forall i \in F$ olduğunda, δ_0 ile δ_1 'in birbirine denk olduğuna dikkat edilmelidir. Ancak gerçek hayatta $d_i = 0, \forall i \in F$ olmamaktadır ve bu parametrenin alacağı değer in önceden bilinmesi hayli güçtür. Bu yüzden, bu tez çalışmasında i uçuş ayağının uçak arızalarından dolayı yaşayabileceği gecikme, bir başka deyişle d_i , belirsiz olarak kabul edilmiştir. $d_i, \forall i \in F$ parametresindeki belirsizliği içeren SURM –bir başka deyişle δ_1 'in sağlam karşılığı (robust counterpart)– aşağıda verilmektedir:

$$\delta_s : \min_{x_{ijk} : i \in F, j \in F, k \in K} \sum_{i \in F} \sum_{j \in F} \sum_{k \in K} c_{ijk} x_{ijk} \quad (5.15)$$

s.t.

$$\sum_{j \in F} x_{jik} - \sum_{j \in F} x_{ijk} = 0, \forall i \in F, \forall k \in K \quad (5.16)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in F} x_{ijk} \geq 1, \forall i \in F \quad (5.17)$$

$$\text{art}_i + d_i + \zeta_i - (\text{dpt}_j + d_j + \zeta_j - \text{ta}_j) - M(1 - y_{ij}) \leq 0, \forall i, j \in F \quad (5.18)$$

$$y_{ij} [\text{dpa}_j - \text{ara}_i] = 0, \forall i, j \in F \quad (5.19)$$

$$\sum_{i \in F} \sum_{j \in F} x_{ijk} \leq 4, \forall k \in K \quad (5.20)$$

$$\Theta = \{\zeta \mid 0 \leq \zeta_i \leq D_i, \forall i \in F\} \quad (5.21)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in F, \forall k \in K \quad (5.22)$$

Burada, $y_{ij} = \sum_{k \in K} x_{ijk}$ olduğu ve y_{ij} 'nin ancak 0 veya 1 değerini alabileceği unutulmamalıdır. δ_s modelinde Θ belirsizlik kümesini ifade etmektedir. D_i , i uçuş ayağındaki en fazla gecikmeyi gösterirken ζ_i ise i uçuş ayağındaki gecikmenin belirsizlik bileşenidir ve 0 ile D_i arasında bir değer almaktadır. Açık ki, Θ , bir polihedraldir ve dolayısı ile konveks yapıya sahiptir. Bir havayolu firmasının karşılaştığı basit bir bozulmanın meydana getirebileceği, Bölüm 4.4'te bahsedilen çıkış etkisi yüzünden oldukça yüksek maliyetlere katlanmak zorunda kaldığı birçok araştırma tarafından rapor edilmektedir. Polihedral yapıdaki bir belirsizlik kümesi ile, hem sağlam optimizasyon yaklaşımının önemli varsayımlarından biri olan belirsizlik kümesinin konveks yapıda olması varsayımı, hem de önemli derecede maliyetlerden mümkün olduğunca kaçınılması sağlanmış olmaktadır.

Ancak, dikkat edilirse, Eş. 5.18 ile ifade edilen kısıtlar kümesi, $\Theta = \{\zeta \mid 0 \leq \zeta_i \leq D_i, \forall i \in F\}$ olduğundan sonsuz sayıda kısıt içermektedir. Bu ifadenin biraz daha açılması anlaşılabilirliği kolaylaştıracaktır. $n(F)$, F kümesinin eleman sayısını gösteriyor olsun. $\Theta = \{\zeta \mid 0 \leq \zeta_i \leq D_i, \forall i \in F\}$ kümesi incelenecek olursa her bir i uçuş ayağı için belirsiz olan ζ_i parametresinin sonsuz adet alternatifi bulunduğu görülebilir. Eş. 5.18 ile ifade edilen kısıtlar kümesinde bu durumu içeren $(n(F))^2$ adet kısıt bulunduğu ve herbirinin Θ kümesinde yer alan ζ_i parametresinin sonsuz adet alternatifi olmasından ötürü aslında sonsuz sayıda kısıta dönüştüğü düşünülürse, Eş. 5.18 ile ifade edilen kısıtlar kümesinin $(n(F))^2$ kez sonsuz sayıda kısıt içerdiği görülecektir.

Bu durum, δ_s 'yi çözümsüz (intractable) yapmaktadır. Bu şartlar altında, δ_s 'nin çözülebilir (tractable) hale getirilmesi gerekmektedir. Bu durumda, *en kötü durum formülasyonu* (worst-case reformulation) olarak adlandırılan yaklaşıma başvurulabilir (Ben-Tal ve Nemirovski, 1999; Gorissen ve diğerleri, 2015). Bu yaklaşım, belirsizlik içeren çok sayıdaki kısıtlar kümesinin, durumu en kötüleştiren kısıt ile ifade edilmesi temeline dayanmaktadır. En kötü durum formülasyonu yaklaşımının eldeki SURM'ne nasıl uyarlanacağı, aşağıdaki önerme ve bu önermeyi takip eden ispat ile daha net anlaşılabilir.

Lemma 5.5.1. $i = 1, \dots, m$ adet kısıtı olan bir sistem $x \in \mathbf{I}_+$ olan –tek boyutlu– bir değişken uzayına sahip olsun. Böyle bir sistemin $a_i x + \zeta_w \leq b_i$, $\zeta_w \in \Theta$ şeklindeki bir kısıtının en kötü durumu $\max_{\zeta_w \in \Theta} \{a_i x + \zeta_w\} \leq b_i$, daha sade haliyle $a_i x + \max_{\zeta_w \in \Theta} \{\zeta_w\} \leq b_i$ 'dir.

İspat: x' uygun (feasible) bir çözüm olmak üzere $\zeta_1 \leq \zeta_2 \in \Theta$ olsun. $a_i x + \zeta_w \leq b_i$, $\zeta_w \in \Theta$ kısıtı ζ_1 için $a_i x' + \zeta_1 - b_i \leq 0$ olacaktır. Aynı şekilde $a_i x + \zeta_w \leq b_i$, $\zeta_w \in \Theta$ kısıtı ζ_2 için $a_i x' + \zeta_2 - b_i \leq 0$ şeklinde yazılabilir. $a_i x'$ ve b_i ifadeleri her iki kısıtta da aynıdır ve mevcut iki kısıt arasındaki fark ζ_1 ve ζ_2 ifadelerinden kaynaklanacaktır. Dolayısı ile, $\zeta_1 \leq \zeta_2 \in \Theta$ olduğundan, bir x' uygun çözümü için $a_i x' + \zeta_2 - b_i \leq 0$ kısıtı sağlanıyorsa $a_i x' + \zeta_1 - b_i \leq 0$ kısıtı da kesinlikle sağlanacaktır.

δ_s 'yi çözümsüzlüğe iten kısıtlar kümesi Eş. 5.18 ile ifade edilen ve herbir (i, j) çifti için sonsuz sayıda kısıt içeren kısıtlar kümesidir. Herhangi bir (i, j) çifti için Eş. 5.18 şöyle ifade edilebilir:

$$art_i + d_i + \zeta_i - (dpt_j + d_j + \zeta_j - ta_j) - M(1 - y_{ij}) \leq 0, \quad \Theta = \{(\zeta_i, \zeta_j) \mid 0 \leq \zeta_i \leq D_i, 0 \leq \zeta_j \leq D_j\} \quad (5.23)$$

$\Theta = \{(\zeta_i, \zeta_j) \mid 0 \leq \zeta_i \leq D_i, 0 \leq \zeta_j \leq D_j\}$ olduğundan, Eş. 5.23 aslında sonsuz sayıda kısıt içeren bir kısıtlar kümesidir. Daha basit bir anlatım için, yukarıda bahsedilen en kötü durum formülasyonu yaklaşımı Eş. 5.18 yerine Eş. 5.23'e uygulanırsa, bu kısıtın en kötü durumu Eş. 5.24'teki gibi olacaktır.

$$\max_{\Theta=\{(\zeta_i, \zeta_j) \mid 0 \leq \zeta_i \leq D_i, 0 \leq \zeta_j \leq D_j\}} \left\{ \text{art}_i + d_i + \zeta_i - (\text{dpt}_j + d_j + \zeta_j - \text{ta}_j) - M(1 - y_{ij}) \right\} \leq 0 \quad (5.24)$$

Eş. 6.24'te belirsizlik bileşenleri yalnızlaştırılmaya çalışılırsa Eş. 5.26 elde edilecektir.

$$(\text{art}_i + d_i) + \max_{\Theta=\{\zeta_i \mid 0 \leq \zeta_i \leq D_i\}} \{\zeta_i\} - (\text{dpt}_j + d_j - \text{ta}_j) - \min_{\Theta=\{\zeta_j \mid 0 \leq \zeta_j \leq D_j\}} \{\zeta_j\} - M(1 - y_{ij}) \leq 0 \quad (5.25)$$

$$(\text{art}_i + d_i) - (\text{dpt}_j + d_j - \text{ta}_j) - M(1 - y_{ij}) + \max_{\Theta=\{\zeta_i \mid 0 \leq \zeta_i \leq D_i\}} \{\zeta_i\} - \min_{\Theta=\{\zeta_j \mid 0 \leq \zeta_j \leq D_j\}} \{\zeta_j\} \leq 0 \quad (5.26)$$

Burada, Eş. 5.23-6'nın birbirine denk olduğuna dikkat edilmelidir. Böylece, sonsuz sayıda kısıt içeren Eş. 5.23, en kötü durumu olan Eş. 5.26'da olduğu gibi tek bir kısıt olarak ifade edilebilmektedir. Böylece, δ_s 'yi çözümsüzlüğe iten sonsuz sayıda kısıt içeren kısıtlar kümesi (Eş. 5.18 veya Eş. 5.23) ortadan kaldırılarak her bir (i, j) çifti için birer kısıt olarak yazılabilmektedir. Bu durumda, δ_s , δ_s^* 'a dönüşmüştür. δ_s^* modeli aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\delta_s^* : \min_{x_{ijk} : i \in F, j \in F, k \in K} \sum_{i \in F} \sum_{j \in F} \sum_{k \in K} c_{ijk} x_{ijk} \quad (5.27)$$

s.t.

$$\sum_{j \in F} x_{jik} - \sum_{j \in F} x_{ijk} = 0, \forall i \in F, \forall k \in K \quad (5.28)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in F} x_{ijk} \geq 1, \forall i \in F \quad (5.29)$$

$$(\text{art}_i + d_i) - (\text{dpt}_j + d_j - \text{ta}_j) - M(1 - y_{ij}) + \max_{\Theta=\{\zeta_i \mid 0 \leq \zeta_i \leq D_i\}} \{\zeta_i\} - \min_{\Theta=\{\zeta_j \mid 0 \leq \zeta_j \leq D_j\}} \{\zeta_j\} \leq 0, \forall i, j \in F \quad (5.30)$$

$$y_{ij} [\text{dpa}_j - \text{ara}_i] = 0, \forall i, j \in F \quad (5.31)$$

$$\sum_{i \in F} \sum_{j \in F} x_{ijk} \leq 4, \forall k \in K \quad (5.32)$$

$$\Theta = \{\zeta \mid 0 \leq \zeta_i \leq D_i, \forall i \in F\} \quad (5.33)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in F, \forall k \in K \quad (5.34)$$

Burada, $y_{ij} = \sum_{k \in K} x_{ijk}$ olduğunu anımsatmakta yarar vardır. Görüldüğü gibi, sonsuz sayıda

kısıt üreten δ_s , δ_s^* ile nispeten çözülebilir (tractable) boyuta indirgenebilmiştir. δ_s , en kötü

durum formülasyonu ile de çözülebilir boyuta indirgenemeseydi, *daha az mücadelecı yaklaşım (adversarial approach)* olarak adlandırılan yaklaşım uygulanabilirdi. Bu yaklaşım ile, en kötü durum formülasyonu ile çözülebilir boyuta indirgenemeyen bir SOM'nin tutuculuk özelliğinden fedakarlık edilerek SOM çözülebilir boyuta indirgenmektedir. Hatırlanacağı üzere, yüksek tutuculuk özelliğinin HYÇP için öneminden daha önce bahsedilmiş idi.

Ancak δ_s^* genellikle büyük boyutlu optimizasyon problemi (large-scale optimisation problem) sınıfına girmektedir ve bu tür problemlerin optimal çözümünün elde edilmesi hâlâ çok zordur. Bu durumda, UR alt problemleri için uygulanan, Bölüm 3.5'te detayları verilen mevcut yaygın strateji önerilen δ_s^* 'a uygulanabilir. Önerilen SURM (δ_s^*)'nin çözümü ile, UR alt problemlerinde *daha önce garanti edilemeyen sağlamlık garanti edilmiş* olunacaktır. Garanti altına alınmış olan bu sağlamlık, bu tezin literatüre en önemli katkısı olarak nitelendirilebilir. Bununla beraber, bu katkının uygulamadaki yansımalarının da oldukça kayda değer olacağı öngörülmektedir.

5.6. Önerilen Nihai Model

Eldeki SURM'nin çözümü için Bölüm 3.5'te bahsedilen ve literatürde de sıklıkla kullanılan *mevcut yaygın strateji* kullanılmıştır. Daha açık bir ifade ile, δ_s^* modelindeki tüm uçuş ayaklarının gerçekleştirilmesi kısıtı haricindeki tüm kısıtları sağlayan bütün mümkün alt çözümler bilgisayar ortamında üretilip bu çözümlerin herbiri *mümkün alt çizelge* olarak adlandırılmıştır. Bahsedilen her mümkün alt çizelgeye bir uçak atanabilmektedir. Bu durumda, geriye sadece tüm uçuş ayaklarının gerçekleştirilmesi kısıtı kalmıştır. Bu bölümde tanımlanan ξ üst problemi bu strateji kullanılarak tasarlanmıştır. Böylece, δ_s^* olarak tanımlanan SURM, ξ haline dönüşmüştür. ξ ile ifade edilen –SURM için– üst problem şöyle olacaktır:

$$\xi: \min_{x_s: s \in S} \sum_{s \in S} x_s \quad (5.35)$$

s.t.

$$\sum_{s \in S} a_{is} x_s \geq 1, \forall i \in F \quad (5.36)$$

Burada, $i \in F$ uçuş ayaklarını; $x_s \in \Pi$ ise mümkün alt çizelgeleri göstermektedir.

Bir mümkün alt çizelgenin maliyeti, ilgili alt çizelgede yer alan uçuş ayağı sayısı, ilgili alt çizelgenin toplam uçuş süresi, ilgili alt çizelge gereği ilgili kaynağın merkezden uzak kalma zamanı vb gibi kriterler ile belirlenmektedir. Bir uçağın bir günlük kullanımının bile her hâlükârda oldukça maliyetli olduğu düşünülecek olursa, uçuş süresi, vb gibi farklardan ötürü kaynaklanan maliyetlerin bu maliyete kıyasla önemsizmeyecek kadar küçük olduğu yorumu yapılabilir. Zira, bu tez kapsamında nispeten küçük olan bu maliyetler göz önünde bulundurulmamıştır. Hatırlanacağı üzere, SURM’nde uçuş ayaklarını gerçekleştirecek uçak kullanımından dolayı katlanılacak toplam maliyetin enazlanması amaç fonksiyonu olarak belirlenmiş idi. Bölüm 5.3’te verilen iv’üncü varsayımda belirtildiği üzere, bu tez kapsamında ele alınan gerçek hayat probleminde tüm filo tek tip uçaktan oluşmaktadır ve uçakların tümü özdeştir. Böylece, belirlenen amaç fonksiyonu çizelgeyi gerçekleştirecek uçak sayısının enazlanmasına indirgenebilmiştir. Bir başka deyişle, ele alınan SUR alt problemi için

$$\min_{x_{ijk} : i \in F, j \in F, k \in K} \sum_{i \in F} \sum_{j \in F} \sum_{k \in K} c_{ijk} x_{ijk} \quad \text{olarak belirlenen amaç fonksiyonu}$$

$$\min_{x_{ijk} : i \in F, j \in F, k \in K} \sum_{i \in F} \sum_{j \in F} \sum_{k \in K} x_{ijk} \quad \text{ile denktir.}$$

Dikkat edilirse, literatürde genellikle küme-ayırma tabanlı bir üst problem belirleme yaklaşımı kullanılırken burada üst problem küme-kaplama problemidir. Bölüm 5.3’te verilen varsayımlar hatırlanacak olursa, boş uçuş hareket tarzının maliyetinin fazladan uçak kullanımının maliyetine göre önemsizmeyecek derecede az olduğu kabul edilmiştir. Bu durumda, küme-kaplama üst probleminin getirebileceği boş uçuşlara karşılık, daha iyi bir amaç fonksiyonu değeri, bir başka deyişle daha az sayıda uçak kullanımı hedeflenmektedir. Küme-kaplama tabanlı bir üst problemin, küme-ayırma tabanlı bir üst problemden daha iyi sonuç vereceği aşağıdaki örnekle daha iyi izah edilebilir. $\min_{\mathbf{x}} \{ \mathbf{c}^T \mathbf{x} : \mathbf{A} \mathbf{x} \succ \mathbf{b} \}$ yapısındaki bir problemin uygun çözüm alanı F_1 olsun. Aynı problem $\min_{\mathbf{x}} \{ \mathbf{c}^T \mathbf{x} : \mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{b} \}$ şeklinde formüle edildiğinde ise uygun çözüm alanı F_2 olsun. $F_2 \subseteq F_1$ olduğundan $\min_{\mathbf{x}} \{ \mathbf{c}^T \mathbf{x} : \mathbf{A} \mathbf{x} \succ \mathbf{b} \}$ probleminin sonucunun, en az $\min_{\mathbf{x}} \{ \mathbf{c}^T \mathbf{x} : \mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{b} \}$ problemin sonucu kadar iyi olacağı açıktır. Bu tez çalışmasında, kıyaslandığında önemsiz derecede az olduğu varsayılan maliyetlere katlanılarak amaç fonksiyonu değerindeki bu iyileştirmeyi yakalamak adına küme-ayırma yerine küme-kaplama tabanlı bir üst problem tanımlanmıştır. Bu

nedenle, Eş. 5.29 ile gösterilen tüm uçuş ayaklarının kapsanması kısıtı $\sum_{k \in K} \sum_{j \in F} x_{ijk} = 1, \forall i \in F$

yerine $\sum_{k \in K} \sum_{j \in F} x_{ijk} \geq 1, \forall i \in F$ olarak formüle edilmiştir.

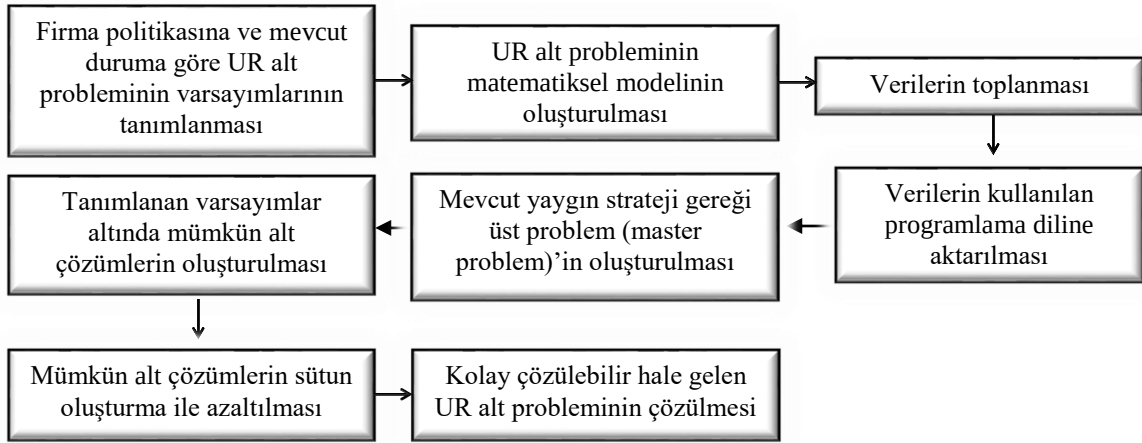
5.7. Önerilen Nihai Modelin Çözümü

ξ olarak tanımlanan üst problemde tanımlanan mümkün alt çözümler kümesi genellikle çok sayıda eleman içermektedir. Büyük ölçekli bir havayolu firması için bu sayı birkaç milyara varabilmektedir (Gopalakrishnan ve Johnson, 2005). Bu durum, ξ modelinin çözümünü hayli zorlaştırmaktadır. Şu halde, ξ üst probleminin çözüme kavuşturulabilmesi için üretilen mümkün alt çözüm sayısını azaltmak büyük önem arz etmektedir. Literatürde hem UR, hem de EA alt problemleri için mümkün alt çözüm sayısını azaltmada sıklıkla kullanılan iki yaklaşım (Gopalakrishnan ve Johnson, 2005) tekrar edilecek olursa:

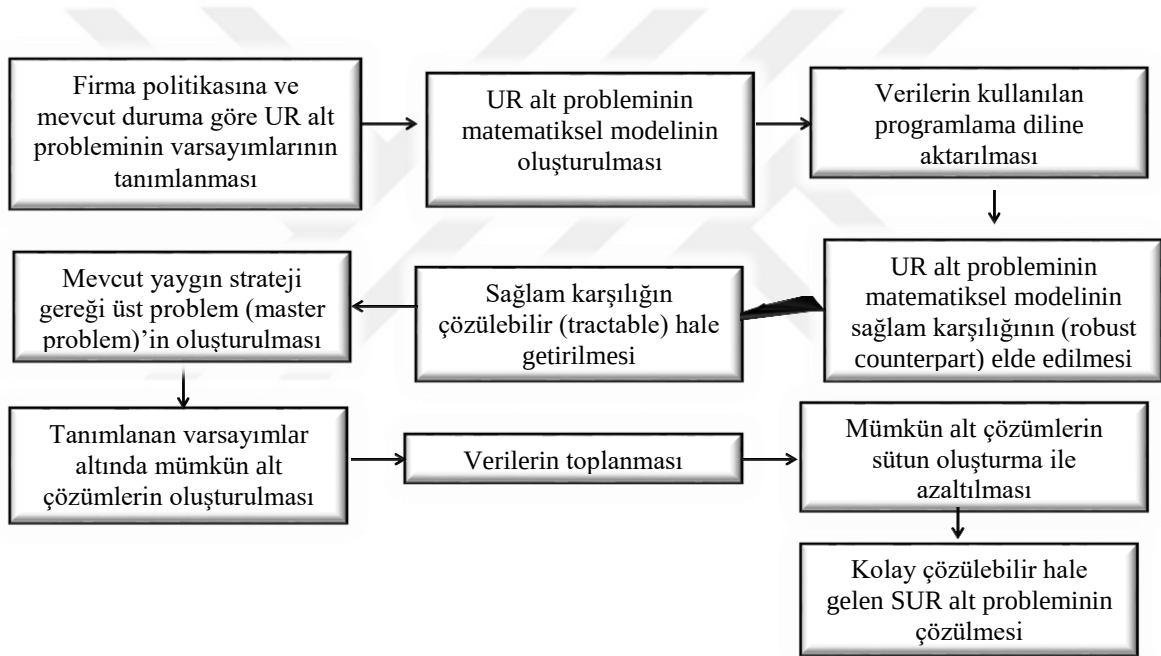
- i. *Satır Yaklaşımı*: Mümkün alt çözüm kümesinden –genellikle– rastgele seçilen n adet mümkün alt çözümün optimal sonucu bulunur ve bu n adet alt çözüm mümkün alt çözüm kümesinden silinerek yerine bulunan optimal çözüm eklenir.
- ii. *Sütun Yaklaşımı*: Mümkün alt çözüm kümesinden n adet mümkün alt çözüm seçilir. Bu alt küme, tüm uçuş ayakları göz önünde bulundurularak optimal çözüme kavuşturulur. Elde edilen indirgenmiş maliyet (reduced cost) değerlerine göre çözümü iyileştirecek çözüm(ler) seçilerek eldeki alt kümeye ilave edilir. Bu işlem, tüm mümkün alt çözüm kümesi için daha iyi bir sonuç elde edilemeye kadar devam eder.

Bu tez kapsamında, yukarıda bahsedilen satır yaklaşımına benzer bir yaklaşım kullanılmıştır. Kullanılan yaklaşımda, yukarıdaki yaklaşımdan farklı olarak seçilen n adet mümkün alt çözümün tüm uçuş ayaklarını kapsaması zorlanmaktadır. İlk etapta seçilen n adet mümkün alt çözüm tüm uçuş ayaklarını kapsamıyorsa tüm uçuş ayakları kapsanıncaya kadar p adet mümkün alt çözüm eldeki alt kümeye ilave edilmektedir. Bu işlem, orijinal mümkün çözüm kümesinde denenmemiş eleman kalmayıncaya kadar devam eder.

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de sırasıyla UR alt probleminin ve SUR alt probleminin çözüm aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 5.1. UR alt probleminin çözümü



Şekil 5.2. SUR alt probleminin çözümü

6. UYGULAMA ÇALIŞMASI

Bu tez çalışmasının asıl amacı, Bölüm 4.7’de yapılan yeni tanımlar ışığında HYÇP için sağlam çizelge üretebilecek bir metodoloji geliştirmek ve uygulamaktır. Daha sonra, HYÇP için önerilen sağlamlık kavramının SUR alt problemine uyarlandığından bahsedilmiş idi. Bu bölümde, önerilen metodolojinin geçerliliği gerçek hayat verileri kullanılarak test edilmiştir.

Yurtiçi yolcu taşımacılığı pazarında oldukça baskın olan bir havayolu şirketinden 01.01.2015-31.05.2015 tarihleri arasında gerçekleşen uçuş çizelgesi ve bu süre boyunca meydana gelen gecikmelerin kayıtları alınmıştır. Bu kayıtlarda gecikmelerin ait olduğu uçuş ayakları, süreleri, sebepleri, ne zaman ve kaç defa meydana geldikleri gibi birçok detay yer almaktadır. Havayolu firması tarafından –sıklıkla meydana gelmesinden dolayı– uçak arızalarının giderilmesinin öncelikli olduğunun belirtilmesi üzerine bu tez çalışması kapsamında sadece uçak arızalarından kaynaklanan gecikmeler ele alınmıştır. Sık gerçekleşen uçak arızalarından kaynaklanan gecikmelerin çıkış etkisinin de önemli derecede olacağı uzmanlarca öngörülmektedir. Uçak arızalarından kaynaklanan gecikmeler, eldeki veri setinde 01, 41 ve 51 kodlu gecikmeler olup uygulama çalışması sadece bu gecikmeler dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Tüm gecikme kodları ve bu gecikmelerin toplam gecikmedeki oranları EK-1’de verilmiştir.

01.01.2015-31.05.2015 tarihleri planlama dönemi olarak belirlenmiş olup bu tarihler arasında toplam 151 gün bulunmaktadır ve havayolu firması tarafından her gün uçuş gerçekleştirilmiştir. Böylece, uygulama çalışmasının planlama döneminde toplam 151 gün bulunmaktadır. Geliştirilen tüm modellerin planlama ufku bir gündür. Bir başka deyişle, her bir modelin koşturulması ile bir günlük çizelgeler elde edilmiş, bu koşturmalar planlama döneminde bulunan 151 gün için ayrı ayrı tekrarlanmıştır.

Uygulama çalışmasında, HYÇP literatüründe özellikle UR ve EA alt problemleri için sıklıkla kullanılan ve Bölüm 3.5’te değinilen mevcut yaygın strateji kullanılmıştır. Bir başka deyişle, planlama dönemindeki her bir gün için önce nominal mümkün alt çözümler elde edilmiştir. Mümkün alt çözümlerin, ele alınan UR alt problemde var olan tüm kısıtları sağlamakta olduğu, aksi halde eldeki alt çözümün mümkün alt çözümler kümesinde yer almadığı unutulmamalıdır. Daha sonra küme-kaplama üst problemi ile en az sayıda mümkün alt çözüm ile tüm uçuş ayaklarının kapsanmasına çalışılmıştır. Böylece, her bir mümkün alt

çözüm sistemde yer alabilecek tek bir uçağı temsil ettiğinden aslında en az sayıda uçak ile tüm uçuşların gerçekleştirilmesine çalışılmış olunmaktadır. Elde edilen çözüm, ilgili günde UR alt problemi için elde edilen nominal çözüm olmaktadır. Aynı işlemler, farklı belirsizlik kümesine sahip 3 farklı SURM için de tekrarlanmaktadır.

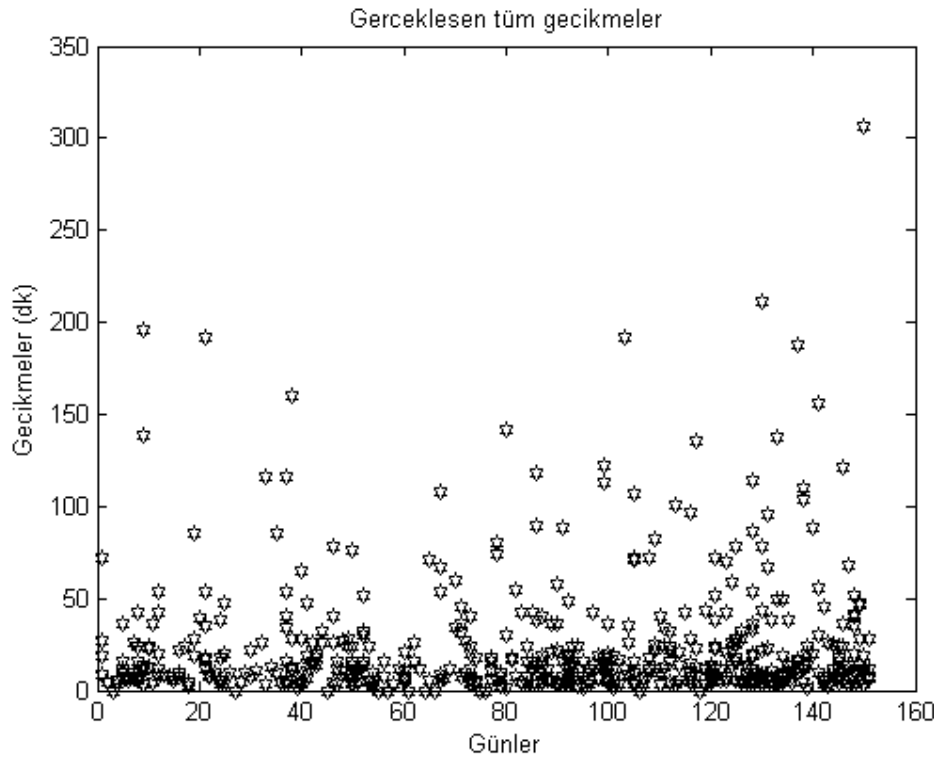
Bölüm 3.7 – 3.10’da detaylarına yer verilen SO kavramı hatırlanacak olursa, elde edilecek sağlam çözümün belirlenen belirsizlik kümesi (Θ)’ne bağlı olduğu görülecektir. Bu durumda, belirsizlik kümesinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Belirsizlik kümesinin, ele alınan problemdeki mevcut belirsizliği tam anlamıyla –veya en azından büyük oranda– kapsamayı istenirken fazla da geniş olmaması arzu edilmektedir. Eğer belirsizlik kümesi sistemdeki mevcut belirsizliği içermez ise SO yaklaşımının belki de en önemli iddiası olan tutuculuk (konservatizm) sağlanamamış olunacaktır. Diğer taraftan, belirsizlik kümesi sistemdeki mevcut belirsizlikten daha geniş bir belirsizliği temsil ederse sağlam çözümün amaç fonksiyonu değeri olması gerekenden daha kötü olacaktır ki bu durum, sağlam çözüm ve nominal çözüm kıyaslamasında yanlış kararlara yol açabilecektir. Tüm bunların yanında, yine Bölüm 3.7 – 3.10’da verilen SO kavramı hatırlanacak olursa, belirsizlik kümesinin konveks olma zorunluluğu vardır. Bu durumda, belirsizlik kümesinin belirlenmesinin hem çok önemli, hem de birçok problem için oldukça zor olduğu açıkça görülmektedir. Bu tez kapsamında ele alınan örnek olay çalışmasında, belirsizlik kümesinin belirlenmesinde kullanılmak üzere 3 farklı fonksiyon geliştirilmiştir. SO yaklaşımı ile oluşturulmuş tüm SURM’lerinde herbir sağlam çözüm, belirsizlik kümesinde yer alan gecikmelerin hangi kombinasyonu meydana gelirse gelsin sistemin bu gecikmelerden etkilenmeyeceğini garanti etmektedir. Bu tezin literatüre esas katkısının da daha önce sağlanamayan bu kesinliğin SO yaklaşımı kullanılarak sağlanması olduğu iddiasıdır.

Sonuçların karşılaştırılması aşamasında, en kötü durum gecikmeleri (EKDG), sisteme rassal gecikmeler verildiğinde SURM’lerinden elde edilen sonuçlar ve sağlam çizelge için gereken fazla uçak kullanımı (sağlamlık maliyeti) göz önünde bulundurulmuştur.

Uygulama çalışması, MATLAB R2013a ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu bölümün devamında, daha önce bahsedilen çözüm yaklaşımı daha detaylı bir şekilde açıklanmaktadır.

6.1. Planlama Döneminde Gerçekleşen Gecikmeler

Bu alt bölümde, 01.01.2015 ve 31.05.2015 tarihleri arasında havayolu firmasının uçuş ayaklarında uçak arızalarından kaynaklanan gecikmeler tanıtılacaktır. Uçak arızalarından kaynaklanan gecikmelere Bölüm 5.2’de değinilmiş idi. Bu gecikmelerin günlük olarak tasnif edilmiş hali Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Uçak arızalarından dolayı gerçekleşen gecikmeler

Şekil 6.1’de gösterilen toplam 527 adet gecikmenin büyüklüğü, sayısı, ve sıklığı gibi daha detaylı bilgiler Çizelge 6.1’de verilmiştir. Burada, gecikmeler d ile gösterilmiş olup gecikmeler yarımşar saatlik aralıklar halinde tasnif edilmiştir.

Çizelge 6.1. Uçak arızalarından dolayı gerçekleşen tüm gecikmelerin detayları

Gecikme büyüklüğü (dk)	Kaç defa yaşandığı	Sıklığı
$0 \leq d \leq 30$	413	%78
$30 < d \leq 60$	64	%12
$60 < d \leq 90$	24	%5
$90 < d$	26	%5

Görüldüğü gibi, gecikmelerin büyük bir kısmı en fazla 30 dk'lık gecikmeler olmakla beraber 90 dk'nın üstünde yaşanan gecikmeler ise oldukça azdır, hatta 90 dk'nın üzerindeki gecikmeler aykırı değerlerdir yorumu yapılabilir. Bir sonraki alt bölümde görüleceği üzere 3 farklı belirsizlik kümesinden ilki olan Θ_1 , bu yorum temelinde oluşturulmuştur.

Burada, gerçekleşen gecikmelerin herhangi bir dağılıma uyup uymadığı, uyuyorsa stokastik optimizasyon yaklaşımının eldeki UR alt problemi için uygulanıp uygulanamayacağı soruları akla gelebilir. Ancak gerçek verileri temsil edebilen bir modelden ziyade dağılım ailesinin bile belirlenmesi genellikle oldukça zordur. Buna rağmen, gerçekleşen gecikmeleri temsil eden bir model geliştirilebildiği varsayıldığında bile, literatürdeki eksiklik/zayıflık tespit edilerek önerilen ve tez çalışmasının asıl hedefi olan *tip I sağlam çizelge* kavramından hatırlanacağı üzere sağlamlığın *kesin olarak* garanti edilmesi ifadesi yerine getirilememiş olunacaktır. Kısacası, bu tezin asıl katkısı olan *tip I sağlam çizelge* elde edilmesi hedefi yerine getirilemeyecektir. Takdir edilir ki bu kesinliğin sağlanması için gerçekleşen gecikmeler için önerilen modelin %0 hata payına sahip olması gerekir ki teorik olarak mümkün olsa bile pratikte özellikle gerçek hayat problemlerinde çoğu zaman mümkün olmayan bir durumdur. Tüm bunların yanında, %0'lık hata payı iddia edilse bile, stokastik bir ortamda çalışmak yerine deterministik ortamda çalışmaya olanak veren SO yaklaşımı, kullanım kolaylığından ötürü yine tercih edilecektir. Bu gerekçeler, stokastik optimizasyon gibi belirsizlik ortamında çalışan yaklaşımlar bulunuyorken SO yaklaşımının neden ilgi çekmeye başladığının cevapları olarak da değerlendirilebilir. Daha detaylı bilgi için Ben-Tal ve Nemirovski (1999), Ben-Tal ve diğerleri (2009), Gorissen ve diğerleri (2015) gibi çalışmalar oldukça yararlı olacaktır.

6.2. Belirsizlik Kümelerinin Oluşturulması

Daha önce bahsedildiği gibi, SUR alt problemi için 3 farklı belirsizlik kümesi benimsenmiştir. Böylece 3 farklı SURM'nden bahsedilebilir. Θ_1 , Θ_2 , ve Θ_3 ile gösterilen bu belirsizlik kümelerinin *üst sınırlarının* belirlenebilmesi için f_1 , f_2 , ve f_3 ile gösterilen üç farklı fonksiyon geliştirilmiştir. Bu fonksiyonlardan ilki olan f_1 aşağıda gösterilmektedir:

$$f_1(\mathbf{D}_i) = \begin{cases} 0 \leq \max_{d_{it} \in \mathbf{D}_i} \{d_{it}\} \leq 30, f_1 = 30 \\ \max_{d_{it} \in \mathbf{D}_i} \{d_{it}\} > 30 \ \& \ \max_{d_{it} \in \mathbf{D}_i} \left\{ d_{it} \mid d_{it} \in \mathbf{D}_i \setminus \max_{d_{it} \in \mathbf{D}_i} \{d_{it}\} \right\} \leq 30, f_1 = 30 \\ \text{dd, } f_1 = \max_{d_{it} \in \mathbf{D}_i} \left\{ d_{it} \mid d_{it} \in \mathbf{D}_i \setminus \max_{d_{it} \in \mathbf{D}_i} \{d_{it}\} \right\} \end{cases} \quad (6.1)$$

Burada, $i \in F$, uçuş ayakları kümesini; $t \in T$, planlama dönemindeki günleri; d_{it} , t gününde i uçuş ayağında dk cinsinden meydana gelen gecikmeyi; $\mathbf{D}_i = \{d_{it} \mid \forall t \in T\}$, planlama dönemi boyunca i uçuş ayağında meydana gelen tüm gecikmeleri; $\max_{d_{it} \in \mathbf{D}_i} \{d_{it}\}$ ifadesi planlama dönemi boyunca i uçuş ayağında meydana gelen dk cinsinden en büyük gecikmeyi; $\max_{d_{it} \in \mathbf{D}_i} \left\{ d_{it} \mid d_{it} \in \mathbf{D}_i \setminus \max_{d_{it} \in \mathbf{D}_i} \{d_{it}\} \right\}$ ifadesi ise planlama dönemi boyunca i uçuş ayağında meydana gelen dk cinsinden en büyük ikinci gecikmeyi göstermektedir. Bir başka deyişle, eğer i uçuş ayağında planlama dönemi boyunca 30 dk'dan büyük bir gecikme yaşanmamışsa $f_1 = 30$, en büyük gecikmeden sonraki en büyük gecikme 30 dk'nın altında ise yine $f_1 = 30$, aksi halde f_1 en büyük gecikmeden sonraki en büyük gecikme olacaktır. Bu fonksiyon ile, tüm gecikmelerin %78'lik gibi büyük bir kısmının gerçekleştiği $0 \leq d \leq 30$ aralığında üst nokta olan 30 dk f_1 değeri olarak belirlenerek tutuculuk sağlanmaya çalışılırken, tüm gecikmelerin yalnız %5'lik bir kısmını temsil eden $90 < d$ aralığından da kaçınılması hedeflenmiştir. Zira, havayolu sektöründe $90 < d$ olan bir gecikme çok sıradan sayılmamaktadır ve aykırı değer olarak değerlendirilebilir. f_1 ile aykırı değerlerden kaçınılması, böylece daha doğru sonuçlar elde edilmesi amaçlanmıştır. Dolayısıyla, Bölüm 6.1'de yapılan yoruma uygun bir belirsizlik kümesi belirlenmiş olduğu iddia edilebilir. Bu durumda, $\Theta_1 = \{\zeta_i \mid 0 \leq \zeta_i \leq f_1(\mathbf{D}_i), \forall i \in F\}$ olacaktır. Burada, ζ_i , i uçuş ayağının bilinmeyen gecikmesinin dk cinsinden büyüklüğüdür.

Belirsizlik kümesinin üst sınırının planlama dönemi boyunca ilgili uçuş ayağında meydana gelen en büyük gecikmeye göre belirlendiği f_2 fonksiyonu ise matematiksel olarak şöyle ifade edilebilir:

$$f_2(\mathbf{D}_i) = \max_{d_{it} \in \mathbf{D}_i} \{d_{it}\} \quad (6.2)$$

Burada, $i \in F$, uçuş ayakları kümesini; $t \in T$, planlama dönemindeki günleri; d_{it} , t gününde i uçuş ayağında dk cinsinden meydana gelen gecikmeyi; $D_i = \{d_{it} \mid \forall t \in T\}$, planlama dönemi boyunca i uçuş ayağında meydana gelen tüm gecikmeleri; $\max_{d_{it} \in D_i} \{d_{it}\}$ ifadesi ise planlama dönemi boyunca i uçuş ayağında meydana gelen dk cinsinden en büyük gecikmeyi ifade etmektedir. f_2 ile, hiçbir ayırım yapılmaksızın, bir uçuş ayağındaki en büyük gecikmenin belirsizlik kümesinde ilgili uçuş ayağının üst limiti olmaktadır. Bu durumda, $\Theta_2 = \{\zeta \mid 0 \leq \zeta_i \leq f_2(D_i), \forall i \in F\}$ olacaktır. Burada, ζ_i , i uçuş ayağının bilinmeyen gecikmesinin dk cinsinden büyüklüğüdür.

Son olarak, uçuş ayaklarında meydana gelen gecikmeleri belli bir zaman aralıklarına ayırarak ilgili uçuş ayağının belirsizlik kümesinin üst sınırını bu aralığa göre belirleyen f_3 fonksiyonu geliştirilmiştir. Ele alınan SUR alt probleminde f_3 için –Çizelge 6.1’de olduğu gibi– yarımşar saatlik aralıklar belirlenmiştir. Geliştirilen f_3 fonksiyonu matematiksel olarak Eş. 6.3’te gösterilmektedir.

$$f_3(D_i) = \begin{cases} 0 \leq \max_{d_{it} \in D_i} \{d_{it}\} \leq 30, & f_3 = 30 \\ 30 < \max_{d_{it} \in D_i} \{d_{it}\} \leq 60, & f_3 = 60 \\ 60 < \max_{d_{it} \in D_i} \{d_{it}\} \leq 90, & f_3 = 90 \\ \text{dd}, & f_3 = 90 \end{cases} \quad (6.3)$$

Burada, $i \in F$, uçuş ayakları kümesini; $t \in T$, planlama dönemindeki günleri; d_{it} , t gününde i uçuş ayağında dk cinsinden meydana gelen gecikmeyi; $D_i = \{d_{it} \mid \forall t \in T\}$, planlama dönemi boyunca i uçuş ayağında meydana gelen tüm gecikmeleri; $\max_{d_{it} \in D_i} \{d_{it}\}$ ifadesi ise planlama dönemi boyunca i uçuş ayağında meydana gelen dk cinsinden en büyük gecikmeyi ifade etmektedir. f_3 , en büyük gecikmesi 30dk, 60dk, veya 90dk limitinin altında kalan tüm uçuş ayaklarının belirsizlik kümesindeki üst limitinin bu eşik değerlerine göre belirlenmesini öngören ve 90dk’lık gecikmeden fazlasına müsaade etmeyen bir fonksiyondur. Benzer şekilde Θ_3 ’ün üst sınırı f_3 ile belirlendiğinden, $\Theta_3 = \{\zeta \mid 0 \leq \zeta_i \leq f_3(D_i), \forall i \in F\}$ olacaktır. Yine, ζ_i , i uçuş ayağının bilinmeyen gecikmesinin dk cinsinden büyüklüğüdür.

Burada, belirsizlik kümelerinin alt sınırının 0 olduğuna dikkat edilmesi gerekir. Bu doğaldır, çünkü gecikme değeri negatif değer almayacaktır. Bir uçuş ayağının belirlenen saatten daha erken kalkması hem yasal hem de müşteri memnuniyeti ve devamlılığının sağlanması açılarından oldukça olumsuz sonuçlar doğuracağından aksaklıkla başa çıkmak için erteleme, iptal, vb gibi uçuş ayağının kalkış zamanını öne çekmeyen çözümler tercih edilmek zorundadır. Bunun yanında, meydana gelebilecek en az gecikme 0 dk'dır. Elbette, gecikme olmadığı anlamına gelen bu durum ile karşılaşılması da olasıdır. Dolayısı ile belirsizlik kümelerinin herbirinin alt limiti 0 dk olarak belirlenmiştir.

Bir sonraki alt bölümde, geliştirilen SURM'leri ve SO yaklaşımı gereği tanımlanan Θ_1 , Θ_2 ve Θ_3 belirsizlik kümelerinin önerilen SURM'lerinde nasıl kullanıldığı gösterilmektedir.

6.3. Geliştirilen SURM'leri

Bu alt bölümde Bölüm 6.2'de açıklanan belirsizlik kümeleri kullanılarak oluşturulan ve sırasıyla δ_{S1}^* , δ_{S2}^* ve δ_{S3}^* ile gösterilen SURM'leri tanıtılmaktadır. Bu modellerden ilki olan δ_{S1}^* şöyle ifade edilebilir:

$$\delta_{S1}^* : \min_{x_{ijk} : i \in F, j \in F, k \in K} \sum_{i \in F} \sum_{j \in F} \sum_{k \in K} x_{ijk} \quad (6.4)$$

s.t.

$$\sum_{j \in F} x_{jik} - \sum_{j \in F} x_{ijk} = 0, \forall i \in F, \forall k \in K \quad (6.5)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in F} x_{ijk} \geq 1, \forall i \in F \quad (6.6)$$

$$(\text{art}_i + d_i) - (\text{dpt}_j + d_j - \text{ta}_j) - M(1 - y_{ij}) + \max_{\Theta = \{\zeta_i \mid 0 \leq \zeta_i \leq D_i\}} \{\zeta_i\} - \min_{\Theta = \{\zeta_j \mid 0 \leq \zeta_j \leq D_j\}} \{\zeta_j\} \leq 0, \forall i, j \in F \quad (6.7)$$

$$y_{ij} [\text{dpa}_j - \text{ara}_i] = 0, \forall i, j \in F \quad (6.8)$$

$$\sum_{i \in F} \sum_{j \in F} x_{ijk} \leq 4, \forall k \in K \quad (6.9)$$

$$\Theta_1 = \{\zeta \mid 0 \leq \zeta_i \leq f_1(D_i), \forall i \in F\} \quad (6.10)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in F, \forall k \in K \quad (6.11)$$

Burada, Θ_1, f_1 'e göre oluşturulmuş olan $i \in F$ uçuş ayaklarında meydana gelebilecek olan tüm gecikmeleri ifade eden belirsizlik kümesini göstermektedir. Burada ve sonraki SURM'lerinde, $y_{ij} = \sum_{k \in K} x_{ijk}$ olduğu ve y_{ij} 'nin ancak 0 veya 1 değerini alabileceği unutulmamalıdır.

$\Theta_2 = \{\zeta \mid 0 \leq \zeta_i \leq f_2(\mathbf{D}_i), \forall i \in F\}$ belirsizlik kümesine göre oluşturulan δ_{S2}^* ise şöyle gösterilebilir:

$$\delta_{S2}^* : \min_{x_{ijk} : i \in F, j \in F, k \in K} \sum_{i \in F} \sum_{j \in F} \sum_{k \in K} x_{ijk} \quad (6.12)$$

s.t.

$$\sum_{j \in F} x_{jik} - \sum_{j \in F} x_{ijk} = 0, \forall i \in F, \forall k \in K \quad (6.13)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in F} x_{ijk} \geq 1, \forall i \in F \quad (6.14)$$

$$(\text{art}_i + d_i) - (\text{dpt}_j + d_j - \text{ta}_j) - M(1 - y_{ij}) + \max_{\Theta = \{\zeta_i \mid 0 \leq \zeta_i \leq D_i\}} \{\zeta_i\} - \min_{\Theta = \{\zeta_j \mid 0 \leq \zeta_j \leq D_j\}} \{\zeta_j\} \leq 0, \forall i, j \in F \quad (6.15)$$

$$y_{ij} [\text{dpa}_j - \text{ara}_i] = 0, \forall i, j \in F \quad (6.16)$$

$$\sum_{i \in F} \sum_{j \in F} x_{ijk} \leq 4, \forall k \in K \quad (6.17)$$

$$\Theta_2 = \{\zeta \mid 0 \leq \zeta_i \leq f_2(\mathbf{D}_i), \forall i \in F\} \quad (6.18)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in F, \forall k \in K \quad (6.19)$$

Burada, Θ_2, f_2 'e göre oluşturulmuş olan $i \in F$ uçuş ayaklarında meydana gelebilecek olan tüm gecikmeleri ifade eden belirsizlik kümesini göstermektedir.

Son olarak, üst sınırı f_3 ile belirlenen $\Theta_3 = \{\zeta \mid 0 \leq \zeta_i \leq f_3(\mathbf{D}_i), \forall i \in F\}$ belirsizlik kümesine sahip olan δ_{S3}^* Eş. 6.20 - 6.27'de matematiksel olarak gösterilmektedir.

$$\delta_{S3}^* : \min_{x_{ijk} : i \in F, j \in F, k \in K} \sum_{i \in F} \sum_{j \in F} \sum_{k \in K} x_{ijk} \quad (6.20)$$

s.t.

$$\sum_{j \in F} x_{ijk} - \sum_{j \in F} x_{ijk} = 0, \forall i \in F, \forall k \in K \quad (6.21)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in F} x_{ijk} \geq 1, \forall i \in F \quad (6.22)$$

$$(\text{art}_i + d_i) - (\text{dpt}_j + d_j - \text{ta}_j) - M(1 - y_{ij}) + \max_{\Theta = \{\zeta_i \mid 0 \leq \zeta_i \leq D_i\}} \{\zeta_i\} - \min_{\Theta = \{\zeta_j \mid 0 \leq \zeta_j \leq D_j\}} \{\zeta_j\} \leq 0, \forall i, j \in F \quad (6.23)$$

$$y_{ij} [\text{dpa}_j - \text{ara}_i] = 0, \forall i, j \in F \quad (6.24)$$

$$\sum_{i \in F} \sum_{j \in F} x_{ijk} \leq 4, \forall k \in K \quad (6.25)$$

$$\Theta_3 = \{\zeta \mid 0 \leq \zeta_i \leq f_3(\mathbf{D}_i), \forall i \in F\} \quad (6.26)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in F, \forall k \in K \quad (6.27)$$

Burada, Θ_3 , f_3 'e göre oluşturulmuş olan $i \in F$ uçuş ayaklarında meydana gelebilecek olan tüm gecikmeleri ifade eden belirsizlik kümesini göstermektedir.

Bu tez çalışmasında, SUR alt problemi için önerilen üç model (δ_{s1}^* , δ_{s2}^* ve δ_{s3}^*) de Bölüm 6.4 – 6.6'da açıklandığı gibi çözüme kavuşturulmuş, elde edilen sağlam çözümler belirlenen performans ölçütleri ile hem birbirleri hem de nominal çözüm ile karşılaştırılarak nihai bir sonuca varılmaya çalışılmıştır.

6.4. Mümkün Alt Çözümlerin Elde Edilmesi

Planlama dönemindeki her bir gün için hem nominal, hem de SURM'leri (δ_1 , δ_{s1}^* , δ_{s2}^* ve δ_{s3}^*) mevcut yaygın strateji kullanılarak çözüme kavuşturulmuştur. Hatırlanacağı üzere bu stratejide, günlük elde edilen alt çözümler birleştirilerek 2-3 günlük alt çözümler, bunlar da birleştirilerek haftalık, aylık mümkün çözümlere ulaşılmaktaydı. Yine hatırlanacağı gibi bu tez çalışmasının asıl hedefi *tip I sağlam çizelge* elde edilmesi idi. Literatüre yeni önerilen bu kavramı karşıladığı iddia edilen çizelgelerin bu iddiayı gerçekten yerine getirip getiremediği, getiriyorsa bu çizelgelerden hangisinin diğerine üstün olduğu, nominal çizelge ile karşılaştırıldığında üstünlük ve zayıflıklarının neler olduğu, vb gibi kritik sorular bu tez çalışmasında önemli yer tutmaktadır. Bu soruların cevabının daha iyi verilebilmesi için tüm modeller planlama ufkundaki 151 gün için yalnız birer günlük koşturulmuş ve tüm

değerlendirmeler birer günlük çizelgeler üzerinden yapılmıştır. Burada, bir mümkün alt çözüm, uçuş ayaklarının tümünün karşılanması kısıtı haricindeki tüm kısıtları sağlayan, yalnız bir uçağın gerçekleştirebileceği uçuş ayakları kümesi olarak tanımlanabilir.

Aşağıda, bir günlük mümkün alt çözümlerin elde edilmesi için MATLAB R2013a ortamında yazılan kodun yalancı kodu verilmektedir.

```

S1=[]
totfl=i gününde gerçekleştirilmesi planlanan uçuş ayağı sayısı
for ii=1:totfl
    S11=S12=S13=S14=[]
    lastadded1=lastadded2=lastadded3=lastadded4={}
    S11 matrisine i iç uçuş ayağı eklenir
    can2=ii uçuş ayağından sonra aynı uçak tarafından gerçekleştirilebilecek uçuş
    ayakları kümesi (yalnızca bağlantı kısıtlarına göre)
    for iii=1:length(can2)
        S12 matrisine ii ve iii uçuş ayakları eklenir
        can3= iii uçuş ayağından sonra aynı uçak tarafından gerçekleştirilebilecek
        uçuş ayakları kümesi (yalnızca bağlantı kısıtlarına göre)
        for iv=1:length(can3)
            S13 matrisine ii, iii ve iv uçuş ayakları eklenir
            can4= iv uçuş ayağından sonra aynı uçak tarafından
            gerçekleştirilebilecek uçuş ayakları kümesi (yalnızca bağlantı
            kısıtlarına göre)
            for v=1:length(can4)
                S14 matrisine ii, iii, iv ve v uçuş ayakları eklenir
            end
        end
    end
end
S1=[S11, S12, S13, S14]
end

```

Yalancı kodu yukarıda verilen mümkün alt çözümlerin elde edilmesi aşaması, MATLAB R2013a ortamında 618 satırda yazılan kod ile gerçekleştirilmiştir. Bu kod, her UR modeli (δ_1 , δ_{s1}^* , δ_{s2}^* ve δ_{s3}^*) için her ay (toplam 5 ay) olmak üzere toplam 20 ($4 * 5 = 20$) kez koşturulmuş olup her koşturmada her ay için birer günlük çizelgeler elde edilmiştir. Burada,

can listelerinin oluşturulmasına özellikle dikkat edilmelidir. Gerçekleştirilen uçuş ayakları değişmemesine rağmen, δ_1 , δ_{s1}^* , δ_{s2}^* veya δ_{s3}^* *can* listeleri UR modellerindeki farklı gecikme sürelerinden dolayı farklılık gösterecektir. Bu da farklı mümkün alt çözümler demektir. Farklı mümkün alt çözümler ile de aynı uçuş çizelgesi için farklı sayıda uçak gerekebileceği açıktır.

EK-2, herbir model için mevcut yaygın strateji kullanılarak elde edilen mümkün alt çözüm sayısını göstermektedir. Mümkün alt çözümler,

6.5. Üst Problemin Geliştirilmesi

Bir sonraki aşama, mümkün alt çizelgeleri oluşturulan δ_1 , δ_{s1}^* , δ_{s2}^* veya δ_{s3}^* UR modellerinin –ayrı ayrı– küme-kaplama modeli olarak formüle edilen bir üst probleme dönüştürülmesi aşamasıdır. Bölüm 5.6’da ifade edildiği gibi, δ_1 , δ_{s1}^* , δ_{s2}^* veya δ_{s3}^* UR modellerinin herbiri için –ayrı ayrı– aşağıdaki küme-kaplama problemi geliştirilmiştir.

$$\xi: \min_{x_s: s \in S} \sum_{s \in S} x_s \quad (6.28)$$

s.t.

$$\sum_{s \in S} a_{is} x_s \geq 1, \forall i \in F \quad (6.29)$$

Burada $i \in F$ uçuş ayaklarını, $x_s \in H$ ise mümkün alt çizelgeleri göstermektedir. Dikkat edilirse, amaç fonksiyonu değeri havayolu firmasının ilgili gündeki tüm uçuş ayaklarını gerçekleştirebilmek için gereksinim duyduğu uçak sayısını ifade etmektedir. $x_s \in H$ için bir maliyet tanımlanmamasının sebebi, bir x_s mümkün alt çözümünün havayolu firmasının farklı uçakları ile gerçekleştirmesinin maliyetinin aynı olduğunun varsayılmasıdır. Havayolu firmasının bünyesinde yalnızca Boeing 737-800 tipi uçak bulunduğundan, bu varsayım doğal bir varsayımdır denilebilir.

6.6. Üst Problemin Çözüme Kavuşturulması

Bilindiği üzere, HYÇP genel olarak büyük boyutlu optimizasyon problemi sınıfına girmektedir. Bu nedenle, ideal durumun bir HYÇP’nin bir bütün olarak tek bir matematiksel

modelde ifade edilip bu modelin çözülmesi iken Bölüm 1’de ifade edildiği gibi hiyerarşik bir yapı oluşturulmuştur (Bkz. Şekil 1.1). Bu yapıda bir alt problemin çıktısı, kendisinden sonraki bir alt problemin –genellikle– girdisi olarak kullanılmaktadır. HYÇP, daha kötü sonuçlara katlanmak pahasına daha kolay çözülmesi için alt problemlere ayrılmasına rağmen, orta ölçekli bir havayolu firması için bile bu alt problemler genellikle makul zamanda çözülememektedir. Bunun için, optimal sonuçtan feragat edilerek, alt optimal sonuca razı olunmaktadır. Günümüzde, büyük ölçekli bir havayolu firması için hızlı bir şekilde uygun bir çözüm bulunması bile başarı olarak nitelendirilebilmektedir.

Literatürdeki durum böyleyken, eldeki bu zor problem SO yaklaşımı kullanıldığında sonsuz sayıda kısıta ulaşarak tamamen çözümsüz hale gelmektedir. Bölüm 5.4 – 5.5 hatırlanacak olursa, birtakım matematiksel operasyonlar ile sonsuz sayıdaki kısıt kümesi sayılı kısıt içeren bir kısıt kümesine indirgenebilmiştir. Böylece eldeki UR alt problemi, çözülebilirliği açısından literatürdeki UR alt problemlerine benzetilebilmiştir. Yine de büyük boyutlu optimizasyon problemleri sınıfına giren eldeki UR alt problemi için sütun oluşturma yaklaşımı kullanılarak optimale yakın bir çözüm elde edilebilmiştir.

Eldeki UR alt problemi için elde edilen mümkün alt çözüm sayısı N olsun. Buna göre, benimsenen sütun oluşturma yaklaşımının yalancı kodu şöyle olacaktır:

$i=1;$

$del=\{\}$

While $n(del)<N-RN*0,5$

$A=[];$

del kümesinin elemanı olmayan $RN=1000$ adet mümkün alt çözüm rastgele seçilir ve A matrisine eklenir.

while seçilen mümkün alt çözümler tüm uçuş ayaklarını kapsamıyorsa

del kümesinin elemanı olmayan $RN*0.5$ adet mümkün alt çözüm daha rastgele seçilir

Seçilen mümkün alt çözümler A matrisine eklenir

end

seçilen mümkün alt çözümler (A matrisindeki çözümler) del kümesine eklenir.

A matrisindeki mümkün alt çözümler ile üst problem optimal sonuca kavuşturulur.

elde edilen optimal sonuç f listesine i . eleman olarak eklenir.

elde edilen optimal sonuçta yer alan mümkün alt çözümler ile $F(i)$ matrisi oluşturulur.

```

        i=i+1
    end
    Anihai=[];
    for ii=1:i
        F(ii) matrisindeki mümkün alt çözümler Anihai matrisine eklenir.
    end
    Anihai matrisi ile üst problem optimal sonuca kavuşturulur.
    fval=elde edilen optimal amaç fonksiyonu değeri
    Fson=optimal çözümde yer alan mümkün alt çözümler
    If f kümesinde daha iyi bir fval değeri varsa
        i=f kümesindeki en iyi fval değerinin kaçınıcı sırada olduğu
        fnihai=f(i)
        Fçözüm=F(i)
    else
        fnihai=fval;
        Fçözüm=Fson
    end
end

```

Burada, *Fçözüm*, elde edilen nihai çözüm; *fnihai* ise, elde edilen nihai çözümün amaç fonksiyonu değerini göstermektedir. Yukarıda yalancı kodu verilen sütun oluşturma yaklaşımı, planlama dönemindeki herbir günde, herbir UR alt problemi (δ_1 , δ_{S1}^* , δ_{S2}^* ve δ_{S3}^*) için MATLAB R2013a ortamında yazılan 1971 satır kod koşturularak tüm UR alt problemlerinin çözümleri elde edilmiştir.

Elde edilen çözümlerin daha iyi anlaşılması açısından, aşağıda 07.05.2015 tarihi için bir örnek verilmektedir. 07.05.2015 tarihindeki δ_1 modelinden elde edilen çözüm –nominal çözüm– 66’dır. Bir başka deyişle, hiçbir gecikme olmayacağı varsayımı altında 07.05.2015 tarihindeki tüm uçuş ayaklarını gerçekleştirebilmek için gereken en az uçak sayısı 66 olarak bulunmuştur. Çizelge 6.2’de, 07.05.2015 tarihindeki 210 uçuş ayağını gerçekleştirecek toplam 66 uçaktan 7 uçağın uçuş planı verilmektedir.

Dikat edilmelidir ki, elde edilen amaç fonksiyonu değeri, aslında havayolu firmasının ilgili gündeki tüm uçuş ayaklarını gerçekleştirebilmek için ihtiyaç duyduğu en az uçak sayısını ifade etmektedir.

Dikkate değer bir başka nokta ise, $\delta_{s_1}^*$, $\delta_{s_2}^*$ ve $\delta_{s_3}^*$ SURM'lerinden elde edilen sonuçlar SO yaklaşımı gereği en kötü durum (worst-case) sonuçlarıdır.

07.05.2015 tarihi için δ_1 modeli ile elde edilen çözümde, bir başka deyişle nominal çözümde toplam 66 uçağın uçuş planı EK-3'te verilmiştir.

Çizelge 6.2. δ_1 modeline göre 07.05.2015 tarihinde görev yapan 7 uçağın uçuş planı

Uçak	Tarih	Uçuş kodu	Kalkış noktası	Variş noktası	Kalkış saati	Variş saati	Uçuş süresi (dk)
1	7.05.2015	7051	BGG	ESB	15:50	17:20	90
	7.05.2015	7253	ESB	SAW	18:00	19:00	60
	7.05.2015	7254	SAW	ESB	19:35	20:35	60
	7.05.2015	7058	ESB	MLX	23:20	00:30	70
2	7.05.2015	7071	ERZ	ESB	10:15	11:45	90
	7.05.2015	7384	ESB	ECN	19:20	20:30	70
	7.05.2015	7385	ECN	ESB	21:05	22:20	75
	7.05.2015	7257	ESB	SAW	23:20	00:20	60
3	7.05.2015	7079	ERC	ESB	14:05	15:25	80
	7.05.2015	7251	ESB	SAW	17:10	18:10	60
	7.05.2015	7256	SAW	ESB	21:00	22:00	60
	7.05.2015	7036	ESB	AYT	23:30	00:35	65
4	7.05.2015	7089	MSR	ESB	11:40	13:20	100
	7.05.2015	7102	ESB	ADA	14:00	15:05	65
	7.05.2015	7267	ADA	SAW	16:40	18:10	90
	7.05.2015	7254	SAW	ESB	19:35	20:35	60
5	7.05.2015	7091	KSY	ESB	11:00	12:45	105
	7.05.2015	7008	ESB	ADB	14:05	15:25	80
	7.05.2015	7011	ADB	ESB	17:45	19:00	75
	7.05.2015	7054	ESB	EZS	23:20	00:35	75
6	7.05.2015	7097	AJI	ESB	15:20	17:05	105
	7.05.2015	7370	ESB	CKZ	21:25	22:40	75
7	7.05.2015	7099	IGD	ESB	15:50	17:35	105
	7.05.2015	7134	ESB	SZF	20:00	20:55	55

Okuyucunun nominal çözüm ile sağlam çözüm arasındaki farkı karşılaştırabilmesini kolaylaştırmak için EK-4'te, 07.05.2015 tarihi için $\delta_{s_3}^*$ modeli ile elde edilen sağlam çözümde yer alan toplam 67 uçağın uçuş planı verilmiştir. Böylece, gerçek veriler kullanılarak elde edilen nominal çözüm ile sağlam çözüm karşılaştırması sadece teorik düzeyde bırakılmamış, pratikte nasıl çizelgeler elde edildiği de gösterilmeye çalışılmıştır.

6.7. En Kötü Durum Gecikmeleri (EKDG) ve Sağlamlık Maliyetleri

Bu alt bölümde, SUR çizelgelerinin değerlendirilmesi için kullanılacak olan iki performans ölçütü tanıtılarak elde edilen SUR çizelgeleri için bir ön değerlendirme yapılmıştır. Tahmin edileceği üzere her gün yüzlerce uçuş ayağını gerçekleştiren bir havayolu firmasında hemen her gün –yüksek ihtimalle defalarca– gecikme yaşanabilecektir. 01.01.2015-31.05.2015 tarihleri arasında gerçekleşen tüm gecikmeler ilgili firmadan temin edilmiştir. Aşağıda, planlama döneminin ilk 7 günü için gerçekleşen gecikmeler verilmiştir.

Çizelge 6.3. 01.01.2015-07.01.2015 arasında gerçekleşen gecikmeler

Tarih	UK	KH	VH	PKZ	PVZ	GKZ	GVZ	Gecikme
01.01.2015	7084	ESB	VAN	13.45	15.20	13.54	15.29	9
01.01.2015	7229	TZX	SAW	20.40	22.25	20.59	22.44	19
01.01.2015	7286	SAW	KYA	19.10	20.20	20.22	21.32	72
01.01.2015	7384	ESB	ECN	19.20	20.30	19.47	20.57	27
02.01.2015	7052	ESB	EZS	16.00	17.15	16.05	17.20	5
03.01.2015	-	-	-	-	-	-	-	-
04.01.2015	7064	ESB	TZX	12.15	13.35	12.21	13.41	6
04.01.2015	7102	ESB	ADA	14.00	15.05	14.04	15.09	4
04.01.2015	7236	SAW	SZF	07.00	08.20	07.06	08.26	6
04.01.2015	7264	SAW	ADA	22.30	23.55	22.36	00.01	6
05.01.2015	7062	ESB	TZX	15.55	17.15	16.05	17.25	10
05.01.2015	7078	ESB	ERC	12.20	13.35	12.26	13.41	6
05.01.2015	7090	ESB	KYS	08.55	10.30	09.07	10.42	12
05.01.2015	7100	ESB	ADA	08.45	09.50	08.57	10.02	12
05.01.2015	7178	ESB	CKS	08.30	09.50	09.06	10.26	36
05.01.2015	7265	ADA	SAW	06.30	08.00	06.46	08.16	16
06.01.2015	7385	ECN	ESB	21.05	22.20	21.11	22.26	6
07.01.2015	7012	ESB	ADB	18.30	19.50	18.38	19.58	8
07.01.2015	7033	AYT	ESB	21.30	22.35	21.37	22.42	7
07.01.2015	7086	ESB	VAN	16.00	17.30	16.26	17.56	26
07.01.2015	7116	ESB	GYN	19.45	21.00	19.55	21.10	10

Burada, UK, uçuş kodunu; KH, kalkış havaalanını; VH, varış havaalanını; PKZ, planlanan kalkış zamanını; PVZ, planlanan varış zamanını; GKZ, gerçekleşen kalkış zamanını; GVZ ise gerçekleşen varış zamanını ifade etmektedir.

EKDG, Bölüm 6.2’de tanımlanan fonksiyonlar yardımıyla gerçek gecikmeler temel alınarak belirlenmiştir. Bir uçuş ayağının en kötü durum gecikmesi, belirlenen belirsizlik kümesinde o uçuş ayağı için tanımlanan en büyük gecikmedir. Bu durumda, planlama dönemindeki her bir gün için ayrı olarak tanımlanan EKDG, ilgili günde gerçekleştirilecek uçuş ayaklarının en kötü gecikmelerinin toplamı olarak ifade edilebilir.

Planlama dönemi boyunca, Ocak ayında 4743, Şubat ayında 4613, Mart ayında 5285, Nisan ayında 6371, Mayıs ayında ise 6434 adet uçuş ayağının gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Nisan ve Mayıs aylarında gerçekleştirilmesi planlanan uçuş ayağı sayısı, planlama döneminde gerçekleştirilmesi planlanan uçuş ayağı sayısının yaklaşık %46,6’sını oluşturduğundan Nisan ve Mayıs aylarının sonuçlarına metin içinde detaylıca yer verilmiş, diğer aylara ilişkin sonuçlar ise ek olarak verilmiştir. Planlama döneminin en yoğun dönemi sayılabilecek Nisan ve Mayıs aylarının EKDG, sırasıyla Çizelge 6.4 – 6.5’te verilmiştir. Ocak, Şubat ve Mart aylarının EKDG ise EK-5’te görülebilir.

Çizelge 6.4. Nisan ayı en kötü durum gecikmeleri

Tarih	Gerçekleştirilen uçuş ayağı sayısı	EKDG (δ_{S1}^*) (dk)	EKDG (δ_{S2}^*) (dk)	EKDG (δ_{S3}^*) (dk)
1.04.2015	194	5859	7703	9300
2.04.2015	202	6120	9046	9661
3.04.2015	209	6259	8035	10381
4.04.2015	196	6235	7954	9240
5.04.2015	204	6553	8737	10051
6.04.2015	202	6189	8734	9660
7.04.2015	183	5659	7355	9090
8.04.2015	199	6077	7938	9900
9.04.2015	203	6233	7971	9390
10.04.2015	213	6583	8690	10261
11.04.2015	196	6212	7764	9540
12.04.2015	202	6291	8113	10051
13.04.2015	208	6347	8012	10020
14.04.2015	188	5858	7197	9390
15.04.2015	201	6201	8344	10231
16.04.2015	212	6385	8898	10260
17.04.2015	216	6720	8432	10470
18.04.2015	199	6309	7242	9871
19.04.2015	210	6506	8149	10111
20.04.2015	215	6612	8315	10110
21.04.2015	195	5950	7803	9480
22.04.2015	212	6583	8737	10350

Çizelge 6.4. (devam) Nisan ayı en kötü durum gecikmeleri

23.04.2015	213	6169	8353	9960
24.04.2015	218	6625	8766	10260
25.04.2015	203	6256	7502	9750
26.04.2015	212	6833	9156	10530
27.04.2015	213	6701	8206	9990
28.04.2015	198	5928	8073	9210
29.04.2015	208	6165	8328	9810
30.04.2015	218	6448	8137	10140

Çizelge 6.5. Mayıs ayı en kötü durum gecikmeleri

Tarih	Gerçekleştirilen uçuş ayağı sayısı	EKDG (δ_{S1}^*) (dk)	EKDG (δ_{S2}^*) (dk)	EKDG (δ_{S3}^*) (dk)
1.05.2015	229	6833	9259	10320
2.05.2015	205	6602	8182	10111
3.05.2015	220	6773	8470	11191
4.05.2015	225	6894	8266	10021
5.05.2015	202	6175	7874	9720
6.05.2015	215	6469	8822	10500
7.05.2015	210	5321	8075	9120
8.05.2015	228	6646	8316	16820
9.05.2015	201	6295	8325	10260
10.05.2015	208	6622	8248	10531
11.05.2015	211	6237	7763	9150
12.05.2015	195	5875	7750	9300
13.05.2015	203	6151	8571	9841
14.05.2015	211	6207	8577	9721
15.05.2015	228	6738	8959	10921
16.05.2015	212	6798	8029	10231
17.05.2015	220	6861	9295	10261
18.05.2015	215	6363	8621	10531
19.05.2015	212	6243	7981	9540
20.05.2015	214	6281	8133	10350
21.05.2015	213	6178	8115	9211
22.05.2015	221	6676	8618	9960
23.05.2015	211	6583	8503	10260
24.05.2015	215	6469	9440	9871
25.05.2015	228	6612	8105	9330
26.05.2015	207	5742	7567	8850
27.05.2015	218	6604	8556	10770
28.05.2015	220	6141	7783	9510
29.05.2015	231	6666	8307	10321
30.05.2015	213	6315	8714	9630
31.05.2015	228	6868	8064	10591

Hatırlanacağı üzere, SURM’nden elde edilen çizelge –SO yaklaşımı gereği–en kötü senaryoya bile dayanıklı olacaktır. Bu durumda, ilgili SURM’nin çözümünde elde edilen çizelgeler, Çizelge 6.4-5’te verilen EKDG’ne dayanıklı çizelgelerdir. Dolayısı ile, Nisan ve Mayıs aylarının tüm günlerinde diğer SURM’ne kıyasla δ_{S1}^* modeli daha az miktarda EKDG’ne engel oluyorken δ_{S3}^* modeli ise daha çok miktarda EKDG’ne engel olmaktadır.

Görüldüğü gibi, model yapısı, karar değişkenleri ve belirsizlik içermeyen parametreler –gecikme haricindeki tüm parametreler– aynı olsa da farklı belirsizlik kümeleri farklı en kötü gecikmelere yol açmıştır. Bu durumda, SURM’leri ile elde edilen amaç fonksiyonu değerlerinin farklı olması beklenebilir. Dolayısı ile, bu aşamada 3 farklı SURM’nden elde edilen amaç fonksiyonu değerlerine bakılmalıdır. Burada, amaç fonksiyonu değerleri ile önerilen çizelgenin gerçekleştirilebilmesi için gereken uçak sayısı ifade edilmektedir.

δ_1 , δ_{S1}^* , δ_{S2}^* ve δ_{S3}^* modellerinden Nisan ve Mayıs aylarındaki herbir günde gerçekleştirilecek uçuş ayaklarını tamamlayabilmek için gereken en az uçak sayısı, sırasıyla Çizelge 6.6-7’de verilmiştir. Ocak, Şubat ve Mart aylarında elde edilen amaç fonksiyonu değerleri ise Ek. 6’da bulunabilir. Burada, *nominal çözüm*, δ_1 modelinden elde edilen amaç fonksiyonu değerini; *sağlam çözüm* ise δ_{S1}^* , δ_{S2}^* ve δ_{S3}^* modellerinden elde edilen amaç fonksiyonu değerini göstermektedir. Bir başka deyişle, nominal çözüm, hiçbir gecikmenin yaşanmadığı durumda planlanan tüm uçuş ayaklarını gerçekleştirmek için gereken en az uçak sayısını; sağlam çözüm ise ilgili SURM’nde tanımlanan belirsizlik kümesine göre yaşanabilecek gecikmelerin tümüne dayanıklı sağlam çizelgede tüm uçuş ayaklarını gerçekleştirmek için gereken en az uçak sayısını ifade etmektedir.

Çizelge 6.6. Nisan ayı için UR ve SUR modellerinin gerektirdiği uçak sayıları

Tarih	Gerçekleştirilen uçuş ayağı sayısı	Nominal çözüm (δ_1)	Sağlam çözüm (δ_{S1}^*)	Sağlam çözüm (δ_{S2}^*)	Sağlam çözüm (δ_{S3}^*)
1 Nisan 2015 Çarşamba	194	61	62	68	63
2 Nisan 2015 Perşembe	202	64	64	70	64
3 Nisan 2015 Cuma	209	65	66	71	66
4 Nisan 2015 Cumartesi	196	65	65	70	65
5 Nisan 2015 Pazar	204	65	65	70	66
6 Nisan 2015 Pazartesi	202	61	63	69	63
7 Nisan 2015 Salı	183	58	59	65	59
8 Nisan 2015 Çarşamba	199	61	63	70	64

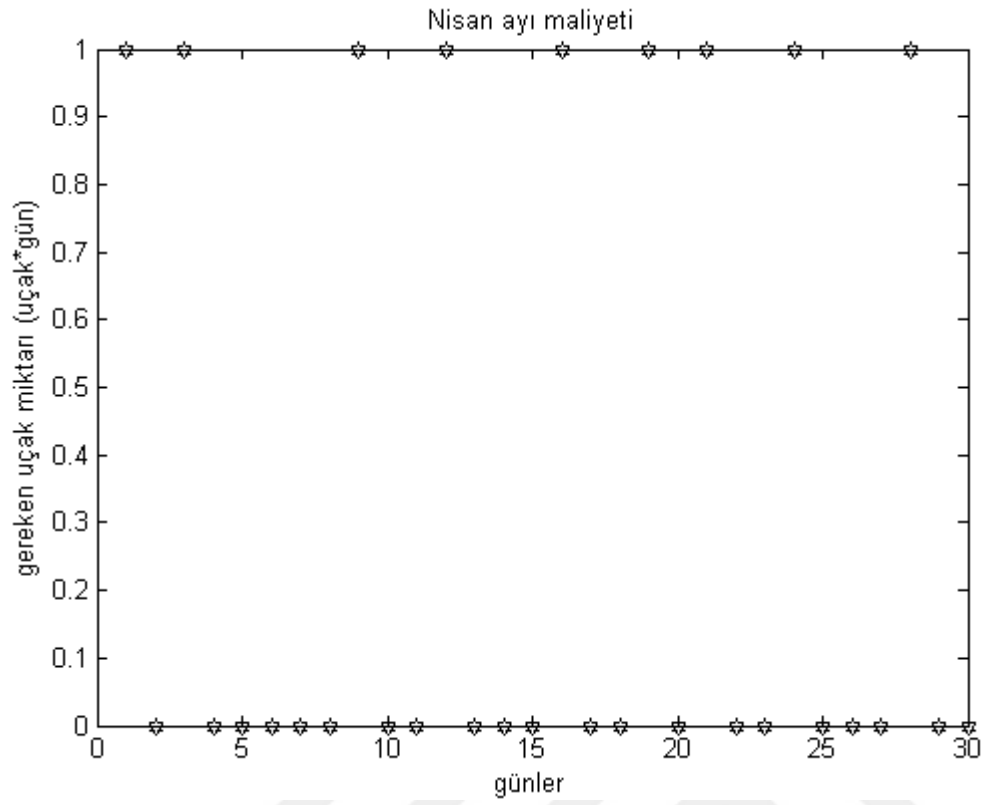
Çizelge 6.6. (devam) Nisan ayı için UR ve SUR modellerinin gerektirdiği uçak sayıları

9 Nisan 2015 Perşembe	203	64	63	70	64
10 Nisan 2015 Cuma	213	68	67	73	68
11 Nisan 2015 Cumartesi	196	61	64	67	65
12 Nisan 2015 Pazar	202	65	66	71	65
13 Nisan 2015 Pazartesi	208	65	65	72	66
14 Nisan 2015 Salı	188	60	61	67	61
15 Nisan 2015 Çarşamba	201	66	66	71	66
16 Nisan 2015 Perşembe	212	67	67	74	67
17 Nisan 2015 Cuma	216	69	69	76	69
18 Nisan 2015 Cumartesi	199	65	65	72	66
19 Nisan 2015 Pazar	210	68	69	75	68
20 Nisan 2015 Pazartesi	215	69	69	76	69
21 Nisan 2015 Salı	195	64	64	70	64
22 Nisan 2015 Çarşamba	212	69	69	76	69
23 Nisan 2015 Perşembe	213	69	69	75	69
24 Nisan 2015 Cuma	218	69	70	77	70
25 Nisan 2015 Cumartesi	203	66	66	73	66
26 Nisan 2015 Pazar	212	69	68	75	69
27 Nisan 2015 Pazartesi	213	68	68	75	68
28 Nisan 2015 Salı	198	64	64	71	65
29 Nisan 2015 Çarşamba	208	67	67	73	67
30 Nisan 2015 Perşembe	218	70	69	76	70

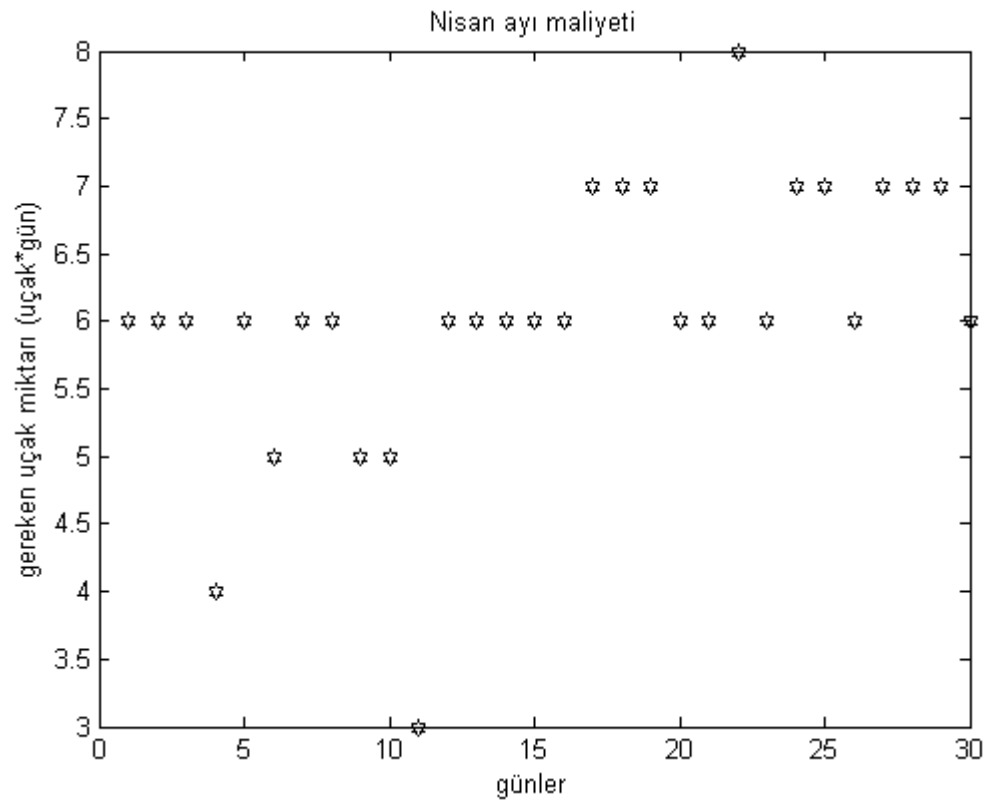
Nisan ayında elde edilen günlük sağlam çözümler incelenirse, her gün için δ_{S1}^* ve δ_{S3}^* SURM'lerinin δ_{S2}^* SURM'nden daha iyi sonuç verdiği söylenebilir.

Sağlamlık maliyeti (SM), kısaca, bir sağlam çözümün nominal çözümden farkıdır. Bir başka deyişle, bir sağlam çizelge elde edilmesi için gereken fazladan uçak sayısıdır. SM'nin bir başka tanımı ise; 'gecikmelerin olduğu durumda tüm uçuş ayaklarının gerçekleştirilmesi için gereken toplam uçak sayısının gecikmelerin olmadığı durumda uçuş ayaklarının tümünün gerçekleştirilmesi için gereken toplam uçak sayısından farkıdır' olabilir.

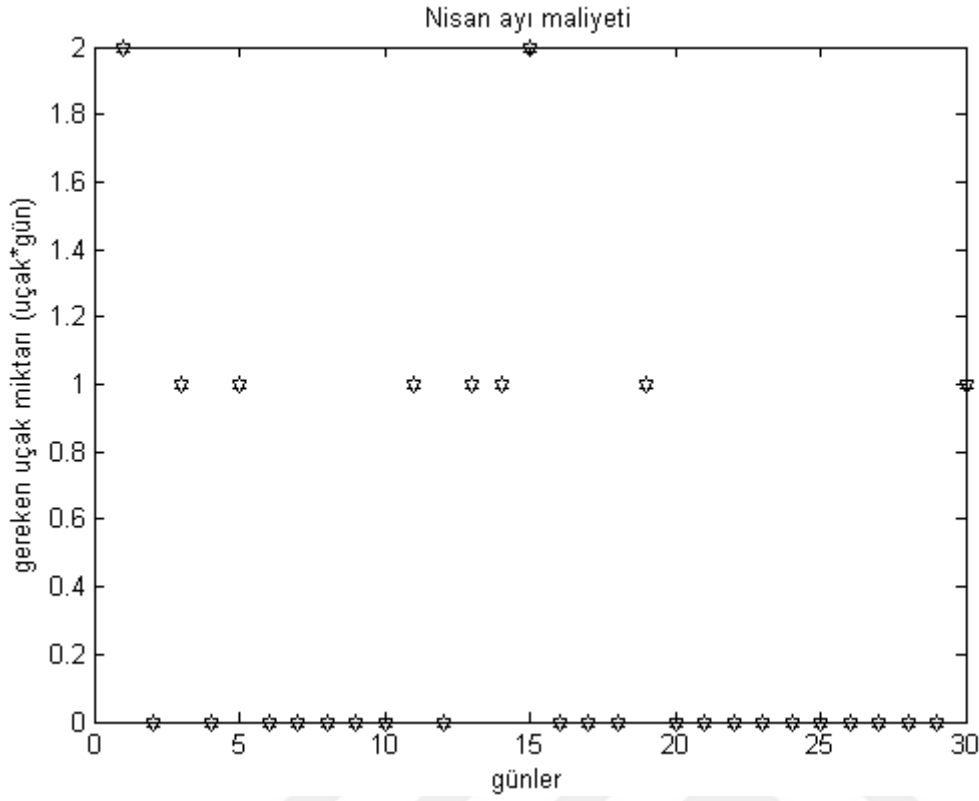
Çizelge 6.6'dan hareketle, Nisan ayındaki 30 gün için δ_{S1}^* , δ_{S2}^* ve δ_{S3}^* SURM'lerinin sağlamlık maliyetleri Şekil 6.2 – 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.2. δ_{S1}^* SUR alt probleminde Nisan ayı sağlık maliyetleri



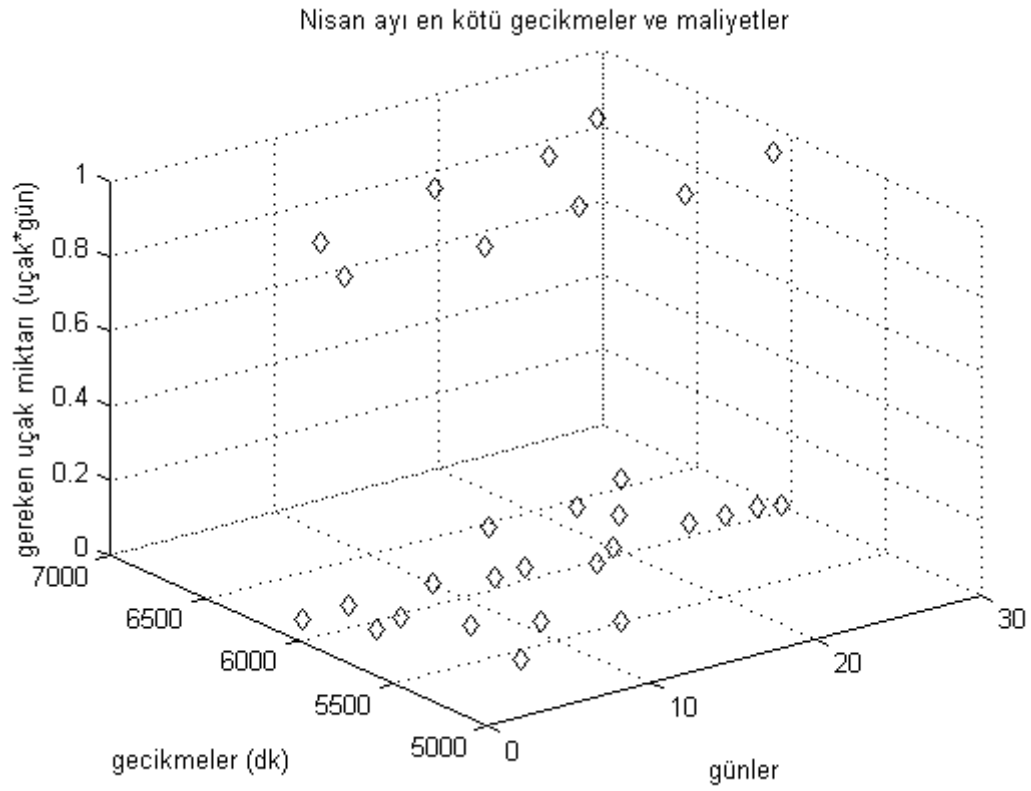
Şekil 6.3. δ_{S2}^* SUR alt probleminde Nisan ayı sağlık maliyetleri



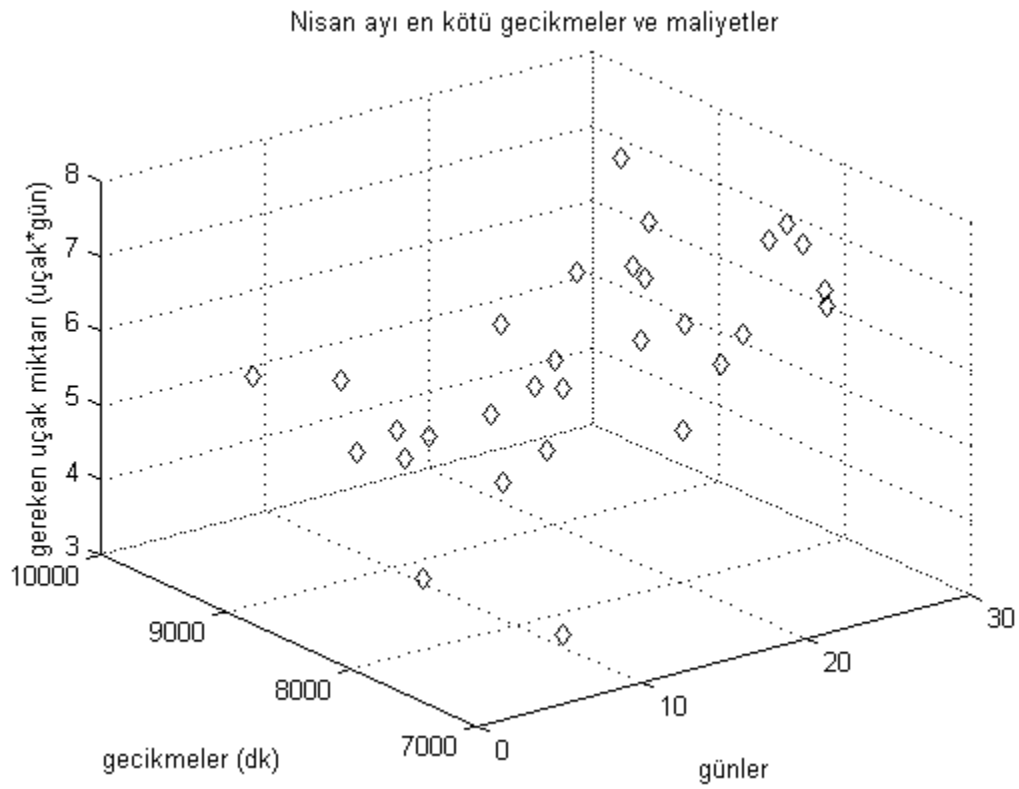
Şekil 6.4. δ_{s3}^* SUR alt probleminde Nisan ayı sağlamlık maliyetleri

Çizelge 6.6'dan da anlaşıldığı üzere, Nisan ayında δ_{s2}^* modelinin nispeten kötü sonuç verdiği görülmektedir. Buna rağmen, δ_{s1}^* SURM Nisan ayı boyunca toplamda 9 uçak * gün maliyete katlanmayı gerektirirken δ_{s3}^* SURM ise Nisan ayı boyunca 11 uçak * gün maliyete katlanmayı gerektirmektedir.

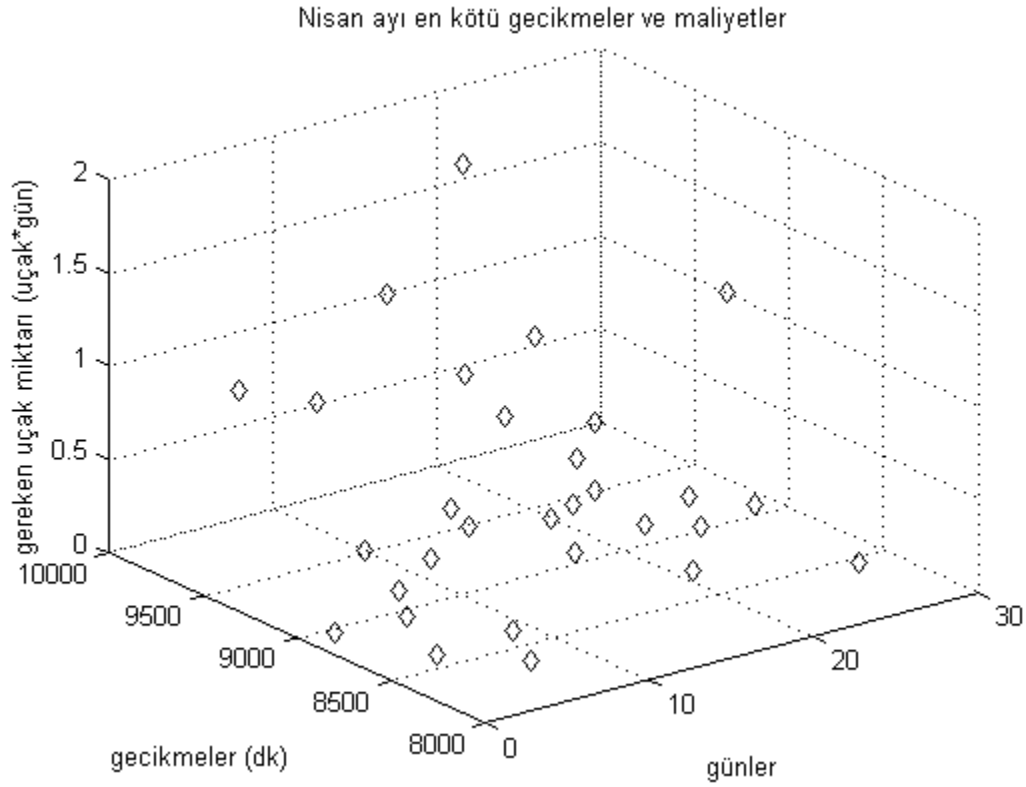
Dikkat edilirse, Nisan ayındaki 30 gün için EKDG ile SM'leri ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Ancak bu performans ölçütlerinin bir arada değerlendirilmesi gereklidir. Bu yüzden, SUR alt probleminde son derece önemli olan bu performans ölçütleri δ_{s1}^* , δ_{s2}^* ve δ_{s3}^* SURM'leri için Şekil 6.5 -6.7'de birlikte gösterilmiştir.



Şekil 6.5. δ_{S1}^* SUR alt probleminde Nisan ayı EKDG ve SM'leri



Şekil 6.6. δ_{S2}^* SUR alt probleminde Nisan ayı EKDG ve SM'leri



Şekil 6.7. δ_{S3}^* SUR alt probleminde Nisan ayı EKDG ve SM'leri

Böylece, SUR alt problemi için son derece önemli olan EKDG ve SM performans ölçütleri Nisan ayı için bir arada değerlendirilebilir hale getirilmiştir. Buna göre, δ_{S2}^* SURM'nin diğer SURM'ne göre daha kötü sonuç verdiği, δ_{S1}^* ve δ_{S3}^* SURM'lerinin ise birbirleriyle rekabet edebileceği görülmektedir.

Aşağıda, Mayıs ayındaki her gün için δ_1 , δ_{S1}^* , δ_{S2}^* , ve δ_{S3}^* SURM'lerinden elde edilen nominal ve sağlam çözümler verilmiştir.

Çizelge 6.7. Mayıs ayı için UR ve SUR modellerinin gerektirdiği uçak sayıları

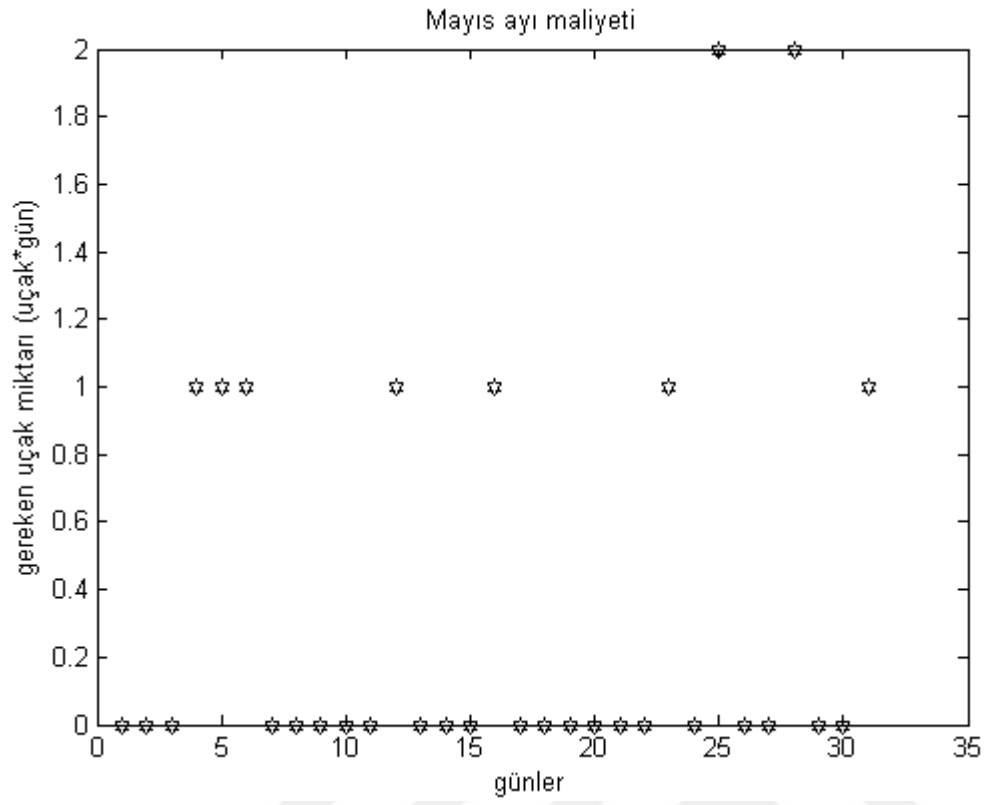
Tarih	Gerçekleştirilen uçuş ayağı sayısı	Nominal çözüm (δ_1)	Sağlam çözüm (δ_{S1}^*)	Sağlam çözüm (δ_{S2}^*)	Sağlam çözüm (δ_{S3}^*)
1 Mayıs 2015 Cuma	229	73	74	80	73
2 Mayıs 2015 Cumartesi	205	67	67	72	68
3 Mayıs 2015 Pazar	220	72	72	78	72
4 Mayıs 2015 Pazartesi	225	73	73	79	73
5 Mayıs 2015 Salı	202	66	66	73	67
6 Mayıs 2015 Çarşamba	215	71	72	78	71

Çizelge 6.7. (devam) Mayıs ayı için UR ve SUR modellerinin gerektirdiği uçak sayıları

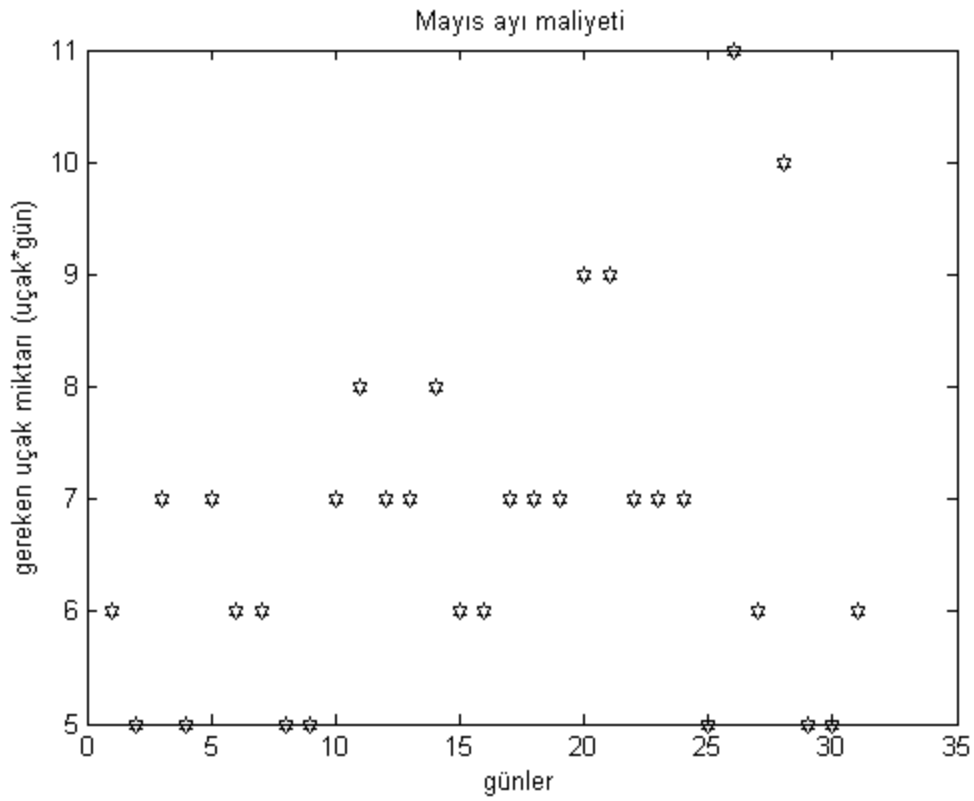
7 Mayıs 2015 Perşembe	210	66	66	73	67
8 Mayıs 2015 Cuma	228	76	75	81	76
9 Mayıs 2015 Cumartesi	201	67	67	73	68
10 Mayıs 2015 Pazar	208	68	69	76	69
11 Mayıs 2015 Pazartesi	211	68	68	77	69
12 Mayıs 2015 Salı	195	65	65	72	65
13 Mayıs 2015 Çarşamba	203	68	69	77	69
14 Mayıs 2015 Perşembe	211	68	68	75	69
15 Mayıs 2015 Cuma	228	76	76	83	77
16 Mayıs 2015 Cumartesi	212	70	72	76	70
17 Mayıs 2015 Pazar	220	73	73	79	73
18 Mayıs 2015 Pazartesi	215	70	72	79	72
19 Mayıs 2015 Salı	212	71	70	78	71
20 Mayıs 2015 Çarşamba	214	71	71	80	72
21 Mayıs 2015 Perşembe	213	70	69	78	70
22 Mayıs 2015 Cuma	221	74	75	81	74
23 Mayıs 2015 Cumartesi	211	71	72	78	71
24 Mayıs 2015 Pazar	215	72	73	80	72
25 Mayıs 2015 Pazartesi	228	75	77	82	76
26 Mayıs 2015 Salı	207	70	70	80	70
27 Mayıs 2015 Çarşamba	218	74	74	82	75
28 Mayıs 2015 Perşembe	220	71	72	81	72
29 Mayıs 2015 Cuma	231	77	78	83	77
30 Mayıs 2015 Cumartesi	213	73	72	78	73
31 Mayıs 2015 Pazar	228	78	79	85	79

Dikkat edilirse, δ_{S1}^* ve δ_{S3}^* SURM'leri nominal çözüme oldukça yakın sonuçlar üretirken δ_{S2}^* SURM'nden elde edilen çözümler nispeten nominal çözümden uzaktır. Hatırlanacağı üzere, bu durum Nisan ayı için de geçerli idi.

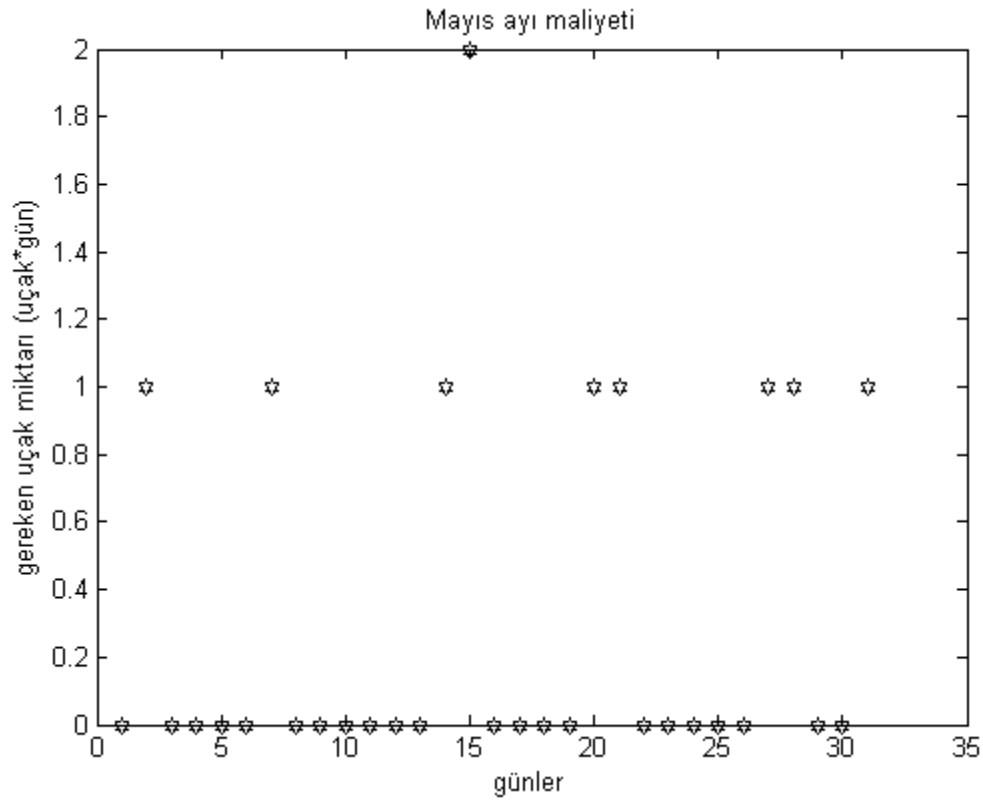
Mayıs ayındaki 31 gün için δ_{S1}^* , δ_{S2}^* , ve δ_{S3}^* SURM'lerinin SM'leri ise Şekil 6.8-10'da verilmiştir.



Şekil 6.8. δ_{S1}^* SUR alt probleminde Mayıs ayı sağlamlık maliyetleri



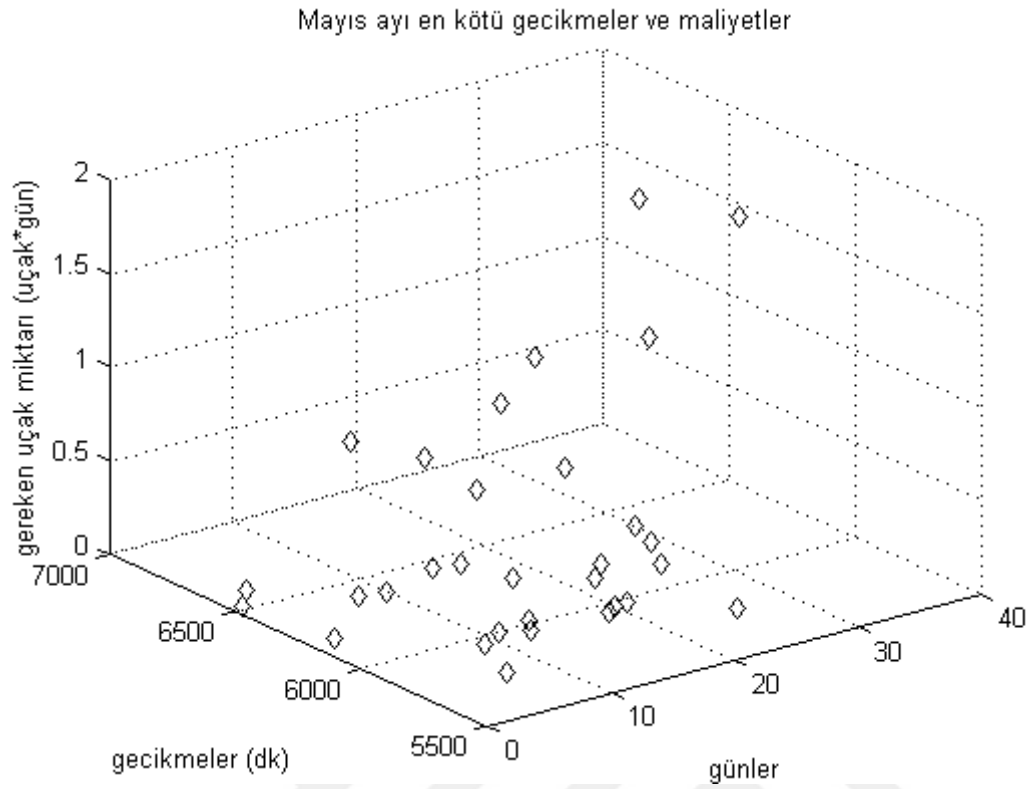
Şekil 6.9. δ_{S2}^* SUR alt probleminde Mayıs ayı sağlamlık maliyetleri



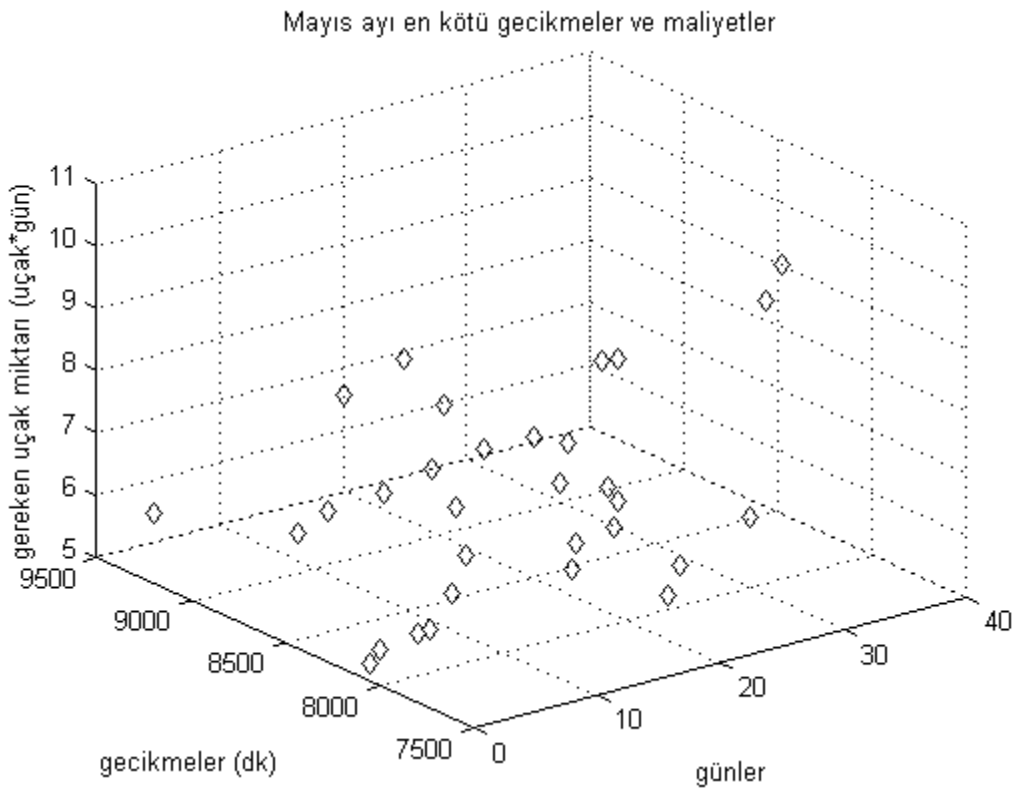
Şekil 6.10. δ_{S3}^* SUR alt probleminde Mayıs ayı sağlık maliyetleri

Mayıs ayında, δ_{S2}^* SURM'nin yine nispeten kötü sonuç verdiği görülmektedir. Buna rağmen, δ_{S1}^* SURM Mayıs ayı boyunca toplamda 11 uçak*gün maliyete katlanmayı gerektirirken δ_{S3}^* SURM ise Mayıs ayı boyunca 10 uçak*gün maliyete katlanmayı gerektirmektedir.

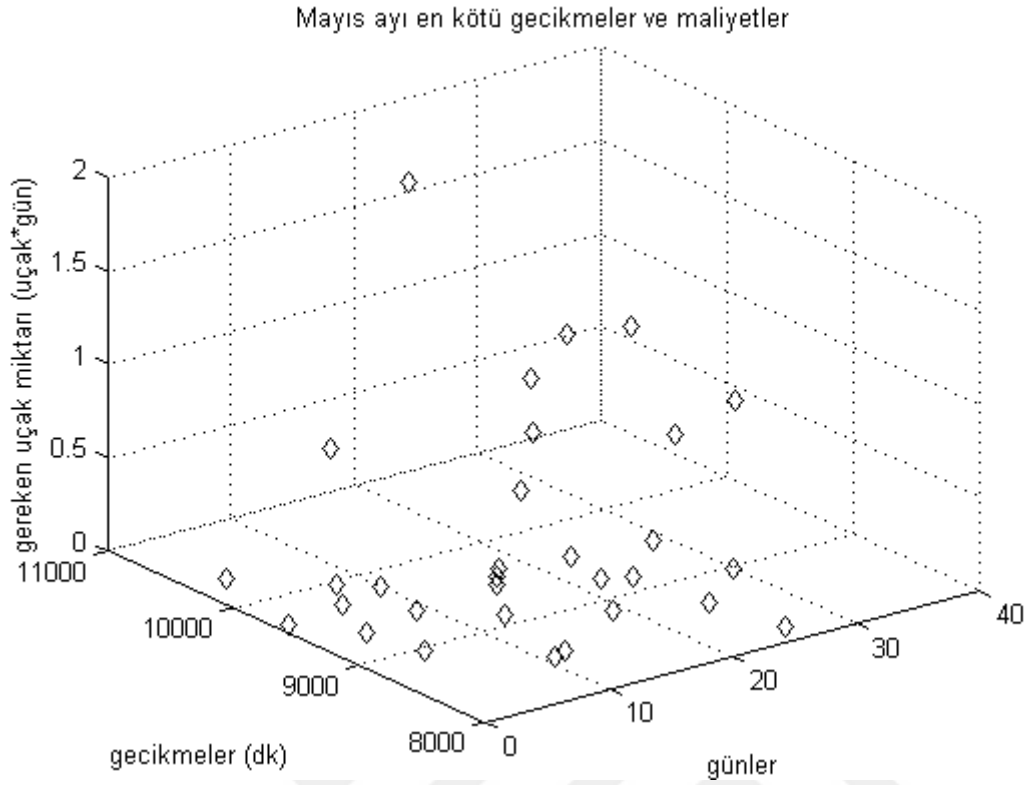
Yine, Mayıs ayındaki 31 gün için de hem EKDG hem de SM performans ölçütleri Şekil 6.11 – 6.13'te bir arada gösterilmiştir.



Şekil 6.11. δ_{S1}^* SUR alt probleminde Mayıs ayı EKDG ve SM'leri



Şekil 6.12. δ_{S2}^* SUR alt probleminde Mayıs ayı EKDG ve SM'leri



Şekil 6.13. δ_{S3}^* SUR alt probleminde Mayıs ayı EKDG ve SM'leri

Böylece, SUR alt problemi için son derece önemli olan EKDG ve SM performans ölçütleri Mayıs ayı için bir arada değerlendirilebilir hale getirilmiştir. Buna göre, δ_{S2}^* SURM'nin diğer SURM'ne göre daha kötü sonuç verdiği, δ_{S1}^* ve δ_{S3}^* SURM'lerinin ise birbirleriyle rekabet edebileceği görülmektedir.

EKG ve SM performans ölçütlerinin bir arada değerlendirilmesi hayati önem taşımaktadır. Yine de, bu yeterli olmayacaktır. Çünkü ilgili günde tüm uçuş ayaklarının en kötü durum gecikmelerinin gerçekleşme ihtimali bulunmasına rağmen bu durumun gerçekleşmesi genellikle zordur. Dolayısı ile EKDG performans ölçütü tek başına yanıltıcı olacaktır. Önerilen sağlam çözümlerin daha makul gecikmeler altında değerlendirilmesi daha doğru sonuçları beraberinde getirecektir. Bu nedenle, δ_{S1}^* , δ_{S2}^* , ve δ_{S3}^* SURM'nin karşılaştırılmasında kullanılmak üzere daha makul gecikmeleri göz önünde bulunduran daha zeki performans ölçütlerine ihtiyaç vardır. Bir sonraki alt bölümde, daha makul gecikmeleri göz önünde bulunduran üç farklı performans ölçütü tanımlanmıştır.

6.8. Deneysel Çalışma

Dikkat edilirse, buraya kadar her bir SURM gereği planlama dönemi boyunca yaşanabilecek en kötü durum gecikmeleri dikkate alınmıştır. Örneğin, $\Theta_1 = \{\zeta_i \mid 0 \leq \zeta_i \leq f_1(\mathbf{D}_1), \forall i \in F\}$ belirsizlik kümesi i uçuş ayağı için $\Theta_{1i} = \{\zeta_i \mid 0 \leq \zeta_i \leq f_1(\mathbf{D}_1), \forall i \in F\}$ olacaktır. Bu belirsizlik kümesinin yansıması ise $f_1(\mathbf{D}_1)$ veya 0 olacaktır. Ancak, gerçek hayatta ζ_i , bu kadar uç değerler almayabilir. Bu nedenle, bu tez çalışması kapsamında en kötü durum gecikmeleri ve sağlık maliyetlerinin yanında simülasyon tabanlı üç yeni performans ölçütü geliştirilmiştir. Bu alt bölümde, bahsedilen yeni performans ölçütleri ve bu performans ölçütlerinin belirlenmesi için tasarlanan deneysel çalışma tanıtılacaktır.

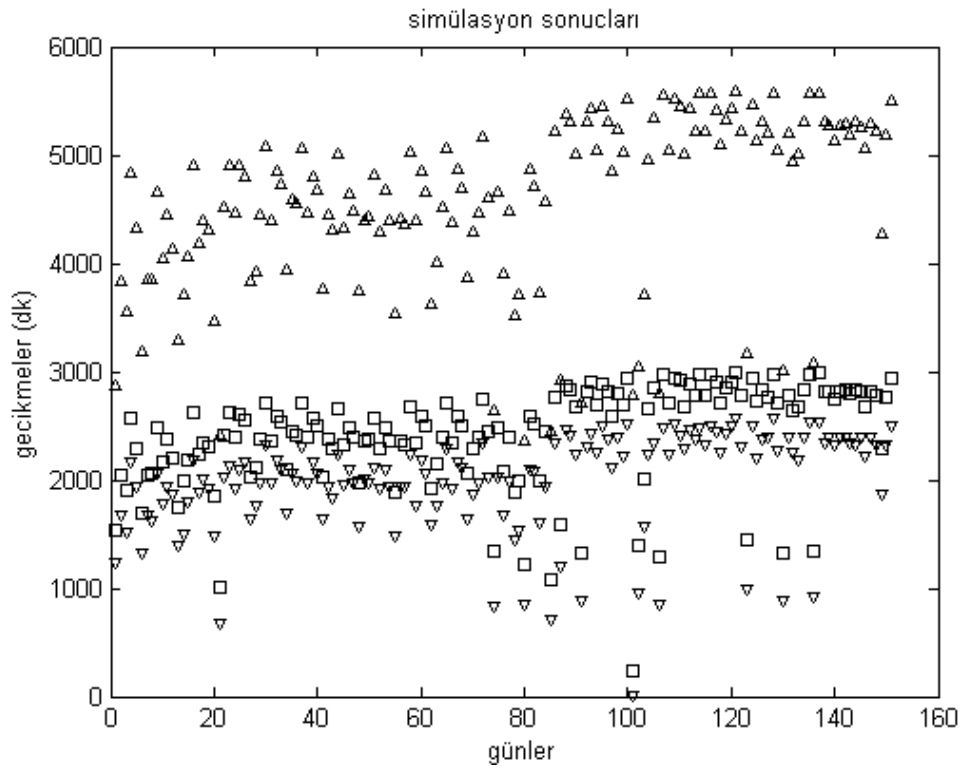
Deneysel çalışmada, tüm planlama dönemi ele alınmıştır. Öncelikle, her bir $t \in T$ günü için rassal uçuş ayaklarına MATLAB R2013a ortamında –belirsizlik kümesinin sınırları göz önünde bulundurularak– rassal gecikmeler verilmiştir.

MATLAB R2013a programlama dili, *rand* komutu ile (0,1) aralığında standard uniform dağılımına sahip rassal sayı(lar) üretir. Aşağıda, uniform dağılımın fonksiyonu verilmiştir:

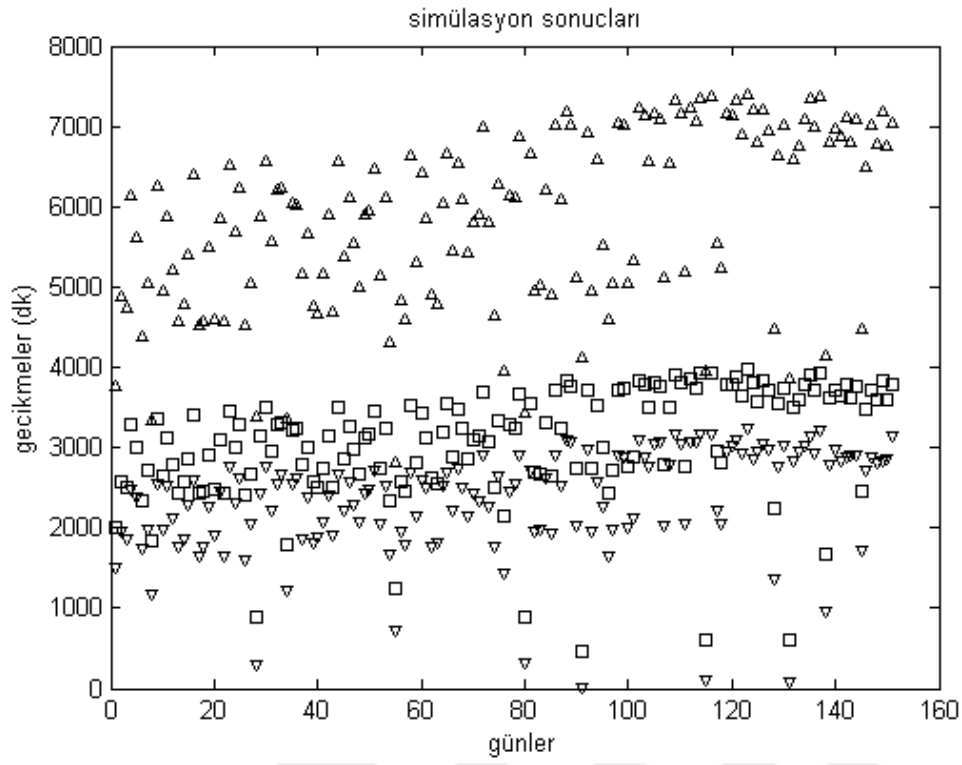
$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (6.30)$$

Örnek olay çalışmasında, rassal gecikmeler Θ belirsizlik kümesine bağlı olarak verilmiştir. a_i ve b_i , sırasıyla i uçuş ayağına verilecek rassal gecikmelerin alt ve üst limitlerini gösteriyor olsun. Bu durumda, $a_i = 0$ ve $b_i = f_1(\mathbf{D}_1)$ olacaktır. Burada, tasarlanan deneysel çalışmanın rassal gecikmenin verildiği uçuş ayağını gerçekleştirecek uçağın uçuş planını da göz önünde bulundurması şarttır. Bu durum daha açık olarak aşağıdaki gibi açıklanabilir. Bir k uçağı, geciken bir i uçuş ayağından hemen sonra j uçuş ayağını gerçekleştirecek olsun. i uçuş ayağına verilen gecikmeden ötürü k uçağı j uçuş ayağını zamanında gerçekleştiremiyor olabilir. Bu durumda, k uçağı j uçuş ayağını gerçekleştirebilir duruma gelene kadar j uçuş ayağı da ötelenmektedir.

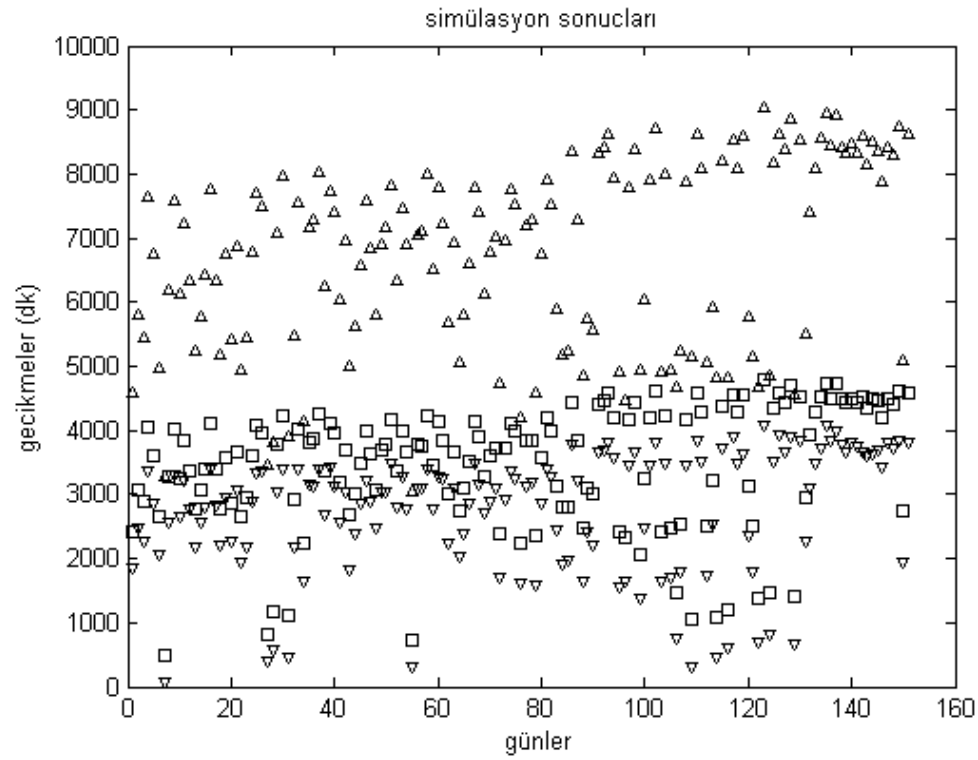
Planlama dönemi boyunca toplam 151 günün herbiri için 1000 koşturma yapılmıştır. Bu koşturmalar sonucu elde edilen en küçük, en büyük ve ortalama gecikmeler δ_{S1}^* , δ_{S2}^* , ve δ_{S3}^* için sırasıyla Şekil 6.14 – 6.16’da verilmiştir. Burada, yukarı yönlü üçgen simgesi ilgili günde yapılan 1000 koşturma sonunda elde edilen en büyük gecikmeyi, aşağı yönlü üçgen simgesi ilgili günde 1000 koşturma sonunda elde edilen en küçük gecikmeyi, kare simgesi ise ilgili günde 1000 koşturma sonunda elde edilen ortalama gecikmeyi ifade etmektedir.



Şekil 6.14. δ_{S1}^* için elde edilen rassal gecikmeler



Şekil 6.15. δ_{S2}^* için elde edilen rassal gecikmeler



Şekil 6.16. δ_{S3}^* için elde edilen rassal gecikmeler

Daha açık ifade edilirse, sağlam çizelgeleri karşılaştırabilmek için EKDG'nin yanı sıra tasarlanan deneysel çalışma kullanılarak sisteme verilen gecikmeler de dikkate alınmıştır. Bu gecikmeler, deneysel çalışmanın, ilgili SURM'nin ilgili günde 1000 defa koşturulması ile elde edilen en küçük gecikme (DÇEKG), ortalama gecikme (DÇOG) ve en büyük gecikme (DÇEBG) değerleridir. Bir başka deyişle, daha makul gecikmeler ile değerlendirme yapabilen yeni geliştirilen zeki performans ölçütleri DÇEKG, DÇOG ve DÇEBG'dir. Böylece, normal şartlarda gerçekleşebilecek gecikmeler de temsil edilmiş olmaktadır.

6.9. Sonuçların Karşılaştırılması

Bölüm 6.2 – 6.8 dikkatle incelenirse, farklı belirsizlik kümelerinin farklı sonuçlara yol açtığı görülecektir. Bu aşamada, farklı sonuçlar üreten SURM'lerinin sağlıklı bir şekilde karşılaştırılması elzemdir. Bu amaçla, yazar tarafından 3 farklı SURM'nin hem EKDG, hem deneysel çalışma sonuçları, hem de SM'leri açısından aynı anda karşılaştırılması önerilmektedir. Böylece hem en kötü durumun gerçekleşme ihtimali göz ardı edilmemiş olacak, hem de daha olası gecikmelerin gerçekleşme ihtimali de karar vermede etkili olacaktır. Bunun yanında, elbette çok önemli bir kriter olan SM de göz önünde bulundurulacaktır. Böylece, bir SURM'ni değerlendirebilmek için 5 performans ölçütü dikkate alınmış olmaktadır. Bu performans ölçütleri, tasarlanan deneysel çalışmada ilgili gündeki tüm uçuş ayakları için üretilen en küçük gecikmelerin dk cinsinden toplamı (DÇEKG), tasarlanan deneysel çalışmada ilgili gündeki tüm uçuş ayakları için üretilen ortalama gecikmelerin dk cinsinden toplamı (DÇOG), tasarlanan deneysel çalışmada ilgili gündeki tüm uçuş ayakları için üretilen en büyük gecikmelerin dk cinsinden toplamı (DÇEBG), ilgili gün için hesaplanan EKDG ve SM olarak tanımlanmıştır. SM, ilgili gün için sağlam çözümde elde edilen amaç fonksiyonu değerinin nominal çözümde elde edilen amaç fonksiyonu değerinden farkıdır. Bir başka deyişle, ilgili günde sağlam çizelgeyi gerçekleştirmek için gereken en az uçak sayısı ile ilgili günde nominal çizelgeyi gerçekleştirmek için gereken en az uçak sayısının farkıdır.

Bu aşamada, bir SURM'nin diğer bir SURM'ne baskın olabilmesinin şartları tanımlanmalıdır. Hatırlanacağı üzere, tez çalışması boyunca *kesin sağlamlık* kavramı vurgulanmıştır. Bu durumda, bir SURM'nin, diğer bir SURM'ne baskın olabilmesi için, o SURM'nin tüm performans ölçütleri açısından diğer SURM'nden daha iyi olması gerekir. Buradan hareketle, bir SURM'nin diğer bir SURM'ne baskın olabilmesi için daha önce

tanımlanan 5 performans ölçütünün tümüne göre daha iyi olmalıdır. Özetle, baskın bir SURM, daha fazla gecikmeye daha az maliyetle dayanıklı olmalıdır. Baskınlık kavramı matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir: bir δ_{SX}^* , X SURM'ni; δ_{SY}^* , Y SURM'ni gösteriyor iken; eğer bir δ_{SX}^* modelinden elde edilen çözüm $(\delta_{SX}^*)_{D\check{C}EKG} \geq (\delta_{SY}^*)_{D\check{C}EKG}$, $(\delta_{SX}^*)_{D\check{C}OG} \geq (\delta_{SY}^*)_{D\check{C}OG}$, $(\delta_{SX}^*)_{D\check{C}EBG} \geq (\delta_{SY}^*)_{D\check{C}EBG}$ ve $(\delta_{SX}^*)_{SM} \leq (\delta_{SY}^*)_{SM}$ şartlarını sağlıyorsa δ_{SX}^* modeli, δ_{SY}^* modeline baskındır denir ve $\delta_{SX}^* \succ \delta_{SY}^*$ şeklinde gösterilir.

Bu performans ölçütlerine dayalı olarak yapılan SURM'lerinin karşılaştırılması, günler temelinde Çizelge 6.8 – 6.9'da verilmeye çalışılmıştır. Burada SURM₁, δ_{S1}^* modelini; SURM₂, δ_{S2}^* modelini; SURM₃, δ_{S3}^* modelini; DÇEKG, ilgili günde tüm uçuş ayakları için 1000 koşturmada üretilen en küçük gecikmelerin dk cinsinden toplamını; DÇOG, ilgili günde tüm uçuş ayakları için 1000 koşturmada üretilen ortalama gecikmelerin dk cinsinden toplamını; DÇEBG, ilgili günde tüm uçuş ayakları için 1000 koşturmada üretilen en büyük gecikmelerin dk cinsinden toplamını; SM ise sağlamlık maliyetini uçak*gün cinsinden göstermektedir. Özetle, Çizelge 6.8 – 6.9'da SM ile gösterilen maliyet, sağlam çizelgenin gerçekleştirilmesi için kaç adet fazla uçak gerektiğini göstermektedir. Burada, uçak*gün birimine biraz daha yakından bakılacak olursa, 1 birim uçak*gün fazladan bir uçağın bir gün kullanılmasını ifade etmektedir. Örneğin, 1 uçak*gün, yalnız 1 fazladan uçağın yalnız 1 gün kullanılmasını, 2 uçak*gün ise fazladan 2 uçağın yalnız bir gün kullanılmasını veya fazladan 1 uçağın 2 farklı günde kullanılmasını ifade eder. Burada, fazladan uçak kullanımının, nominal çözüme kıyasla kullanıldığına dikkat edilmesi gerekir.

Çizelge 6.8. Nisan ayı için SURM'lerinin karşılaştırılması

	SURM ₁ (δ_{s1}^*)					SURM ₂ (δ_{s2}^*)					SURM ₃ (δ_{s3}^*)					BM
	DÇEKG	DÇOĞ	DÇEBG	EKDG	SM	DÇEKG	DÇOĞ	DÇEBG	EKDG	SM	DÇEKG	DÇOĞ	DÇEBG	EKDG	SM	
1.4.2015	887	1332	2714	58412	1	1	460	4129	7703	6	3667	4393	8322	9300	2	SURM ₁ /SURM ₃
2.4.2015	2302	2822	5300	6151	0	2983	3710	6927	9046	6	3709	4467	8408	9661	0	SURM ₃
3.4.2015	2424	2897	5433	6141	1	1951	2742	4960	8035	6	3808	4582	8621	10381	1	SURM ₃
4.4.2015	2251	2688	5046	5938	0	2565	3528	6590	7954	4	3567	4185	7939	9240	0	SURM ₃
5.4.2015	2495	2893	5444	6171	0	2257	2992	5522	8737	6	1571	2432	4916	10051	1	SURM ₁ /SURM ₃
6.4.2015	2373	2810	5312	5979	0	1656	2445	4594	8734	5	1658	2343	4476	9660	0	SURM ₃
7.4.2015	2110	2590	4856	5433	0	1984	2714	5044	7355	6	3445	4162	7800	9090	0	SURM ₃
8.4.2015	2401	2798	5230	5784	0	2913	3724	7044	7938	6	3671	4451	8385	9900	0	SURM ₃
9.4.2015	2214	2691	5032	5796	1	2883	3741	7022	7970	5	1389	2052	4929	9390	0	SURM ₃
10.4.2015	2515	2945	5526	6163	0	1997	2765	5039	8690	5	2471	3254	6051	10261	0	SURM ₃
11.4.2015	1	234	2786	5675	0	2132	2882	5327	7764	3	3470	4198	7907	9540	1	SURM ₁ /SURM ₃
12.4.2015	959	1402	3041	6322	1	3101	3842	7221	8113	6	3808	4613	8710	10051	0	SURM ₃
13.4.2015	1575	2007	3716	6092	0	2878	3786	7141	8012	6	1652	2406	4905	10020	1	SURM ₁ /SURM ₃
14.4.2015	2234	2662	4955	5515	0	2768	3504	6569	7197	6	3498	4243	7992	9390	1	SURM ₁ /SURM ₃
15.4.2015	2335	2854	5347	6103	0	3041	3813	7155	8344	6	1701	2469	4943	10231	2	SURM ₁ /SURM ₃
16.4.2015	854	1296	2796	5905	1	3067	3762	7091	8898	6	748	1462	4665	10260	0	SURM ₃
17.4.2015	2480	2970	5549	6471	0	2037	2794	5126	8431	7	1807	2528	5239	10470	0	SURM ₃
18.4.2015	2233	2714	5036	5990	0	2799	3498	6550	7242	7	3455	4171	7865	9871	0	SURM ₃
19.4.2015	2515	2937	5510	6325	1	3171	3913	7325	8149	7	312	1049	5136	10111	1	SURM ₃
20.4.2015	2413	2914	5450	6073	0	3047	3799	7151	8315	6	3831	4581	8622	10111	0	SURM ₃
21.4.2015	2298	2669	5017	5783	1	2064	2777	5188	7803	6	3505	4297	8083	9480	0	SURM ₃
22.4.2015	2463	2889	5429	6435	0	3078	3849	7234	8737	8	1725	2516	5065	10350	0	SURM ₃
23.4.2015	2372	2786	5220	6307	0	3077	3745	7058	8353	6	2531	3216	5913	9961	0	SURM ₃
24.4.2015	2477	2974	5573	6511	1	3160	3923	7336	8766	7	469	1092	4813	10260	0	SURM ₃
25.4.2015	2327	2789	5226	6101	0	106	610	3958	7502	7	3721	4366	8210	9750	0	SURM ₃
26.4.2015	2503	2973	5566	6554	0	3167	3927	7380	9156	6	599	1201	4821	10530	0	SURM ₃
27.4.2015	2441	2900	5418	6089	0	2209	2965	5537	8206	7	3896	4562	8541	9990	0	SURM ₃
28.4.2015	2249	2712	5100	5923	1	2046	2803	5233	8073	7	3483	4297	8086	9210	0	SURM ₃
29.4.2015	2422	2856	5329	6093	0	2965	3797	7155	8328	7	3649	4551	8584	9810	0	SURM ₃
30.4.2015	2498	2908	5430	6049	0	3018	3798	7138	8137	6	2363	3123	5774	10140	1	SURM ₁ /SURM ₃

Çizelge 6.9. Mayıs ayı için SURM'lerinin karşılaştırılması

	SURM ₁ (δ_{s1}^*)					SURM ₂ (δ_{s2}^*)					SURM ₃ (δ_{s3}^*)					BM
	DÇEKG	DÇOĞ	DÇEBG	EKDG	SM	DÇEKG	DÇOĞ	DÇEBG	EKDG	SM	DÇEKG	DÇOĞ	DÇEBG	EKDG	SM	
1.5.2015	2566	2989	5580	6519	0	3096	3881	7314	9259	6	1797	2504	5156	10320	0	SURM ₁ /SURM ₃
2.5.2015	2315	2779	5226	6208	0	2921	3654	6901	8182	5	708	1384	4672	10111	1	SURM ₃
3.5.2015	988	1439	3166	6605	0	3230	3967	7406	8470	7	4075	4799	9037	11191	0	SURM ₃
4.5.2015	2494	2932	5467	6239	1	2859	3819	7208	8266	5	803	1462	4849	10021	0	SURM ₃
5.5.2015	2201	2730	5134	5785	1	2948	3580	6798	7874	7	3524	4343	8184	9720	0	SURM ₃
6.5.2015	2372	2828	5305	6043	1	3062	3832	7216	8822	6	3930	4597	8622	10500	0	SURM ₃
7.5.2015	2396	2768	5202	5765	0	2984	3710	6934	8075	6	3669	4446	8368	9120	1	SURM ₁ /SURM ₃
8.5.2015	2563	2976	5566	6403	0	1375	2245	4474	8316	5	3898	4711	8848	10680	0	SURM ₃
9.5.2015	2279	2709	5050	5953	0	2759	3557	6638	8325	5	668	1404	4558	10260	0	SURM ₃
10.5.2015	888	1331	3011	6390	0	3028	3747	7010	8248	7	3837	4535	8524	10531	0	SURM ₃
11.5.2015	2397	2789	5198	5996	0	73	610	3861	7763	8	2275	2949	5503	9150	0	SURM ₃
12.5.2015	2255	2638	4939	5781	1	2844	3497	6591	7750	7	3102	3933	7415	9300	0	SURM ₃
13.5.2015	2181	2679	5015	5963	0	2956	3605	6750	8571	7	3496	4291	8097	9841	0	SURM ₃
14.5.2015	2398	2831	5303	6020	0	3022	3782	7094	8577	8	3719	4525	8550	9721	1	SURM ₁ /SURM ₃
15.5.2015	2534	2969	5566	6449	0	3145	3908	7355	8959	6	4094	4743	8941	10921	2	SURM ₁ /SURM ₃
16.5.2015	917	1334	3075	6231	1	2943	3722	6996	8028	6	3857	4493	8447	10231	0	SURM ₃
17.5.2015	2543	2990	5570	6433	0	3206	3918	7366	9295	7	3979	4741	8921	10261	0	SURM ₃
18.5.2015	2338	2821	5299	6283	0	966	1676	4133	8621	7	3778	4502	8421	10531	0	SURM ₃
19.5.2015	2401	2809	5270	5943	0	2778	3612	6813	7981	7	3675	4428	8333	9540	0	SURM ₃
20.5.2015	2328	2748	5136	5969	0	2972	3717	6963	8133	9	3808	4489	8457	10350	1	SURM ₁ /SURM ₃
21.5.2015	2386	2808	5266	5976	0	2841	3645	6870	8115	9	3761	4424	8336	9211	1	SURM ₁ /SURM ₃
22.5.2015	2401	2838	5289	6151	0	2878	3798	7105	8618	7	3661	4540	8578	9960	0	SURM ₃
23.5.2015	2343	2791	5188	6435	1	2899	3615	6800	8503	7	3620	4335	8156	10260	0	SURM ₃
24.5.2015	2321	2840	5315	6223	0	2898	3759	7077	9440	7	3638	4504	8508	9871	0	SURM ₃
25.5.2015	2390	2817	5263	6117	2	1729	2448	4469	8105	5	3684	4461	8360	9330	0	SURM ₃
26.5.2015	2226	2682	5066	5783	0	2712	3471	6499	7567	11	3428	4213	7887	8850	0	SURM ₃
27.5.2015	2395	2816	5284	6130	0	2895	3717	7005	8556	6	3814	4484	8406	10770	1	SURM ₁ /SURM ₃
28.5.2015	2326	2786	5217	5873	2	2812	3605	6768	7783	10	3733	4405	8291	9510	1	SURM ₃
29.5.2015	1862	2288	4264	6269	0	2842	3844	7187	8307	5	3847	4627	8725	10321	0	SURM ₃
30.5.2015	2333	2766	5183	6384	0	2866	3586	6744	8714	5	1942	2734	5096	9630	0	SURM ₃
31.5.2015	2503	2936	5496	6377	1	3144	3775	7046	8064	6	3824	4589	8614	10591	1	SURM ₃

δ_{S1}^* SURM'nin 01.01.2015 günkü performansına bakılacak olursa, en az 1238 dk'lık, ortalama 1539 dk'lık, en çok 2872 dk'lık, en kötü durumda ise 3415 dk'lık gecikmeden 8 uçak kullanılarak kaçınılmaktadır. δ_{S2}^* ve δ_{S3}^* 'n sonucu önerilen çizelgeler de benzer şekilde yüksek miktarda fazladan uçak kullanımını gerektirmektedir. Fazladan bir uçak kullanmanın maliyetinin oldukça yüksek olduğu düşünülecek olursa, 01.01.2015 tarihindeki bu gecikmelerden kurtulmak için bu maliyetlere katlanmanın akıllıca olmadığı açıkça görülecektir. Bu durum, Ocak ayı boyunca, bir başka deyişle 01.01.2015-31.01.2015 tarihleri arasındaki her gün için geçerlidir. Dolayısı ile, Ocak ayında bu gecikmelerden kesinlikle etkilenmeyecek bir sağlam izelge ile uçuş ayaklarını gerçekleştirmek yerine gecikmelere katlanılmasına, veya en azından daha makul maliyete sahip sağlam izelge arayışına girmek gerektiğine karar verilmelidir.

Diğer aylar için benzer incelemelerde bulunulursa, δ_{S2}^* modelinin hemen her gün için oldukça kötü sonuç verdiği ve Ocak ayı haricindeki hiçbir gün için δ_{S1}^* veya δ_{S3}^* modellerinden daha az maliyetli sonuç vermediği görülecektir. Daha net bir ifadeyle, Ocak ayı haricindeki hiçbir gün için δ_{S2}^* modelinden elde edilen sonuç daha önce verilen baskınlık tanımı gereği $(\delta_{S2}^*)_{SM} \leq (\delta_{S1}^*)_{SM}$ veya $(\delta_{S2}^*)_{SM} \leq (\delta_{S3}^*)_{SM}$ olamayacağından δ_{S1}^* veya δ_{S3}^* 'e baskın olamayacaktır ve δ_{S2}^* modeli alternatifler kümesinden çıkarılabilir. Bölüm 6.2 incelenirse, δ_{S2}^* modelinin belirsizlik kümesinin üst limiti yaşanan gecikmelerin en büyüğü olduğu görülecektir. Bir diğer deyişle, Bölüm 6.1'de değinilen gerçekleşen gecikmelerin yapısında bulunan uç değerler de Θ_2 belirsizlik kümesine dahil edilmiş, böylece gerçekleşmesi g gecikmelerin de göz önünde bulundurulması nedeniyle nominal çözümden oldukça uzaklaılmıtır. Bu durumda, δ_{S2}^* modelinin, ubat, Mart, Nisan ve Mayıs ayları için δ_{S1}^* ve δ_{S3}^* modellerine baskın gelememesi normal karşılanabilir.

Diğer taraftan, 01.02.2015 tarihi için δ_{S1}^* ve δ_{S3}^* modellerinin maliyetleri gayet makul gözükmektedir. Örneğin δ_{S3}^* modeli, 01.02.2015 tarihi için fazladan uçağa ihtiyaç duymazken havayolu firmasını en az 2189 dk'lık, ortalama 2932 dk'lık, en çok 5481 dk'lık, tüm gecikmelerin en kötü durumu ile karılaıldığında ise 8310 dk'lık gecikmeden kurtarmaktadır. δ_{S1}^* ve δ_{S3}^* modelleri karşılaştırıldığında ise $(\delta_{S3}^*)_{DEKG} \geq (\delta_{S1}^*)_{DEKG}$,

$(\delta_{S_3}^*)_{D\check{C}OG} \geq (\delta_{S_1}^*)_{D\check{C}OG}$, $(\delta_{S_3}^*)_{D\check{C}EBG} \geq (\delta_{S_1}^*)_{D\check{C}EBG}$, $(\delta_{S_3}^*)_{EKDG} \geq (\delta_{S_1}^*)_{EKDG}$ olduğundan $\delta_{S_3}^*$ modelinin $\delta_{S_1}^*$ modelinden daha fazla gecikmeye engel olması beklenir. Bir de maliyetler kıyaslanacak olursa, $(\delta_{S_3}^*)_{SM} \leq (\delta_{S_1}^*)_{SM}$ olduğu görülecektir ki, bu da $\delta_{S_3}^*$ modelinin daha az maliyetle daha fazla gecikmeyi önlemesinin beklenmesi demektir. $\delta_{S_3}^*$ modelinin $\delta_{S_1}^*$ modeline kıyasla daha az maliyetle daha fazla gecikmeye dayanıklı olması beklenen bir çizelge önerdiğinden 01.02.2015 günü için, $\delta_{S_3}^*$ modeli $\delta_{S_1}^*$ modeline baskındır denilir ve dolayısı ile 01.02.2015 günü için için $\delta_{S_3}^*$ modeli ile elde edilen çizelgenin kullanılması kararı verilmelidir. Planlama dönemindeki hemen her gün, $\delta_{S_3}^*$ modelinin $\delta_{S_2}^*$ modelinden daha fazla gecikmeyi önlemesi ve hiçbir gün $\delta_{S_2}^*$ modelinin zaten makul bir maliyet sunmamasından ötürü aynı zamanda $\delta_{S_3}^* \succ \delta_{S_2}^*$ olacağına da dikkat edilmelidir. Benzer durum $\delta_{S_1}^*$ için düşünülecek olursa $\delta_{S_1}^* \succ \delta_{S_2}^*$ olacaktır.

Bu durumda, Şubat, Mart, Nisan ve Mayıs ayları için $\delta_{S_3}^*$ ve $\delta_{S_1}^*$ modellerinin rekabet edeceği anlaşılmaktadır. Şubat, Mart, Nisan ve Mayıs aylarındaki her gün için ayrı ayrı baskınlık incelendiğinde, toplam 120 günün 94'ünde $\delta_{S_3}^* \succ \delta_{S_1}^*$ olduğu, geri kalan 26 günde ise $(\delta_{S_3}^*)_{D\check{C}EKG} \geq (\delta_{S_1}^*)_{D\check{C}EKG}$, $(\delta_{S_3}^*)_{D\check{C}OG} \geq (\delta_{S_1}^*)_{D\check{C}OG}$, $(\delta_{S_3}^*)_{D\check{C}EBG} \geq (\delta_{S_1}^*)_{D\check{C}EBG}$, $(\delta_{S_3}^*)_{EKDG} \geq (\delta_{S_1}^*)_{EKDG}$ olduğu, ancak $(\delta_{S_3}^*)_{SM} \leq (\delta_{S_1}^*)_{SM}$ olmadığından $\delta_{S_3}^* \succ \delta_{S_1}^*$ denilemediği; bu durumda $\delta_{S_1}^*$ veya $\delta_{S_3}^*$ modellerinden herhangi birinin diğerine baskın gelmemesinden ötürü bir seçim yapılamadığı; ancak iki modelin de önerdiği çözümlerin nominal çözümden daha iyi olduğu; dolayısı ile bu iki modelden herhangi birinden üretilen çizelgenin kullanılması kararının verilmesi gerektiği görülmektedir.

Yukarıda yapılan çıkarımlar toparlanacak olursa, 151 günlük planlama döneminin ilk 30 gününde –Ocak ayı boyunca– hiçbir sağlam çizelgenin kullanılmaması ve nominal çizelgenin kullanılarak meydana gelen gecikmelere katlanılması gerektiği; geri kalan 120 günlük planlama dönemi boyunca $\delta_{S_3}^*$ modelinin büyük oranda diğer modellere baskın olduğu; daha net bir ifadeyle 120 günlük planlama döneminin 94 gününde $\delta_{S_3}^*$ modelinden elde edilen sağlam çizelgenin kullanılması gerektiği; geri kalan 26 günde ise $\delta_{S_1}^*$ veya $\delta_{S_3}^*$ modellerinden elde edilen sağlam çözümler nominal çözümden daha iyi sonuç vereceğinden

bu günlerde δ_{S1}^* veya δ_{S3}^* modellerinden herhangi birinden elde edilen çizelgenin kullanılması gerektiği söylenebilir. Dahası, 120 günlük planlama döneminin 86 gününde kullanılan uçak*gün sayısı değişmemekte, geri kalan 34 günde ise en çok 2 uçak*gün maliyete katlanılmaktadır. Daha açık ifade edilirse, 120 günlük planlama döneminin 86'sında maliyet artışı olmadan sağlamlık garanti edilebilmiş iken geri kalan 34 günde ise en çok 2 uçak*gün'lük maliyete katlanılarak sağlamlık garanti edilebilmiştir. Bu sonuçların havayolu firmalarının ilgisini oldukça çekeceği açıktır.

Nihai bir karara ulaşamayan 26 gün için, fazladan 1 uçak*gün kullanımının maliyeti ve bir uçuş ayağının 1 dk'lık gecikmesinin net maliyetleri bilinmediğinden kesin bir karar için tecrübe, sezgi, vs gibi objektif olmayan yollara başvurulabilir. Bunun yanında, gecikmeler dk cinsinden değil de yolcu*dk cinsinden değerlendirilirse daha doğru bir sonuca ulaşılabilir. Bir başka deyişle, daha fazla yolcusu olan bir uçuş ayağının daha az yolcusu olana göre daha önemli olduğu göz ardı edilmemiş olur. Bu durumda bile her bireyin öneminin aynı olmayacağından gerçek sonuçtan sapmalara yine katlanılmak zorunda kalınacaktır.

Günlük karşılaştırmalardan sonra, nihai bir karşılaştırmaya da gereksinim duyulabilir. Tüm planlama dönemi boyunca aynı kriterlerden yararlanılarak bir karşılaştırma yapılırsa, Çizelge 6.10 elde edilecektir. Burada, DÇEKG, DÇOG, DÇEBG, EKDG ve SM performans ölçütleri, ilgili SURM'nin tüm planlama dönemi -01.01.2015-31.05.2015 tarihleri arasındaki tüm günler- için bulunan günlük performans ölçütü değerlerinin toplamını ifade etmektedir.

Çizelge 6.10. Tüm planlama dönemi için SURM'lerinin karşılaştırılması

SURM	DÇEKG	DÇOG	DÇEBG	EKDG	Maliyet
δ_{S1}^*	247008	303779	578744	702140	45
δ_{S2}^*	291193	379226	722991	912310	772
δ_{S3}^*	343731	430358	830970	1088800	40

Çizelge 6.10 incelendiğinde, tüm planlama dönemi boyunca bir karşılaştırma yapılması halinde de $\delta_{s_3}^*$ modelinin gayet iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Toplamda milyon dk'ya varan gecikmelere karşı tamamen dayanıklı bir çizelgenin toplamda yalnızca 40 uçak * gün ile sağlanması gayet makul gözükmemektedir.





8. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında havayolu çizelgeleme problemlerinde daha önceden belirlenen gecikmelere tamamen dayanıklı yeni bir sağlam çizelgeleme yaklaşımı önerilmiş olup bu yaklaşım sağlam uçak rotalama alt problemine uygulanmıştır.

Bu tez kapsamında, HYÇP’nde SÇ ile ilgili literatürde tespit edilen boşluktan hareketle, iki sağlam çizelge tanımı önerilmiştir. *Tip I sağlam çizelge*, meydana gelmesi muhtemel olan, daha önceden açıkça tanımlanmış aksaklık(lar)ın önüne –bazı varsayımlar altında– *kesin olarak* geçebilen bir çizelgeyi tanımlarken; *tip II sağlam çizelge*, meydana gelmesi muhtemel olan, daha önceden açıkça tanımlanmış aksaklık(lar)dan ötürü oluşan YÇP’nin kabul edilebilir şartlar altında çözüme kavuşturulabildiğini *kesin olarak* garanti eden bir çizelgedir. Bu tez çalışmasında, öncelikli hedef *tip I sağlam çizelge* ile daha önceden tanımlanmış aksaklık(lar)ın önüne tamamen geçmek olarak belirlenmiştir. Eğer bu başarılamıyorsa veya yüksek maliyetli oluyorsa *tip II sağlam çizelge* elde edilmeye çalışılmalıdır. Bu tez kapsamında, bu sağlam çizelge tanımlarından yola çıkılarak yeni bir sağlamlık kavramı önerilmiş olup bu yaklaşımın HYÇP’ne uygulanabilirliği SUR alt problemi üzerinden gösterilmiştir.

2000’li yıllardan itibaren ivme kazanmaya başlayan SO yaklaşımı, tutucu (konservatif) özelliğe sahiptir. Bu özelliği ile *tip I sağlam çizelge* elde etmek için çok uygun bir araç gibi görünmektedir. Bu sebeple, SO yaklaşımının tip I sağlam çizelge elde edilmesinde kullanılıp kullanılmayağı araştırılmaya değerdir. Daha önce HYÇP’ne uygulanmamış olan SO yaklaşımı, ilk defa bu tez çalışmasında HYÇP’nin bir alt problemi olan SUR alt problemine başarıyla uygulanmıştır. Böylece, ilk defa *tip I sağlam çizelge* üreten bir matematiksel model geliştirilmiştir. Bu önemli başarı, bu tez çalışmasının literatüre önemli katkılarından biridir.

Teorik olarak *tip I sağlam çizelge* üreten bir matematiksel model geliştirilmiş olmasına rağmen bu modelin çözülebilir olması da son derece önemlidir. Bu aşamada, önerilen SURM’nin çözülebilirliği üzerinde durulmuştur. Bölüm 5.5 hatırlanacak olursa, elde edilen SURM’nin sonsuz sayıda kısıt içerdiği, bu yüzden çözümsüz olduğu tespit edilmiş idi. Çözümsüz olan bu model birtakım matematiksel operasyonlarla çözülebilir hale getirilebilmiştir. Bu sayede, UR alt problemi için *tip I sağlam çizelge* elde edilmesinin yolu büyük oranda açılmıştır. Burada, geliştirilen sağlamlık kavramının tüm HYÇP için geçerli

olduğu, bu tezde ise sağlamlık kavramının HYÇP'ne uygulanabilirliği UR alt problemi üzerinde gösterilmiştir.

Elde edilen SUR alt problemi büyük boyutlu optimizasyon problemi sınıfına girmektedir. Eldeki problemi çözümsüz hale getirebilecek bu sorun ile başa çıkılması hayati önem taşımaktadır. Bu sebeple, optimal çözümden feragat edilerek oldukça hızlı çözüm elde edilebilen, HYÇP literatürde *mevcut yaygın strateji* olarak adlandırılan sütun oluşturma tabanlı bir yaklaşım çözüm yöntemi olarak benimsenmiştir. Bu sayede eldeki SUR alt problemi çözüme kavuşturulabilmiş, böylece *tip I sağlam çizelge* elde edilebilmiştir.

Ele alınan SUR alt probleminde belirsiz olarak tanımlanan uçuş ayaklarında meydana gelebilecek gecikmeler incelenmiş, farklı belirsizlik kümeleri oluşturulmuştur. Farklı belirsizlik kümeleri neticesinde farklı SURM'leri ve farklı SURM'lerinden farklı çözümler elde edilmiştir. Bu aşamada, herbiri *tip I sağlam çizelge* olan bu sağlam çizelgelerin hangisinin ve/veya hangilerinin diğerlerinden iyi olduğu sorusu ortaya çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında, *tip I sağlam çizelgelerin* kıyaslanabilmesi için 5 farklı performans ölçütü geliştirilmiş ve bu performans ölçütlerine dayalı bir *baskınlık* kavramı ortaya atılmıştır.

SURM'nden elde edilen *tip I sağlam çizelgeler*, planlama dönemindeki 151 günün herbirinde günlük olarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmelere göre aşağıdaki sonuçlara varılmıştır. Ocak ayında hiçbir SURM'nin kullanılmayarak nominal çizelgede kalınması ve meydana gelebilecek gecikmelere katlanılması gerekmektedir. Bunun yanında, planlama dönemindeki –Ocak ayı haricindeki– 26 gün boyunca δ_{S1}^* ile δ_{S3}^* arasında kesin bir karara varılamazken her iki modelin de nominal çözümden daha iyi olduğu ve yine her iki modelin de makul maliyetler sunmasından ötürü bu modellerden herhangi birinin seçilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Son olarak, diğer tüm günlerde, bir başka deyişle 151 günlük planlama döneminin 94'ünde, δ_{S3}^* 'ün δ_{S1}^* 'e baskın ($\delta_{S3}^* > \delta_{S1}^*$) olduğundan δ_{S3}^* modelinden elde edilen çizelgenin kullanılması gerektiği görülmüştür. Daha açık ifade etmek gerekirse, uçak arızalarından kaynaklanan gecikmelerdeki belirsizliğe *tamamen dayanıklı* çizelgeler, planlama dönemindeki 151 günden 34'ünde en fazla 2 uçak*gün kullanımı gerektirmiş iken 86 günde ise herhangi bir maliyet artışı gerektirmemiştir. Ocak ayı (geri kalan 31 gün) için ise sağlam bir çizelgenin getirdiği maliyet makul seviyede

olmadığından Ocak ayındaki gecikmelere katlanması gerektiği, gelecek sene bu ayın uçuş çizelgesinin yeniden hazırlanması gerektiği kararına varılmıştır.

Bu sonuçlar ışığında, öncelikle farklı belirsizlik kümelerinin farklı sonuçlar doğurduğu, üst sınırı $f_3(\mathbf{D}_i)$ fonksiyonu ile belirlenen $\Theta_3 = \{\zeta \mid 0 \leq \zeta_i \leq f_3(\mathbf{D}_i), \forall i \in F\}$ belirsizlik kümesine sahip olan δ_{s3}^* modelinin geliştirilen diğer modellerden daha iyi sonuç verdiği söylenebilir.

Uygulama sonuçlarına göre, δ_{s3}^* modelinden elde edilen çizelge, belirsizlik kümesinin barındırdığı tüm gecikmelere tamamen dayanıklı bir çizelgedir. Bir başka deyişle, Θ_3 kümesinde yer alan gecikmelerin hangi kombinasyonu gerçekleşirse gerçekleşsin, δ_{s3}^* ile elde edilen çizelge bu gecikmelerden etkilenmeyecektir. Böylece hem çığ etkisi gereği meydana gelebilecek büyük maliyetlerden, hem de bu etkinin azaltılması için uygulanan YÇP'nin maliyetinden sistem kurtarılmış olmaktadır. Aynı durum, diğer SURM'leri için de geçerlidir. Böylece, tüm SURM'lerinden elde edilen çizelgeler *tip I sağlam çizelge*dir.

Elde edilecek çizelgenin daha konservatif (tutucu) bir yapıda olması için polihedral yapıda bir belirsizlik kümesi belirlenmiştir. Gelecek çalışmalarda, eldeki verilere bağlı olarak elips, vb daha gerçekçi bir belirsizlik kümesi belirlenebilir. Bu tez boyunca da sıklıkla vurgulandığı gibi farklı belirsizlik kümelerinin farklı sonuçlar ortaya koyması beklenmektedir. Böylece, tutuculuktan makul bir ölçüde fedakarlık edilerek daha az maliyetli sonuçlar aranabilir.

Bu tez çalışması ile önerilen sağlamlık yaklaşımının UR alt problemine uygulanabilirliği ve oldukça iyi sonuçlar elde edilebildiği gösterildiğinden, bu sağlamlık yaklaşımının diğer HYÇP'ne ve havaalanı operasyonları gibi ilişkili diğer alanlara uygulanabilirliğinin araştırılması önemli ve gerekli bir çalışma alanı olarak gözükmektedir. Bu kapsamda önerilen sağlamlık kavramı ışığında farklı alt problemler için farklı aksaklıklara dayanıklı *tip I sağlam çizelge* veya *tip II sağlam çizelgeler* üretilebilir. Örneğin, EA, FA, UÇ alt problemleri için *tip I sağlam çizelge* veya *tip II sağlam çizelge* üretecek SO tabanlı yeni sağlam modeller geliştirilebilir. Bu tez kapsamında önerilen sağlamlık kavramının, özellikle UÇ alt problemi için çok önemli olacağı; ancak sağlam UÇ alt probleminin diğer alt problemlerden daha zor olacağı açıktır.

Ayrıca, Farklı belirsizlik kümesileri farklı sonuçlar verdiğiinden belirsizlik kümelerinin etkin bir şekilde belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu sebepten, belirsizlik kümesinin belirlenmesi üzerine yeni çalışmalar yapılabilir. Bunun yanında, karar değişkenlerinin de belirsiz olduğu durumlar da söz konusu olabilir. Belirsiz karar değişkenlerini de kapsayan benzer bir metodoloji oldukça dikkat çekici olacaktır.

Elbette, sağlam çizelge elde edilebilmesi havayolu firmaları için özellikle günümüz rekabet koşullarında vazgeçilmez olacaktır. Bu tez çalışması ile literatüre yeni sağlamlık tanımları kazandırılmış, bu tanımlara uygun olarak belirsizliğe *tamamen dayanıklı* –sağlam– çizelge(ler) elde edilebilmiştir. Belirsizliğe *tamamen dayanıklı* bir çizelgenin HYÇP alanında ilk defa başarıyla ve oldukça düşük maliyetle elde edilmesiyle, önerilen yaklaşım HYÇP literatüründe hemen hemen her alt problemde sağlam planlar elde edilmesinin de yolunu açmış olmaktadır. Hatta sağlam planlar elde etme çabası havaalanı operasyon planlama alanına da kısa zamanda sıçrayacağını tahmin etmek zor değildir. Tüm bu çalışmaların önünü açması açısından bu tez çalışmasının literatürde bir mihenk taşı olarak kabul görmesi beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdelghany, A., Abdelghany, K., Azadian, F. (2017). Airline flight schedule planning under competition. *Computers and Operations Research*, 87, 20-39.
- Ageeva, Y., Clarke, J.P. (2004). *Incorporating robustness into airline scheduling*. Working paper, Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139 USA.
- Andersson, T., Värbrand, P. (2004). The flight perturbation problem. *Transportation Planning and Technology*, 27, 91–111.
- Andersson, T. (2001). *The flight perturbation problem – operational aircraft rescheduling*, Linköpings Universitet, İsveç.
- Argüello, M. (1997). *Framework for exact solutions and heuristics for approximate solutions to airlines' irregular operations control aircraft routing problem*, Doktora Tezi, The University of Texas at Austin, ABD.
- Barnhart, C., Boland, N.L., Clarke, L.W., Johnson, E.L., Nemhauser, G.L. (1998). The flight string models for aircraft fleetling and routing. *Transportation Science*, 32, 208-20.
- Barnhart, C., Cohn, A. (2004). Airline Schedule planning. *Manufacturing & Service Operations Management*, 6(1), 3-22.
- Barnhart, C., Laporte, G. (Eds). (2007). *Transportation*. Handbooks in Operations Research and Management Science, 14, 1-784.
- Bartholomew-Biggs, M., Parkhurst, S., Wilson, S. (2003). Global optimization approaches to an aircraft routing problem. *European Journal of Operational Research*, 146, 417-31.
- Bazargan, M. (2004). *Airline operations and scheduling*. USA: Ashgate.
- Ben-Tal, A., El Ghaoui, L., Nemirovski, A. (2009). *Robust Optimization*, Princeton and Oxford: Princeton University Press.
- Ben-Tal, A., Nemirovski, A. (1998). Robust convex optimization. *Mathematics of Operations Research*, 23, 769–805.
- Ben-Tal, A., Nemirovski, A. (1999). Robust solutions of uncertain linear programs. *Operations Research Letters*, 25, 1–13.
- Ben-Tal, A., Nemirovski, A. (2000). Robust solutions of linear programming problems contaminated with uncertain data. *Mathematical Programming*, 88(3), 411–21.

- Beyer, H.G., Sendhoff, B. (2007). Robust optimization – a comprehensive survey. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 196, 3190-3218.
- Clarke, L.W., Johnson, E., Nemhauser, G.L., Zhu, Z. (1997). The aircraft rotation problem. *Annals of Operations Research*, 69, 33-46.
- Clausen, J., Larsen, A., Larsen, J. and Rezanova, N.J. (2010). Disruption management in the airline industry – concepts, models, and methods. *Computers & Operations Research*, 37, 809-21.
- Cordeau, J.F., Stojkovic, G., Soumis, F., Desrosiers, J. (2001). Benders decomposition for simultaneous aircraft routing and crew scheduling. *Transportation Science*, 35(4), 375–88.
- De Bruecker, P., den Bergh, J.V., Belien, J., Demeulemeester, E. (2015). A model enhancement heuristic for building robust aircraft maintenance personnel rosters with stochastic constraints. *European Journal of Operational Research*, 246, 661-673.
- Deng, G.F., Lin, W.T. (2011). And colony optimization based algorithm for airline crew scheduling problem. *Expert Systems with Applications*, 38, 5787-93.
- Dumas, J., Aithnard, F., Soumis, F. (2009). Improving the objective function of the fleet assignment problem. *Transportation Research Part B*, 43, 466-75.
- Dunbar, M., Froyland, G., Wu, C.L. (2012). Robust airline schedule planning: minimizing propagated delay in an integrated routing and crewing framework. *Transportation Science*, 46(2), 204–16.
- Dunbar, M., Froyland, G., Wu, C.L. (2014). An integrated scenario-based approach for robust aircraft routing, crew pairing and re-timing. *Computers & Operations Research*, 45, 68-86.
- Ehrgott, M., Ryan, D.M. (2002). Constructing robust crew schedules with bicriteria optimization. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 11, 139-50.
- El Ghaoui, L., Lebret, H. (1997). Robust solutions to least-squares problems with uncertain data. *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*, 18, 1035–64.
- El Ghaoui, L., Oustry, F., Lebret, H. (1998). Robust solutions to uncertain semidefinite programs. *SIAM Journal on Optimization*, 9, 33–52.
- Gershkoff, I. (1987, October). Aircraft shortage evaluator. *Paper presented at ORSA/TIMS Joint National Meeting*, St. Louis, MO.
- Gopalakrishnan, B., Johnson, E.L. (2005). Airline crew scheduling: state-of-the-art. *Annals of Operations Research*, 140, 305-37.

- Gorissen, B.L., Yanikoğlu, İ., den Hertog, D. (2015). A practical guide to robust optimization. *Omega*, 53, 124-137.
- Grönkvist, M. (2005). *The Tail Assignment Problem*, Doktora Tezi, Cahlmers University of Technology ve Göteborg University, İsveç, 22-37.
- Grönkvist, M. (2006). Accelerating column generation for aircraft scheduling using constraint propagation. *Computers & Operations Research*, 33, 2918-34.
- Kabbani, N.M., Patty, B.W. (1992). Aircraft routing at American Airlines. *Presented paper at the Proceedings of the 32nd Annual SymFerryium of AGIFORS*, Budapest, Hungary.
- Kenan, N., Jebali, A., Diabat, A. (baskıda). An integrated flight scheduling and fleet assignment problem under uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*.
- Khaled, O., Minoux, M., Mousseau, V., Michel, S., Ceugniet, X. (2018). A compact optimization model for the tail assignment problem. *European Journal of Operational Research*, 264, 548-57.
- Kim, D., Barnhart, C. (2007). Flight schedule design for a charter airline. *Computers & Operations Research*, 34, 1516-31.
- Ko, Y.D., Jang, Y.J., Kim, D.Y. (2017). Strategic airline operation considering the carbon constrained air transport industry. *Journal of Air Transport Management*, 62, 1-9.
- Kohl, N., Larsen, A., Larsen, J., Ross, A., Tiourine, S. (2007). Airline disruption manegement – Perspectives, experiences and outlook. *Journal of Air Transport Management*, 13(3), 149-62.
- Lan, S., Clarke, J.P., Barnhart, C. (2005). Planning for robust airline operations: optimizing aircraft routings and flight departure times to minimize passenger disruptions. *Transportation Science*, 40, 15-28.
- Lapp, M. (2012). *Methods for improving robustness and recovery in aviation planning*, Doktora Tezi, The University of Michigan, ABD, 42-43.
- Ma, Q., Song, H., Zhu, W. (baskıda). Low-carbon airline fleet assignment: A compromise approach. *Journal of Air Transport Management*.
- Maher, S.J., Desaulniers, G., Soumis, F. (2018). The daily tail assignment problem under operational uncertainty using look-ahead maintenance constraints. *European Journal of Operational Research*, 264, 534-547.
- Mak, V., Boland, N.L. (2006). Facets of the asymmetric travelling salesman problem with replenishment arcs. *Discrete Optimization*, 3, 33-49.

- Mak, V., Boland, N.L. (2007). Polyhedral results and exact algorithms for the asymmetric travelling salesman problem with replenishment arcs. *Discrete Applied Mathematics*, 155, 2093-110.
- Mak, V., Boland, N. (2000). Heuristic approaches to the asymmetric travelling salesman problem with replenishment arcs. *International Transactions in Operational Research*, 7, 431-447.
- Metrane, A., Soumis, F., Elhallaoui, I. (2010). Column generation decomposition with the degenerate constraints in the subproblem. *European Journal of Operational Research*, 207, 37-44.
- Pita, J.P., Adler, N., Antunes, A.P. (2014). Socially-oriented flight scheduling and fleet assignment model with an application to Norway. *Transportation Research Part B*, 61, 17-32.
- Ramirez, J.D., Huertas, J.I., Trigoso, F. (2014). Aircraft maintenance, routing, and crew scheduling planning for airlines with a single fleet and a single maintenance and crew base. *Computers & Industrial Engineering*, 75, 68-78.
- Rosenberger, J., Johnson, E.L., Nemhauser, G.L. (2004). A robust fleet-assignment model with hub isolation and short cycles. *Transportation Science*, 38, 357-368.
- Schaefer, A.J., Johnson, E.L., Kleywegt, A.J., Nemhauser, G.L. (2005). Airline crew scheduling under uncertainty. *Transportation Science*, 39, 340-348.
- Schaefer, A.J., Nemhauser, G.L. (2006). Improving airline operational performance through schedule perturbation. *Annals of Operations Research*, 144(1), 3-16.
- Shebalov, S., Klabjan, D. (2002, January). Robust airline crew scheduling: move-up crews. *Proceedings of NSF Design, Service, and Manufacturing Grantees and Research Conference*, San Juan, Puerto Rico.
- Sherali, H.D., Bish, E.K., Zhu, K. (2006). Airline fleet assignment concepts, models, and algorithms. *European Journal of Operations Research*, 172(1), 1-30.
- Smith, B.C. (2004). *Robust airline fleet assignment*. Doktora Tezi, Georgia Institute of Technology, ABD, 8-9.
- Sohoni, M.G., Johnson, E.L., Bailey, T.G. (2006). Operational airline reserve crew planning. *Journal of Scheduling*, 9(3), 203-21.
- Soyster, A.L. (1973). Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. *Operational Research*, 21, 1154-57.

- Sun, J.Y. (2015). Clustered airline flight scheduling: Evidence from airline deregulation in Korea. *Journal of Air Transport Management*, 42, 85-94.
- Tekiner, H., Birbil, İ., Bülbül, K. (2009). Robust crew pairing for managing extra flights. *Computers & Operations Research*, 36, 2031-2048.
- Vandenberghe, L., Boyd, S. (1996). Semidefinite programming. *SIAM Review*, 38, 49–95.
- Wald, A. (1939). Contributions to the theory of statistical estimation and testing hypotheses. *The Annals of Mathematics*, 10(4), 299-326.
- Wald, A. (1945). Statistical decision functions which minimize the maximum risk. *The Annals of Mathematics*, 46(2), 265-280.
- Wald, A. (1950). *Statistical Decision Functions*. NY: John Wiley.
- Weide, O., Ryan, D., Ehrgott, M. (2010). An iterative approach to robust and integrated aircraft routing and crew scheduling. *Computers & Operations Research*, 37, 833-844.
- Wolsey, L. (1998). *Integer programming*. New York: Wiley-Interscience.
- Yan, S., Chang, J.C. (2002). Airline cockpit crew scheduling. *European Journal of Operational Research*, 136, 501-511.
- Yan, S., Tu, Y.P. (2002). A network model for airline cabin crew scheduling. *European Journal of Operational Research*, 140, 531-540.
- Yan, S., Yang, D.H. (1996). A decision support framework for handling schedule perturbations. *Transportation Research Part B*, 30, 405–419.
- Yen, J., Birge, J. (2000). *A stochastic programming approach to the airline crew scheduling problem*. Technical Report, University of Washington, Seattle, WA, USA.
- Yu, G. (Editor). (1998). *Operations Research in the Airline Industry*, New York: Kluwer's International Series, 1-44.





EKLER

EK-1. Aksaklıkların sınıflandırılması

CLASSIFICATION OF PERTURBATION CODES

PERTURBED BY TECHNICAL REASONS

Code 01: delays for technical reason or other aircrafts than those in THY Inc. | 4.52%

Code 41: aircraft defects | 0.02%

Code 51: damage during flight operations, bird or lightning strike, turbulence, heavy or overweight landing, collision during taxiing | 0.13%

In total: 4.67% of total delays

PERTURBED BY WEATHER CONDITIONS

Code 75: de-icing of aircraft (removal of ice and/or snow, frost prevention excluding unserviceability of equipment) | 1.00%

Code 76: removal of snow, ice, water and sand from airport | 0.45%

Code 77: ground handling by impaired by adverse weather conditions | 0.11%

Code 84: ATFM due to weather conditions at destination | 0.47%

Code 89: restrictions at airport of departure with or without ATFM restrictions including air-traffic services, start-up and push-back, closure of airport and/or runway due to obstruction or **weather condition** | 23.50%

In total: 25.53% of total delays

PERTURBED BY LACK OR DISABILITY OF CREW MEMBERS

Code 32: loading/unloading bulky, special load, cabin load, lack of loading staff | 0.11%

Code 64: cockpit crew shortage (sickness, awaiting stand-by, flight time limitations, crew meal, valid visa, health documents, etc.) | 0.23%

Code 65: cockpit crew special request, not within operational requirements | 0.61%

Code 66: late cabin crew boarding or departure procedures (other than connection and stand-by) | 0.05%

Code 67: cabin crew shortage (sickness, awaiting stand-by, flight time limitations, crew meal, valid visa, health documents, etc.) | 0.16%

Code 68: cabin crew error or special request (not within operational requirements) | 0.64%

Code 94: cabin crew rotation (awaiting cabin crew from another flight) | 0.03%

Code 95: cockpit crew rotation (awaiting cabin crew from another flight) | 0.66%

EK-1. (devam) Aksaklıkların sınıflandırılması

In total: 1.89% of total delays

PERTURBED BY AIR/GROUND CONGESTION

Code 87: airport facilities (parking stands, **ramp congestion**, lightining, buildings, gate limitations, etc.) | 4.21%

Code 89: restrictions at airport of departure with or without ATFM **restrictions including air-traffic services**, start-up and push-back, closure of airport and/or runway due to obstruction or weather condition | 23.50%

In total: 27.71% of total delays

PERTURBED BY PROBLEMS/LATENESSES RELATED TO AIRPORT OPERATIONS

Code 02: due to the procedure of the APU INOP aircraft's starting engines at the parking or the aircraft's starting engines at the parking position initiating the the movement by its own power | 2.22%

Code 32: loading/unloding bulky, special load, cabin load, lack of loading staff | 0.11%

Code 55: departure control | 0.14%

Code 62: operational requirements (fuel, load alteration) | 0.19%

Code 71: departure station | 0.42%

Code 72: destination station | 1.61%

Code 83: ATFM due to restriction at destination airport (closure of airport and/or runway due to obstruction, industrial action, staff shortage, political unrest, noise abatement, night flights, special flights) | 1.45%

Code 87: airport facilities (parking stands, ramp congestion, lightining, buildings, gate limitations, etc.) | 4.21%

Code 88: restrictions at destination airport (closure of airport and/or runway due to obstruction, industrial action, staff shortage, political unrest, noise abatement, night curfew, special flights) | 0.10%

Code 89: restrictions at departure airport with or without ATFM restrictions including air traffic services, start-up and push-back, closure of airport and/or runway due to obstruction or weather | 23.50%

In total: 34.07% of total delays

EK-1. (devam) Aksaklıkların sınıflandırılması

PERTURBED BY EXAMINATION AND THE OTHER REGULAR PROCEDURES

Code 03: audit | 0.03%

Code 04: delays under ongoing examination | 0.03%

Code 31: late/inappropriate aircraft documentation, weight and balance, general declaration, pax manifest, etc. | 0.13%

Code 35: aircraft cleaning | 0.26%

Code 36: fuelling, defuelling, fuel supplier | 0.06%

Code 58: other automated system format | 0.03%

Code 85: mandatory security procedures | 1.59%

Code 86: immigration, customs, health | 0.13%

Code 91: load connection (awaiting load from another flight) | 0.79%

Code 92: through check-in error, passenger and baggage | 0.02%

In total: 3.04% of total delays

PERTURBED BY OPERATIONS RELATED TO PASSENGERS

Code 11: late check-in, acceptance after deadline | 0.10%

Code 12: late check-in, congestion in check-in area | 0.06%

Code 13: Check-in error, passenger and baggage | 0.10%

Code 14: oversales, booking errors | 0.02%

Code 15: boarding, discrepancies, and paging, missing check-in passenger | 0.63%

Code 16: commercial publicity/passenger convenience, vip, press, ground meals and missing personal items | 0.98%

Code 19: reduced mobility (boarding/deboarding of passengers with reduced mobility) | 2.11%

In total: 4.00% of total delays

PERTURBED BY OTHERS

Code 09: scheduling less time than the declared for the ground time regarding to the airport | 1.43%

Code 17: catering order, late or incorrect order, given to supplier | 0.02%

Code 34: lack or breakdown of service equipment, lack of staff, etc. | 0.24%

Code 37: catering, late delivery or loading | 0.02%

EK-1. (devam) Aksaklıkların sınıflandırılması

Code 39: lack or breakdown of technical equipment, lack of staff, etc. | 0.03%

Code 81: ATFM due to en route demand/capacity | 0.18%

Code 82: ATFM due to ATC staff/equipment en route (reduced capacity caused by the industrial action of staff shortage or equipment failure, extraordinary demand due to capacity reduction in neighbouring area) | 0.02%

Code 99: miscellaneous (to be explained in SI) | 0.39%

In total: 2.33% of total delays

PERTURBATION CODES FOR THE IMPACTS OF SPECIFIC REASONS

Code 93: aircraft rotation (late arrival of aircraft from another flight | 46.05%

Code 94: cabin crew rotation (awaiting cabin crew from another flight) | 0.03%

Code 95: cockpit crew rotation (awaiting cockpit crew from another flight) | 0.66%

Code 96: operations control (re-routing, diversion, consolidation, aircraft change for the reasons other than technical reasons) | 0.58%

In total: 47.42% of total delays

EK-2. Nominal model ve sağlam modellerin mümkün çözüm sayıları

Tarih	Gerçekleştirilen uçuş ayağı sayısı	δ_1 modeli	δ_{S1}^* modeli	δ_{S2}^* modeli	δ_{S3}^* modeli
01.01.2015	105	2429	1597	1482	1289
02.01.2015	140	6926	4605	4456	3815
03.01.2015	125	4840	3323	3107	2687
04.01.2015	174	17744	11602	10460	9141
05.01.2015	160	14539	9254	9250	7682
06.01.2015	115	5396	3882	3813	3393
07.01.2015	133	6430	4439	4279	3675
08.01.2015	137	7789	5110	4680	4099
09.01.2015	177	19359	12648	11484	10021
10.01.2015	147	8763	6084	5776	5023
11.01.2015	161	12535	8249	7345	6463
12.01.2015	153	10528	6740	6868	5735
13.01.2015	115	5308	3707	3012	2827
14.01.2015	132	6892	4708	4410	3793
15.01.2015	145	9618	6008	5825	5029
16.01.2015	181	22571	14690	13199	11423
17.01.2015	153	9707	6322	6061	5102
18.01.2015	164	14121	9198	8176	7206
19.01.2015	162	15782	10242	9585	8111
20.01.2015	122	7404	4929	4889	4328
21.01.2015	157	13753	9299	8587	7494
22.01.2015	165	16259	10576	10166	8667
23.01.2015	189	26993	17461	17203	15025
24.01.2015	163	13025	8341	8228	6991
25.01.2015	180	19059	12863	11698	10264
26.01.2015	176	20090	12986	13013	11047
27.01.2015	137	10136	6580	6012	5137
28.01.2015	160	14853	9933	9128	7818
29.01.2015	164	17228	11406	10540	8993
30.01.2015	189	28132	18381	16823	14621
31.01.2015	162	12543	8177	8056	6842
01.02.2015	180	19915	13322	12175	10668
02.02.2015	176	20736	13448	12686	10667
03.02.2015	142	13070	8557	7776	6791
04.02.2015	164	17170	11565	10587	9160
05.02.2015	168	18718	12166	11583	9914
06.02.2015	190	29387	19331	17605	15409
07.02.2015	166	14702	9614	9407	8091
08.02.2015	184	21438	14528	13237	11640
09.02.2015	174	19134	12420	11729	9809

EK-2. (devam) Nominal model ve sağlam modellerin mümkün çözüm sayıları

Tarih	Gerçekleştirilen uçuş ayağı sayısı	δ_1 modeli	δ_{s1}^* modeli	δ_{s2}^* modeli	δ_{s3}^* modeli
10.02.2015	136	8793	6293	5327	5047
11.02.2015	159	15540	10564	9787	8394
12.02.2015	157	14315	9515	8999	7616
13.02.2015	187	26734	17287	16231	14273
14.02.2015	157	10940	7143	6969	5976
15.02.2015	175	17078	11303	10401	9185
16.02.2015	162	12331	7886	7983	6664
17.02.2015	135	8776	6122	5503	4720
18.02.2015	155	16011	10806	10036	8649
19.02.2015	164	17983	11882	10833	9384
20.02.2015	186	26502	16913	16763	14657
21.02.2015	157	11054	7115	7168	5999
22.02.2015	172	17805	11414	10271	8983
23.02.2015	166	14617	9551	9660	8152
24.02.2015	127	7879	5332	5465	4689
25.02.2015	164	16749	11308	10569	9074
26.02.2015	164	19138	12665	11486	9918
27.02.2015	186	28607	18395	16923	14840
28.02.2015	160	13015	8505	8231	7018
01.03.2015	178	22474	14286	12479	11310
02.03.2015	172	18826	12098	11914	10142
03.03.2015	127	8471	5716	5317	4608
04.03.2015	156	17535	11626	10459	9070
05.03.2015	163	17323	11496	10403	9030
06.03.2015	189	30802	20087	18096	15862
07.03.2015	161	13901	9008	8582	7359
08.03.2015	178	22167	14222	12368	11179
09.03.2015	173	19280	12510	11440	9601
10.03.2015	139	9397	6332	5971	5151
11.03.2015	154	13601	9058	8360	7220
12.03.2015	162	16136	10516	10374	8826
13.03.2015	194	32946	21491	19336	17055
14.03.2015	172	17952	11926	11286	9795
15.03.2015	177	19337	12149	10833	9700
16.03.2015	178	20170	13099	12983	11048
17.03.2015	138	10141	6956	6268	5481
18.03.2015	161	17739	11707	10681	9369
19.03.2015	171	20398	13718	13363	11714
20.03.2015	192	30741	20097	18464	16245
21.03.2015	165	13150	8010	8199	6893

EK-2. (devam) Nominal model ve sağlam modellerin mümkün çözüm sayıları

Tarih	Gerçekleştirilen uçuş ayağı sayısı	δ_1 modeli	δ_{s1}^* modeli	δ_{s2}^* modeli	δ_{s3}^* modeli
22.03.2015	181	23356	14784	12928	11730
23.03.2015	174	18375	11990	11170	9455
25.03.2015	165	17580	11455	10711	9328
26.03.2015	171	23403	15554	14062	12143
27.03.2015	196	33106	21646	19920	17583
28.03.2015	173	17271	11420	11109	9454
29.03.2015	200	29441	19108	16819	45163
30.03.2015	204	42321	28334	26124	22956
31.03.2015	187	32471	22178	20212	17747
01.04.2015	194	34585	23416	20930	18637
02.04.2015	202	39430	26032	23973	21118
03.04.2015	209	45470	30102	27849	24580
04.04.2015	196	30987	20602	19272	16889
05.04.2015	204	38083	24694	22470	19908
06.04.2015	202	44721	29984	27799	24492
07.04.2015	183	31542	21471	19527	17162
08.04.2015	199	37766	25662	23095	20618
09.04.2015	203	39660	26248	24085	21230
10.04.2015	213	46441	30859	28486	25155
11.04.2015	196	31347	20676	19450	16923
12.04.2015	202	34888	22826	20525	18211
13.04.2015	208	45597	30699	28300	24881
14.04.2015	188	31083	21378	19420	16960
15.04.2015	201	36147	24646	21988	19532
16.04.2015	212	44271	29603	27167	23946
17.04.2015	216	43579	28131	26296	22890
18.04.2015	199	31103	20781	19468	17024
19.04.2015	210	38810	25602	23150	20514
20.04.2015	215	47408	31971	29592	26067
21.04.2015	195	34377	23584	21167	18589
22.04.2015	212	42811	28935	26021	23147
23.04.2015	213	42115	28523	25869	22756
24.04.2015	218	44822	29498	26954	23584
25.04.2015	203	33147	22052	20457	17733
26.04.2015	212	39675	25961	23536	20810
27.04.2015	213	46700	31447	29081	25618
28.04.2015	198	35146	24207	21709	19052
29.04.2015	208	38282	25819	23012	20377
30.04.2015	218	44869	30109	27241	24029
01.05.2015	229	48613	31656	31277	27625

EK-2. (devam) Nominal model ve sağlam modellerin mümkün çözüm sayıları

Tarih	Gerçekleştirilen uçuş ayağı sayısı	δ_1 modeli	δ_{s1}^* modeli	δ_{s2}^* modeli	δ_{s3}^* modeli
02.05.2015	205	36997	24482	22624	19994
03.05.2015	220	44225	28504	25769	22737
04.05.2015	225	53501	36474	33507	29953
05.05.2015	202	39297	26713	23926	21244
06.05.2015	215	37696	25443	22442	20010
07.05.2015	210	32802	21754	19287	17692
08.05.2015	228	48600	31765	29066	25563
09.05.2015	201	31773	21275	19671	17295
10.05.2015	208	33445	20772	19406	16795
11.05.2015	211	32586	21597	21207	19288
12.05.2015	195	33306	22853	20623	18118
13.05.2015	203	28823	19248	16758	14903
14.05.2015	211	37073	24199	22098	19348
15.05.2015	228	48589	32341	29395	26130
16.05.2015	212	38354	25403	23610	2093
17.05.2015	220	42264	27245	24908	22000
18.05.2015	215	37439	25470	22558	20222
19.05.2015	212	42113	29112	26046	23079
20.05.2015	214	36329	24378	20561	18978
21.05.2015	213	36171	24342	22831	20903
22.05.2015	221	37805	25002	21956	20095
23.05.2015	211	31686	20782	19917	17649
24.05.2015	215	31199	19269	17740	15365
25.05.2015	228	41892	28657	25716	23050
26.05.2015	207	32135	21474	20259	17733
27.05.2015	218	41312	28432	24442	22616
28.05.2015	220	40433	26118	24358	21510
29.05.2015	231	44635	30884	27874	24668
30.05.2015	213	37592	25596	23511	20761
31.05.2015	228	41092	26140	26225	23186

EK-3. 07.05.2015 tarihi için δ_1 modeli ile elde edilen çözümde yer alan toplam 66 uçağın uçuş planı

Uçak	Tarih	Uçuş kodu	Kalkış noktası	Varış noktası	Kalkış saati	Varış saati	Uçuş süresi (dk)
1	7.05.2015	7051	BGG	ESB	15:50	17:20	90
	7.05.2015	7253	ESB	SAW	18:00	19:00	60
	7.05.2015	7254	SAW	ESB	19:35	20:35	60
	7.05.2015	7058	ESB	MLX	23:20	00:30	70
2	7.05.2015	7071	ERZ	ESB	10:15	11:45	90
	7.05.2015	7384	ESB	ECN	19:20	20:30	70
	7.05.2015	7385	ECN	ESB	21:05	22:20	75
	7.05.2015	7257	ESB	SAW	23:20	00:20	60
3	7.05.2015	7079	ERC	ESB	14:05	15:25	80
	7.05.2015	7251	ESB	SAW	17:10	18:10	60
	7.05.2015	7256	SAW	ESB	21:00	22:00	60
	7.05.2015	7036	ESB	AYT	23:30	00:35	65
4	7.05.2015	7089	MSR	ESB	11:40	13:20	100
	7.05.2015	7102	ESB	ADA	14:00	15:05	65
	7.05.2015	7267	ADA	SAW	16:40	18:10	90
	7.05.2015	7254	SAW	ESB	19:35	20:35	60
5	7.05.2015	7091	KSY	ESB	11:00	12:45	105
	7.05.2015	7008	ESB	ADB	14:05	15:25	80
	7.05.2015	7011	ADB	ESB	17:45	19:00	75
	7.05.2015	7054	ESB	EZS	23:20	00:35	75
6	7.05.2015	7097	AJI	ESB	15:20	17:05	105
	7.05.2015	7370	ESB	CKZ	21:25	22:40	75
7	7.05.2015	7099	IGD	ESB	15:50	17:35	105
	7.05.2015	7134	ESB	SZF	20:00	20:55	55
8	7.05.2015	7115	GNV	ESB	10:20	11:40	80
	7.05.2015	7098	ESB	IGD	13:40	15:20	100
9	7.05.2015	7129	ADF	ESB	13:50	15:10	80
	7.05.2015	7110	ESB	HTY	15:55	17:10	75
10	7.05.2015	7149	DIY	ESB	06:30	07:55	85
	7.05.2015	7060	ESB	TZX	08:30	09:50	80
	7.05.2015	7229	TZX	SAW	20:40	22:25	105
11	7.05.2015	7171	EDO	ESB	17:50	19:05	75
	7.05.2015	7116	ESB	GNV	19:45	21:00	75
12	7.05.2015	7181	TEQ	ESB	07:00	08:00	60
	7.05.2015	7114	ESB	GNV	08:35	09:50	75
	7.05.2015	7317	GNV	SAW	16:00	17:50	110
	7.05.2015	7228	SAW	TZX	18:30	20:10	100

EK-3. (devam) 07.05.2015 tarihi için δ_1 modeli ile elde edilen çözümde yer alan toplam
66 uçağın uçuş planı

Uçak	Tarih	Uçuş kodu	Kalkış noktası	Varış noktası	Kalkış saati	Varış saati	Uçuş süresi (dk)
13	7.05.2015	7191	NKT	ESB	11:05	12:45	100
	7.05.2015	7030	ESB	AYT	16:00	17:05	65
	7.05.2015	7033	AYT	ESB	21:30	22:35	65
	7.05.2015	7112	ESB	HTY	23:25	00:40	75
14	7.05.2015	7211	DIY	SAW	11:20	13:15	115
	7.05.2015	7346	SAW	BJV	19:15	20:30	75
	7.05.2015	7155	BJV	ESB	21:30	22:45	75
	7.05.2015	7257	ESB	SAW	23:20	00:20	60
15	7.05.2015	7219	EZS	SAW	12:55	14:40	105
	7.05.2015	7272	SAW	GZT	18:30	20:00	90
	7.05.2015	7125	GZT	ESB	21:25	22:35	70
	7.05.2015	7148	ESB	DIY	23:35	00:55	80
16	7.05.2015	7226	SAW	TZX	07:00	08:40	100
	7.05.2015	7061	TZX	ESB	10:20	11:40	80
	7.05.2015	7052	ESB	EZS	16:00	17:15	75
	7.05.2015	7221	EZS	SAW	21:30	23:15	105
17	7.05.2015	7231	TZX	SAW	06:30	08:15	105
	7.05.2015	7266	SAW	ADA	14:35	16:10	95
	7.05.2015	7263	ADA	SAW	20:25	21:55	90
18	7.05.2015	7235	SZF	SAW	06:30	07:50	80
	7.05.2015	7222	SAW	ERZ	11:15	12:55	100
	7.05.2015	7225	ERZ	SAW	20:25	22:15	110
19	7.05.2015	7235	SZF	SAW	06:30	07:50	80
	7.05.2015	7278	SAW	HTY	13:45	15:20	95
	7.05.2015	7111	HTY	ESB	17:40	18:55	75
	7.05.2015	7124	ESB	GZT	19:45	20:55	70
20	7.05.2015	7237	SZF	SAW	08:50	10:10	80
	7.05.2015	7246	SAW	ESB	11:00	12:00	60
	7.05.2015	7050	ESB	BGG	13:55	15:20	85
21	7.05.2015	7245	ESB	SAW	12:10	13:10	60
	7.05.2015	7294	SAW	ASR	15:00	16:15	75
	7.05.2015	7297	ASR	SAW	20:15	21:30	75
	7.05.2015	7274	SAW	GZT	22:15	23:45	90
22	7.05.2015	7260	SAW	ADA	07:45	09:10	85
	7.05.2015	7101	ADA	ESB	10:20	11:25	65
	7.05.2015	7140	ESB	DIY	12:15	13:30	75
	7.05.2015	7215	DIY	SAW	20:25	22:20	115

EK-3. (devam) 07.05.2015 tarihi için δ_1 modeli ile elde edilen çözümde yer alan toplam
66 uçağın uçuş planı

Uçak	Tarih	Uçuş kodu	Kalkış noktası	Varış noktası	Kalkış saati	Varış saati	Uçuş süresi (dk)
23	7.05.2015	7261	ADA	SAW	09:40	11:10	90
	7.05.2015	7316	SAW	GNV	12:10	14:00	110
	7.05.2015	7117	GNV	ESB	21:30	22:50	80
	7.05.2015	7068	ESB	TZX	23:40	00:55	75
24	7.05.2015	7265	ADA	SAW	06:30	08:00	90
	7.05.2015	7320	SAW	DNZ	14:10	15:10	60
	7.05.2015	7321	DNZ	SAW	17:10	18:10	60
	7.05.2015	7220	SAW	EZS	19:20	21:00	100
25	7.05.2015	7279	HTY	SAW	15:50	17:30	100
	7.05.2015	7238	SAW	SZF	18:30	19:50	80
	7.05.2015	7135	SZF	ESB	21:25	22:25	60
	7.05.2015	7120	ESB	GZT	23:35	00:45	70
26	7.05.2015	7289	VAS	SAW	16:05	17:30	85
	7.05.2015	7224	SAW	ERZ	18:15	19:55	100
	7.05.2015	7075	ERZ	ESB	21:20	22:50	90
27	7.05.2015	7293	ASR	SAW	08:45	10:00	75
	7.05.2015	7218	SAW	EZS	10:45	12:25	100
	7.05.2015	7053	EZS	ESB	17:45	19:05	80
	7.05.2015	7104	ESB	ADA	19:45	20:50	65
28	7.05.2015	7299	ASR	SAW	06:45	08:00	75
	7.05.2015	7202	SAW	VAN	09:00	11:00	120
	7.05.2015	7085	VAN	ESB	15:50	17:35	105
	7.05.2015	7154	ESB	BJV	19:40	21:00	80
29	7.05.2015	7299	ASR	SAW	06:45	08:00	75
	7.05.2015	7210	SAW	DIY	09:00	10:50	110
	7.05.2015	7141	DIY	ESB	14:00	15:25	85
	7.05.2015	7146	ESB	DIY	19:35	20:50	75
30	7.05.2015	7299	ASR	SAW	06:45	08:00	75
	7.05.2015	7232	SAW	TZX	09:20	11:00	100
	7.05.2015	7065	TZX	ESB	14:05	15:25	80
	7.05.2015	7086	ESB	VAN	16:00	17:30	90
31	7.05.2015	7367	TZX	YEI	11:35	13:15	100
	7.05.2015	7368	YEI	TZX	15:15	16:50	95
	7.05.2015	7233	TZX	SAW	17:30	19:15	105
	7.05.2015	7256	SAW	ESB	21:00	22:00	60
32	7.05.2015	7377	KCO	TZX	09:40	11:10	90
	7.05.2015	7065	TZX	ESB	14:05	15:25	80
	7.05.2015	7170	ESB	EDO	16:00	17:20	80

EK-3. (devam) 07.05.2015 tarihi için δ_1 modeli ile elde edilen çözümde yer alan toplam
66 uçağın uçuş planı

Uçak	Tarih	Uçuş kodu	Kalkış noktası	Varış noktası	Kalkış saati	Varış saati	Uçuş süresi (dk)
33	7.05.2015	7387	ECN	ESB	06:30	07:45	75
	7.05.2015	7004	ESB	ADB	08:30	09:50	80
	7.05.2015	7007	ADB	ESB	14:05	15:20	75
	7.05.2015	7042	ESB	BAL	18:35	20:00	85
34	7.05.2015	7387	ECN	ESB	06:30	07:45	75
	7.05.2015	7070	ESB	ERZ	08:30	09:45	75
	7.05.2015	7223	ERZ	SAW	13:25	15:15	110
	7.05.2015	7214	SAW	DIY	18:05	19:55	110
35	7.05.2015	7387	ECN	ESB	06:30	07:45	75
	7.05.2015	7090	ESB	KSY	08:55	10:30	95
	7.05.2015	7301	KSY	SAW	15:20	17:25	125
	7.05.2015	7296	SAW	ASR	18:30	19:45	75
36	7.05.2015	7043	BAL	ESB	20:30	22:05	95
	7.05.2015	7076	ESB	ERZ	23:25	00:45	80
37	7.05.2015	7001	ADB	ESB	06:40	07:55	75
	7.05.2015	7024	ESB	AYT	08:45	09:50	65
	7.05.2015	7019	AYT	ESB	12:15	13:20	65
	7.05.2015	7046	ESB	MQM	14:15	15:40	85
38	7.05.2015	7025	AYT	ESB	10:20	11:25	65
	7.05.2015	7078	ESB	ERC	12:20	13:35	75
39	7.05.2015	7107	ADA	ESB	06:55	08:00	65
	7.05.2015	7088	ESB	MSR	09:40	11:10	90
40	7.05.2015	7055	EZS	ESB	06:30	07:50	80
	7.05.2015	7380	ESB	ECN	08:50	10:00	70
	7.05.2015	7381	ECN	ESB	10:35	11:50	75
	7.05.2015	7096	ESB	AJI	13:15	14:50	95
41	7.05.2015	7002	ESB	ADB	07:30	08:50	80
	7.05.2015	7005	ADB	ESB	10:20	11:35	75
	7.05.2015	7128	ESB	ADF	12:10	13:20	70
42	7.05.2015	7183	TEQ	ESB	17:40	18:40	60
	7.05.2015	7014	ESB	ADB	20:30	21:50	80
43	7.05.2015	7059	MLX	ESB	06:40	07:55	75
	7.05.2015	7190	ESB	NKT	09:00	10:35	95
44	7.05.2015	7003	ADB	ESB	09:20	10:35	75
	7.05.2015	7122	ESB	GZT	12:25	13:35	70
	7.05.2015	7273	GZT	SAW	20:30	22:10	100

EK-3. (devam) 07.05.2015 tarihi için δ_1 modeli ile elde edilen çözümde yer alan toplam
66 uçağın uçuş planı

Uçak	Tarih	Uçuş kodu	Kalkış noktası	Varış noktası	Kalkış saati	Varış saati	Uçuş süresi (dk)
45	7.05.2015	7299	ASR	SAW	06:45	08:00	75
	7.05.2015	7284	SAW	KYA	08:45	09:55	70
	7.05.2015	7287	KYA	SAW	20:50	22:00	70
46	7.05.2015	7021	AYT	ESB	06:45	07:50	65
	7.05.2015	7082	ESB	VAN	08:40	10:15	95
	7.05.2015	7203	VAN	SAW	11:30	13:40	130
	7.05.2015	7288	SAW	VAS	14:15	15:35	80
47	7.05.2015	7292	SAW	ASR	07:00	08:15	75
	7.05.2015	7295	ASR	SAW	16:45	18:00	75
	7.05.2015	7286	SAW	KYA	19:10	20:20	70
48	7.05.2015	7285	KYA	SAW	10:25	11:35	70
	7.05.2015	7300	SAW	KSY	12:50	14:50	120
49	7.05.2015	7113	HTY	ESB	06:45	08:00	75
	7.05.2015	7150	ESB	BJV	08:35	09:55	80
	7.05.2015	7347	BJV	SAW	21:00	22:15	75
50	7.05.2015	7376	TZX	KCO	07:30	09:10	100
51	7.05.2015	7069	TZX	ESB	06:30	07:45	75
	7.05.2015	7100	ESB	ADA	08:45	09:50	65
	7.05.2015	7103	ADA	ESB	15:35	16:40	65
	7.05.2015	7146	ESB	DIY	19:35	20:50	75
52	7.05.2015	7077	ERZ	ESB	06:30	08:00	90
	7.05.2015	7026	ESB	AYT	12:25	13:30	65
	7.05.2015	7031	AYT	ESB	17:35	18:40	65
	7.05.2015	7074	ESB	ERZ	19:35	20:50	75
53	7.05.2015	7083	VAN	ESB	10:45	12:30	105
	7.05.2015	7010	ESB	ADB	15:55	17:15	80
	7.05.2015	7013	ADB	ESB	20:20	21:35	75
	7.05.2015	7106	ESB	ADA	23:20	00:20	60
54	7.05.2015	7121	GZT	ESB	06:40	07:50	70
	7.05.2015	7142	ESB	DIY	08:30	09:50	80
	7.05.2015	7145	DIY	ESB	14:00	15:25	85
	7.05.2015	7066	ESB	TZX	19:35	20:55	80
55	7.05.2015	7132	ESB	SZF	08:50	09:45	55
	7.05.2015	7239	SZF	SAW	20:20	21:40	80
	7.05.2015	7230	SAW	TZX	22:20	23:55	95

EK-3. (devam) 07.05.2015 tarihi için δ_1 modeli ile elde edilen çözümde yer alan toplam
66 uçağın uçuş planı

Uçak	Tarih	Uçuş kodu	Kalkış noktası	Variş noktası	Kalkış saati	Variş saati	Uçuş süresi (dk)
56	7.05.2015	7143	DIY	ESB	10:20	11:45	85
	7.05.2015	7084	ESB	VAN	13:45	15:20	95
	7.05.2015	7207	VAN	SAW	16:25	18:35	130
	7.05.2015	7298	SAW	ASR	22:15	23:30	75
57	7.05.2015	7151	BJV	ESB	10:25	11:40	75
	7.05.2015	7008	ESB	ADB	14:05	15:25	80
	7.05.2015	7015	ADB	ESB	22:20	23:35	75
58	7.05.2015	7209	MQM	SAW	15:20	17:20	120
	7.05.2015	7262	SAW	ADA	18:30	19:55	85
	7.05.2015	7105	ADA	ESB	21:20	22:25	65
	7.05.2015	7180	ESB	TEQ	23:20	00:25	65
59	7.05.2015	7227	TZX	SAW	09:10	10:55	105
	7.05.2015	7206	SAW	VAN	13:55	15:55	120
	7.05.2015	7087	VAN	ESB	18:00	19:45	105
	7.05.2015	7016	ESB	ADB	23:30	00:50	80
60	7.05.2015	7236	SAW	SZF	07:00	08:20	80
	7.05.2015	7133	SZF	ESB	10:15	11:15	60
	7.05.2015	7064	ESB	TZX	12:15	13:35	80
	7.05.2015	7067	TZX	ESB	21:25	22:45	80
61	7.05.2015	7237	SZF	SAW	08:50	10:10	80
	7.05.2015	7208	SAW	MQM	13:00	14:50	110
	7.05.2015	7047	MQM	ESB	16:10	17:45	95
	7.05.2015	7012	ESB	ADB	18:30	19:50	80
62	7.05.2015	7242	SAW	ESB	08:00	09:00	60
	7.05.2015	7144	ESB	DIY	12:15	13:30	75
	7.05.2015	7147	DIY	ESB	21:20	22:45	85
	7.05.2015	7036	ESB	AYT	23:30	00:35	65
63	7.05.2015	7270	SAW	GZT	07:00	08:30	90
	7.05.2015	7123	GZT	ESB	14:05	15:15	70
	7.05.2015	7255	ESB	SAW	19:15	20:15	60
	7.05.2015	7274	SAW	GZT	22:15	23:45	90
64	7.05.2015	7271	GZT	SAW	09:00	10:40	100
	7.05.2015	7318	SAW	MLX	11:45	13:30	105
	7.05.2015	7319	MLX	SAW	15:30	17:10	100
	7.05.2015	7264	SAW	ADA	22:30	23:55	85
65	7.05.2015	7371	CKZ	ESB	08:55	10:10	75
	7.05.2015	7006	ESB	ADB	12:15	13:35	80
	7.05.2015	7009	ADB	ESB	15:55	17:10	75
	7.05.2015	7032	ESB	AYT	19:50	21:00	70

EK-3. (devam) 07.05.2015 tarihi için δ_1 modeli ile elde edilen çözümde yer alan toplam
66 uçağın uçuş planı

Uçak	Tarih	Uçuş kodu	Kalkış noktası	Variş noktası	Kalkış saati	Variş saati	Uçuş süresi (dk)
66	7.05.2015	7387	ECN	ESB	06:30	07:45	75
	7.05.2015	7018	ESB	AYT	10:40	11:45	65
	7.05.2015	7027	AYT	ESB	14:00	15:05	65
	7.05.2015	7182	ESB	TEQ	16:05	17:10	65

EK-4. 07.05.2015 tarihi için δ_{S3}^* modeli ile elde edilen çözümde yer alan toplam 67 uçağın uçuş planı

Uçak	Tarih	Uçuş kodu	Kalkış noktası	Varış noktası	Kalkış saati	Varış saati	Uçuş süresi (dk)
1	7.05.2015	7005	ADB	ESB	10:20	11:35	75
	7.05.2015	7140	ESB	DIY	12:15	13:30	75
	7.05.2015	7215	DIY	SAW	20:25	22:20	115
2	7.05.2015	7051	BGG	ESB	15:50	17:20	90
	7.05.2015	7253	ESB	SAW	18:00	19:00	60
	7.05.2015	7256	SAW	ESB	21:00	22:00	60
	7.05.2015	7112	ESB	HTY	23:25	00:40	75
3	7.05.2015	7055	EZS	ESB	06:30	07:50	80
	7.05.2015	7024	ESB	AYT	08:45	09:50	65
	7.05.2015	7019	AYT	ESB	12:15	13:20	65
	7.05.2015	7032	ESB	AYT	19:50	21:00	70
4	7.05.2015	7059	MLX	ESB	06:40	07:55	75
	7.05.2015	7004	ESB	ADB	08:30	09:50	80
	7.05.2015	7009	ADB	ESB	15:55	17:10	75
	7.05.2015	7154	ESB	BJV	19:40	21:00	80
5	7.05.2015	7069	TZX	ESB	06:30	07:45	75
	7.05.2015	7098	ESB	IGD	13:40	15:20	100
6	7.05.2015	7071	ERZ	ESB	10:15	11:45	90
	7.05.2015	7026	ESB	AYT	12:25	13:30	65
	7.05.2015	7031	AYT	ESB	17:35	18:40	65
	7.05.2015	7124	ESB	GZT	19:45	20:55	70
7	7.05.2015	7077	ERZ	ESB	06:30	08:00	90
	7.05.2015	7380	ESB	ECN	08:50	10:00	70
	7.05.2015	7381	ECN	ESB	10:35	11:50	75
	7.05.2015	7046	ESB	MQM	14:15	15:40	85
8	7.05.2015	7079	ERC	ESB	14:05	15:25	80
	7.05.2015	7030	ESB	AYT	16:00	17:05	65
	7.05.2015	7033	AYT	ESB	21:30	22:35	65
	7.05.2015	7058	ESB	MLX	23:20	00:30	70
9	7.05.2015	7083	VAN	ESB	10:45	12:30	105
	7.05.2015	7384	ESB	ECN	19:20	20:30	70
	7.05.2015	7385	ECN	ESB	21:05	22:20	75
	7.05.2015	7054	ESB	EZS	23:20	00:35	75
10	7.05.2015	7089	MSR	ESB	11:40	13:20	100
	7.05.2015	7102	ESB	ADA	14:00	15:05	65
	7.05.2015	7267	ADA	SAW	16:40	18:10	90
	7.05.2015	7346	SAW	BJV	19:15	20:30	75

EK-4. (devam) 07.05.2015 tarihi için δ_{s3}^* modeli ile elde edilen çözümde yer alan toplam
67 uçağın uçuş planı

Uçak	Tarih	Uçuş kodu	Kalkış noktası	Varış noktası	Kalkış saati	Varış saati	Uçuş süresi (dk)
11	7.05.2015	7090	ESB	KSY	08:55	10:30	95
	7.05.2015	7301	KSY	SAW	15:20	17:25	125
	7.05.2015	7262	SAW	ADA	18:30	19:55	85
	7.05.2015	7105	ADA	ESB	21:20	22:25	65
12	7.05.2015	7091	KSY	ESB	11:00	12:45	105
	7.05.2015	7084	ESB	VAN	13:45	15:20	95
	7.05.2015	7207	VAN	SAW	16:25	18:35	130
	7.05.2015	7264	SAW	ADA	22:30	23:55	85
13	7.05.2015	7097	AJI	ESB	15:20	17:05	105
	7.05.2015	7146	ESB	DIY	19:35	20:50	75
14	7.05.2015	7099	IGD	ESB	15:50	17:35	105
	7.05.2015	7255	ESB	SAW	19:15	20:15	60
	7.05.2015	7256	SAW	ESB	21:00	22:00	60
	7.05.2015	7112	ESB	HTY	23:25	00:40	75
15	7.05.2015	7101	ADA	ESB	10:20	11:25	65
	7.05.2015	7096	ESB	AJI	13:15	14:50	95
16	7.05.2015	7115	GNV	ESB	10:20	11:40	80
	7.05.2015	7064	ESB	TZX	12:15	13:35	80
	7.05.2015	7233	TZX	SAW	17:30	19:15	105
	7.05.2015	7230	SAW	TZX	22:20	23:55	95
17	7.05.2015	7121	GZT	ESB	06:40	07:50	70
	7.05.2015	7132	ESB	SZF	08:50	09:45	55
	7.05.2015	7239	SZF	SAW	20:20	21:40	80
	7.05.2015	7298	SAW	ASR	22:15	23:30	75
18	7.05.2015	7129	ADF	ESB	13:50	15:10	80
	7.05.2015	7251	ESB	SAW	17:10	18:10	60
	7.05.2015	7254	SAW	ESB	19:35	20:35	60
	7.05.2015	7058	ESB	MLX	23:20	00:30	70
19	7.05.2015	7143	DIY	ESB	10:20	11:45	85
	7.05.2015	7008	ESB	ADB	14:05	15:25	80
	7.05.2015	7011	ADB	ESB	17:45	19:00	75
	7.05.2015	7134	ESB	SZF	20:00	20:55	55
20	7.05.2015	7145	DIY	ESB	14:00	15:25	85
	7.05.2015	7086	ESB	VAN	16:00	17:30	90
21	7.05.2015	7149	DIY	ESB	06:30	07:55	85
	7.05.2015	7018	ESB	AYT	10:40	11:45	65
	7.05.2015	7027	AYT	ESB	14:00	15:05	65
	7.05.2015	7170	ESB	EDO	16:00	17:20	80

EK-4. (devam) 07.05.2015 tarihi için δ_{s3}^* modeli ile elde edilen çözümde yer alan toplam 67 uçağın uçuş planı

Uçak	Tarih	Uçuş kodu	Kalkış noktası	Varış noktası	Kalkış saati	Varış saati	Uçuş süresi (dk)
22	7.05.2015	7149	DIY	ESB	06:30	07:55	85
	7.05.2015	7070	ESB	ERZ	08:30	09:45	75
	7.05.2015	7223	ERZ	SAW	13:25	15:15	110
	7.05.2015	7228	SAW	TZX	18:30	20:10	100
23	7.05.2015	7151	BJV	ESB	10:25	11:40	75
	7.05.2015	7006	ESB	ADB	12:15	13:35	80
	7.05.2015	7013	ADB	ESB	20:20	21:35	75
	7.05.2015	7180	ESB	TEQ	23:20	00:25	65
24	7.05.2015	7181	TEQ	ESB	07:00	08:00	60
	7.05.2015	7082	ESB	VAN	08:40	10:15	95
	7.05.2015	7207	VAN	SAW	16:25	18:35	130
	7.05.2015	7286	SAW	KYA	19:10	20:20	70
25	7.05.2015	7183	TEQ	ESB	17:40	18:40	60
	7.05.2015	7255	ESB	SAW	19:15	20:15	60
	7.05.2015	7256	SAW	ESB	21:00	22:00	60
	7.05.2015	7016	ESB	ADB	23:30	00:50	80
26	7.05.2015	7191	NKT	ESB	11:05	12:45	100
	7.05.2015	7110	ESB	HTY	15:55	17:10	75
27	7.05.2015	7203	VAN	SAW	11:30	13:40	130
	7.05.2015	7266	SAW	ADA	14:35	16:10	95
	7.05.2015	7105	ADA	ESB	21:20	22:25	65
28	7.05.2015	7209	MQM	SAW	15:20	17:20	120
	7.05.2015	7238	SAW	SZF	18:30	19:50	80
	7.05.2015	7135	SZF	ESB	21:25	22:25	60
29	7.05.2015	7219	EZS	SAW	12:55	14:40	105
	7.05.2015	7224	SAW	ERZ	18:15	19:55	100
	7.05.2015	7075	ERZ	ESB	21:20	22:50	90
	7.05.2015	7068	ESB	TZX	23:40	00:55	75
30	7.05.2015	7226	SAW	TZX	07:00	08:40	100
	7.05.2015	7061	TZX	ESB	10:20	11:40	80
	7.05.2015	7010	ESB	ADB	15:55	17:15	80
	7.05.2015	7015	ADB	ESB	22:20	23:35	75
31	7.05.2015	7227	TZX	SAW	09:10	10:55	105
	7.05.2015	7206	SAW	VAN	13:55	15:55	120
	7.05.2015	7087	VAN	ESB	18:00	19:45	105
	7.05.2015	7370	ESB	CKZ	21:25	22:40	75

EK-4. (devam) 07.05.2015 tarihi için δ_{s3}^* modeli ile elde edilen çözümde yer alan toplam
67 uçağın uçuş planı

Uçak	Tarih	Uçuş kodu	Kalkış noktası	Varış noktası	Kalkış saati	Varış saati	Uçuş süresi (dk)
32	7.05.2015	7231	TZX	SAW	06:30	08:15	105
	7.05.2015	7202	SAW	VAN	09:00	11:00	120
	7.05.2015	7085	VAN	ESB	15:50	17:35	105
	7.05.2015	7074	ESB	ERZ	19:35	20:50	75
33	7.05.2015	7235	SZF	SAW	06:30	07:50	80
	7.05.2015	7232	SAW	TZX	09:20	11:00	100
	7.05.2015	7065	TZX	ESB	14:05	15:25	80
	7.05.2015	7182	ESB	TEQ	16:05	17:10	65
34	7.05.2015	7235	SZF	SAW	06:30	07:50	80
	7.05.2015	7320	SAW	DNZ	14:10	15:10	60
	7.05.2015	7321	DNZ	SAW	17:10	18:10	60
	7.05.2015	7274	SAW	GZT	22:15	23:45	90
35	7.05.2015	7236	SAW	SZF	07:00	08:20	80
	7.05.2015	7133	SZF	ESB	10:15	11:15	60
	7.05.2015	7128	ESB	ADF	12:10	13:20	70
36	7.05.2015	7237	SZF	SAW	08:50	10:10	80
	7.05.2015	7318	SAW	MLX	11:45	13:30	105
	7.05.2015	7319	MLX	SAW	15:30	17:10	100
	7.05.2015	7214	SAW	DIY	18:05	19:55	110
37	7.05.2015	7242	SAW	ESB	08:00	09:00	60
	7.05.2015	7144	ESB	DIY	12:15	13:30	75
	7.05.2015	7147	DIY	ESB	21:20	22:45	85
	7.05.2015	7106	ESB	ADA	23:20	00:20	60
38	7.05.2015	7260	SAW	ADA	07:45	09:10	85
	7.05.2015	7101	ADA	ESB	10:20	11:25	65
	7.05.2015	7102	ESB	ADA	14:00	15:05	65
	7.05.2015	7263	ADA	SAW	20:25	21:55	90
39	7.05.2015	7261	ADA	SAW	09:40	11:10	90
	7.05.2015	7278	SAW	HTY	13:45	15:20	95
	7.05.2015	7111	HTY	ESB	17:40	18:55	75
	7.05.2015	7104	ESB	ADA	19:45	20:50	65
40	7.05.2015	7265	ADA	SAW	06:30	08:00	90
	7.05.2015	7222	SAW	ERZ	11:15	12:55	100
	7.05.2015	7225	ERZ	SAW	20:25	22:15	110
41	7.05.2015	7270	SAW	GZT	07:00	08:30	90
	7.05.2015	7123	GZT	ESB	14:05	15:15	70
	7.05.2015	7036	ESB	AYT	23:30	00:35	65

EK-4. (devam) 07.05.2015 tarihi için δ_{s3}^* modeli ile elde edilen çözümde yer alan toplam
67 uçağın uçuş planı

Uçak	Tarih	Uçuş kodu	Kalkış noktası	Varış noktası	Kalkış saati	Varış saati	Uçuş süresi (dk)
42	7.05.2015	7271	GZT	SAW	09:00	10:40	100
	7.05.2015	7208	SAW	MQM	13:00	14:50	110
	7.05.2015	7047	MQM	ESB	16:10	17:45	95
	7.05.2015	7012	ESB	ADB	18:30	19:50	80
43	7.05.2015	7279	HTY	SAW	15:50	17:30	100
	7.05.2015	7272	SAW	GZT	18:30	20:00	90
	7.05.2015	7125	GZT	ESB	21:25	22:35	70
	7.05.2015	7106	ESB	ADA	23:20	00:20	60
44	7.05.2015	7289	VAS	SAW	16:05	17:30	85
	7.05.2015	7346	SAW	BJV	19:15	20:30	75
	7.05.2015	7155	BJV	ESB	21:30	22:45	75
	7.05.2015	7148	ESB	DIY	23:35	00:55	80
45	7.05.2015	7293	ASR	SAW	08:45	10:00	75
	7.05.2015	7218	SAW	EZS	10:45	12:25	100
	7.05.2015	7053	EZS	ESB	17:45	19:05	80
	7.05.2015	7116	ESB	GNV	19:45	21:00	75
46	7.05.2015	7299	ASR	SAW	06:45	08:00	75
	7.05.2015	7246	SAW	ESB	11:00	12:00	60
	7.05.2015	7066	ESB	TZX	19:35	20:55	80
47	7.05.2015	7299	ASR	SAW	06:45	08:00	75
	7.05.2015	7210	SAW	DIY	09:00	10:50	110
	7.05.2015	7141	DIY	ESB	14:00	15:25	85
	7.05.2015	7042	ESB	BAL	18:35	20:00	85
48	7.05.2015	7316	SAW	GNV	12:10	14:00	110
	7.05.2015	7117	GNV	ESB	21:30	22:50	80
	7.05.2015	7076	ESB	ERZ	23:25	00:45	80
49	7.05.2015	7371	CKZ	ESB	08:55	10:10	75
	7.05.2015	7245	ESB	SAW	12:10	13:10	60
	7.05.2015	7294	SAW	ASR	15:00	16:15	75
	7.05.2015	7297	ASR	SAW	20:15	21:30	75
50	7.05.2015	7377	KCO	TZX	09:40	11:10	90
	7.05.2015	7067	TZX	ESB	21:25	22:45	80
	7.05.2015	7068	ESB	TZX	23:40	00:55	75
51	7.05.2015	7380	ESB	ECN	08:50	10:00	70
	7.05.2015	7381	ECN	ESB	10:35	11:50	75
	7.05.2015	7050	ESB	BGG	13:55	15:20	85

EK-4. (devam) 07.05.2015 tarihi için δ_{s3}^* modeli ile elde edilen çözümde yer alan toplam 67 uçağın uçuş planı

Uçak	Tarih	Uçuş kodu	Kalkış noktası	Varış noktası	Kalkış saati	Varış saati	Uçuş süresi (dk)
52	7.05.2015	7387	ECN	ESB	06:30	07:45	75
	7.05.2015	7100	ESB	ADA	08:45	09:50	65
	7.05.2015	7103	ADA	ESB	15:35	16:40	65
	7.05.2015	7257	ESB	SAW	23:20	00:20	60
53	7.05.2015	7043	BAL	ESB	20:30	22:05	95
	7.05.2015	7120	ESB	GZT	23:35	00:45	70
54	7.05.2015	7003	ADB	ESB	09:20	10:35	75
	7.05.2015	7078	ESB	ERC	12:20	13:35	75
55	7.05.2015	7107	ADA	ESB	06:55	08:00	65
	7.05.2015	7088	ESB	MSR	09:40	11:10	90
56	7.05.2015	7171	EDO	ESB	17:50	19:05	75
	7.05.2015	7014	ESB	ADB	20:30	21:50	80
57	7.05.2015	7113	HTY	ESB	06:45	08:00	75
	7.05.2015	7190	ESB	NKT	09:00	10:35	95
58	7.05.2015	7002	ESB	ADB	07:30	08:50	80
	7.05.2015	7007	ADB	ESB	14:05	15:20	75
	7.05.2015	7052	ESB	EZS	16:00	17:15	75
	7.05.2015	7221	EZS	SAW	21:30	23:15	105
59	7.05.2015	7025	AYT	ESB	10:20	11:25	65
	7.05.2015	7122	ESB	GZT	12:25	13:35	70
	7.05.2015	7273	GZT	SAW	20:30	22:10	100
60	7.05.2015	7299	ASR	SAW	06:45	08:00	75
	7.05.2015	7284	SAW	KYA	08:45	09:55	70
	7.05.2015	7287	KYA	SAW	20:50	22:00	70
61	7.05.2015	7021	AYT	ESB	06:45	07:50	65
	7.05.2015	7142	ESB	DIY	08:30	09:50	80
	7.05.2015	7211	DIY	SAW	11:20	13:15	115
	7.05.2015	7288	SAW	VAS	14:15	15:35	80
62	7.05.2015	7292	SAW	ASR	07:00	08:15	75
	7.05.2015	7295	ASR	SAW	16:45	18:00	75
	7.05.2015	7220	SAW	EZS	19:20	21:00	100
63	7.05.2015	7001	ADB	ESB	06:40	07:55	75
	7.05.2015	7114	ESB	GNV	08:35	09:50	75
	7.05.2015	7317	GNV	SAW	16:00	17:50	110
	7.05.2015	7296	SAW	ASR	18:30	19:45	75

EK-4. (devam) 07.05.2015 tarihi için δ_{s3}^* modeli ile elde edilen çözümde yer alan toplam 67 uçağın uçuş planı

Uçak	Tarih	Uçuş kodu	Kalkış noktası	Varış noktası	Kalkış saati	Varış saati	Uçuş süresi (dk)
64	7.05.2015	7285	KYA	SAW	10:25	11:35	70
	7.05.2015	7300	SAW	KSY	12:50	14:50	120
65	7.05.2015	7077	ERZ	ESB	06:30	08:00	90
	7.05.2015	7150	ESB	BJV	08:35	09:55	80
	7.05.2015	7347	BJV	SAW	21:00	22:15	75
66	7.05.2015	7060	ESB	TZX	08:30	09:50	80
	7.05.2015	7367	TZX	YEI	11:35	13:15	100
	7.05.2015	7368	YEI	TZX	15:15	16:50	95
	7.05.2015	7229	TZX	SAW	20:40	22:25	105
67	7.05.2015	7376	TZX	KCO	07:30	09:10	100

EK-5. Ocak, Şubat ve Mart aylarının EKDG'leri

Tarih	Gerçekleştirilen uçuş ayağı sayısı	EKDĞ (δ_{S1}^*) (dk)	EKDĞ (δ_{S2}^*) (dk)	EKDĞ (δ_{S3}^*) (dk)
1.01.2015	105	3598	4157	5160
2.01.2015	140	4459	5994	6810
3.01.2015	125	4224	6063	6390
4.01.2015	174	5611	6907	8640
5.01.2015	160	5085	6204	7410
6.01.2015	115	3671	5678	6000
7.01.2015	133	4486	5593	6570
8.01.2015	137	4501	5808	7080
9.01.2015	177	5293	6890	8430
10.01.2015	147	4832	5959	7290
11.01.2015	161	5116	6813	8041
12.01.2015	153	4932	5793	7110
13.01.2015	115	3901	5583	6210
14.01.2015	132	4391	5929	6600
15.01.2015	145	4567	5758	6990
16.01.2015	181	5932	7583	9121
17.01.2015	153	4961	7114	7710
18.01.2015	164	5145	6439	7770
19.01.2015	162	5315	6252	7890
20.01.2015	122	3908	5019	5910
21.01.2015	157	5093	8041	8641
22.01.2015	165	5108	6427	8221
23.01.2015	189	6008	7424	9060
24.01.2015	163	5182	6381	7800
25.01.2015	180	5416	6739	8430
26.01.2015	176	5646	6573	8140
27.01.2015	137	4426	5854	6600
28.01.2015	160	5056	6376	7530
29.01.2015	164	5126	6726	8190
30.01.2015	189	5964	7671	9150
31.01.2015	162	5286	6430	7500
1.02.2015	180	5443	6909	8310
2.02.2015	176	5537	6814	8520
3.02.2015	142	4355	5703	6540
4.02.2015	164	5232	6931	7980
5.02.2015	168	5174	6447	8820
6.02.2015	190	5967	8114	8911
7.02.2015	166	5273	6153	7650
8.02.2015	184	5649	6777	8520
9.02.2015	174	5531	6969	8820
10.02.2015	136	4260	6177	6480

EK-5. (devam) Ocak, Şubat ve Mart aylarının EKDG'leri

Tarih	Gerçekleştirilen uçuş ayağı sayısı	EKDG (δ_{s1}^*) (dk)	EKDG (δ_{s2}^*) (dk)	EKDG (δ_{s3}^*) (dk)
11.02.2015	159	5170	7362	7530
12.02.2015	157	5020	6473	7710
13.02.2015	187	5729	8197	8761
14.02.2015	157	5242	5920	7980
15.02.2015	175	5394	6668	8220
16.02.2015	162	5171	6072	7530
17.02.2015	135	4286	5631	6210
18.02.2015	155	4922	6422	7680
19.02.2015	164	5259	6434	8190
20.02.2015	186	5756	7143	8940
21.02.2015	157	5168	5963	7230
22.02.2015	172	5594	7377	8400
23.02.2015	166	5132	6289	7860
24.02.2015	127	3957	6161	5940
25.02.2015	164	5409	6709	7860
26.02.2015	164	5066	6781	7830
27.02.2015	186	5655	7300	7120
28.02.2015	160	5344	5914	7470
1.03.2015	178	5644	7601	9271
2.03.2015	172	5308	6727	7980
3.03.2015	127	4232	6373	9810
4.03.2015	156	4929	6876	7740
5.03.2015	163	5169	6518	7740
6.03.2015	189	5895	7359	9060
7.03.2015	161	5284	6189	7530
8.03.2015	178	5698	8168	8791
9.03.2015	173	5485	6890	8580
10.03.2015	139	4570	6514	8190
11.03.2015	154	5050	7142	7770
12.03.2015	162	5349	6462	7680
13.03.2015	194	6053	8035	9481
14.03.2015	172	5509	6852	8160
15.03.2015	177	5756	8003	8851
16.03.2015	178	5609	6936	9000
17.03.2015	138	4350	5542	6360
18.03.2015	161	5182	6722	8490
19.03.2015	171	5238	6626	8310
20.03.2015	192	5839	7695	9240
21.03.2015	165	5405	6162	7740
22.03.2015	181	5943	7625	9240
23.03.2015	174	5437	7435	8700

EK-5. (devam) Ocak, Şubat ve Mart aylarının EKDG'leri

Tarih	Gerçekleştirilen uçuş ayağı sayısı	EKDG (δ_{s1}^*) (dk)	EKDG (δ_{s2}^*) (dk)	EKDG (δ_{s3}^*) (dk)
24.03.2015	134	4110	5717	6900
25.03.2015	165	5200	7049	8130
26.03.2015	171	5350	7243	8230
27.03.2015	196	6214	7997	9480
28.03.2015	173	5956	7617	8820
29.03.2015	200	6201	8701	10531
30.03.2015	204	6287	8719	9991
31.03.2015	187	5861	8047	9270

EK-6. Ocak, Şubat ve Mart aylarında gereken uçak sayıları

	SURM ₁ (δ_{s1}^*)					SURM ₂ (δ_{s2}^*)					SURM ₃ (δ_{s3}^*)					BM
	DÇEKG	DÇOG	DÇEBG	EKDG	SM	DÇEKG	DÇOG	DÇEBG	EKDG	SM	DÇEKG	DÇOG	DÇEBG	EKDG	SM	
1.01.2015	1238	1529	2872	3415	8	1506	2002	3753	4157	9	1868	2429	4571	5160	13	-
2.01.2015	1676	2050	3839	4490	3	1947	2583	4868	5994	6	2465	3077	5793	6810	8	-
3.01.2015	1518	1898	3549	3963	6	1859	2509	4741	6063	6	2282	2884	5434	6390	8	-
4.01.2015	2163	2571	4827	5377	6	2476	3292	6147	6907	8	3380	4043	7636	8640	10	-
5.01.2015	1945	2292	4323	4766	5	2381	3000	5623	6204	7	2865	3594	6752	7410	10	-
6.01.2015	1332	1701	3181	3519	6	1753	2345	4371	5678	6	2075	2652	4973	6000	9	-
7.01.2015	1668	2043	3854	4474	5	1990	2714	5049	5593	7	69	484	3271	6570	10	-
8.01.2015	1619	2054	3847	4428	5	1178	1830	3328	5808	6	2569	3292	6176	7080	9	-
9.01.2015	2056	2485	4651	5421	3	2541	3350	6252	6889	7	3312	4024	7573	8430	10	-
10.01.2015	1779	2160	4048	4847	6	1971	2644	4945	5959	6	2647	3244	6122	7290	9	-
11.01.2015	1940	2376	4440	5005	5	2518	3121	5876	6812	6	3228	3831	7211	8040	9	-
12.01.2015	1849	2206	4135	4847	4	2134	2801	5222	5793	8	2763	3380	6347	7110	9	-
13.01.2015	1395	1750	3281	3711	5	1768	2422	4572	5583	6	2172	2768	5225	6210	10	-
14.01.2015	1499	1989	3716	4248	7	1857	2570	4795	5929	5	2559	3074	5764	6600	9	-
15.01.2015	1807	2176	4058	4623	6	2279	2871	5407	5758	7	2793	3410	6412	6990	9	-
16.01.2015	2184	2615	4900	5699	5	2592	3397	6401	7583	7	3411	4109	7745	9120	9	-
17.01.2015	1886	2229	4178	4907	5	1654	2422	4514	7114	5	2822	3387	6345	7710	7	-
18.01.2015	2003	2339	4394	4915	5	1764	2459	4566	6438	7	2220	2786	5169	7770	10	-
19.01.2015	1919	2314	4313	4960	4	2278	2899	5487	6252	7	2938	3586	6756	7890	10	-
20.01.2015	1486	1854	3470	3823	6	1920	2476	4598	5019	7	2263	2878	5410	5910	9	-
21.01.2015	669	1016	2419	4678	4	2457	3105	5846	8041	7	3075	3667	6866	8641	9	-
22.01.2015	2023	2416	4522	4931	5	1659	2445	4576	6427	6	1956	2656	4944	8220	10	-
23.01.2015	2127	2630	4897	5685	4	2775	3456	6514	7424	6	2188	2957	5435	9060	8	-
25.01.2015	2094	2598	4896	5450	5	2631	3299	6222	6739	8	3324	4075	7698	8430	10	-
26.01.2015	2166	2557	4799	5327	5	1614	2411	4532	6573	7	3378	3976	7482	8340	10	-
27.01.2015	1634	2027	3828	4229	6	2063	2672	5042	5854	6	413	804	3449	6600	9	-
28.01.2015	1769	2109	3929	4887	5	291	879	3391	6376	7	566	1158	3808	7530	8	-
29.01.2015	1973	2376	4446	4947	5	2424	3139	5887	6723	6	3056	3772	7076	8190	9	-
30.01.2015	2323	2704	5072	5737	6	2777	3500	6562	7671	7	3403	4223	7954	9150	9	-

EK-6. (devam) Ocak, Şubat ve Mart aylarında gereken uçak sayıları

	SURM ₁ (δ_{s1}^*)					SURM ₂ (δ_{s2}^*)					SURM ₃ (δ_{s2}^*)					BM
	DÇEKG	DÇOĞ	DÇEBG	EKDG	SM	DÇEKG	DÇOĞ	DÇEBG	EKDG	SM	DÇEKG	DÇOĞ	DÇEBG	EKDG	SM	
31.01.2015	1965	2357	4396	5049	4	2211	2967	5577	6430	6	453	1100	3898	7500	8	-
1.02.2015	2189	2587	4853	5357	1	2559	3291	6210	6901	7	2189	2932	5481	8310	0	SURM ₃
2.02.2015	2097	2539	4734	5347	1	2663	3315	6243	6814	6	3391	4020	7562	8520	0	SURM ₃
3.02.2015	1694	2092	3933	4479	0	1234	1804	3366	5703	5	1638	2226	4137	6540	0	SURM ₃
4.02.2015	2053	2450	4585	5019	1	2553	3217	6034	6931	6	3154	3816	7168	7980	0	SURM ₃
5.02.2015	2000	2416	4553	5059	0	2624	3230	6022	6447	6	3132	3874	7296	8280	0	SURM ₃
6.02.2015	2310	2716	5062	5773	0	1863	2793	5169	8114	5	3396	4266	8022	8911	0	SURM ₃
7.02.2015	1968	2397	4465	5282	0	2374	3009	5654	6153	6	2679	3356	6258	7650	0	SURM ₃
8.02.2015	2174	2566	4802	5371	0	1811	2581	4766	6776	6	3427	4102	7732	8520	0	SURM ₃
9.02.2015	2055	2493	4680	5307	0	1892	2515	4656	6969	6	3145	3948	7403	8820	0	SURM ₃
10.02.2015	1632	2019	3768	4071	0	2079	2749	5164	6177	7	2577	3179	6026	6480	1	SURM ₁ /SURM ₃
11.02.2015	1938	2382	4440	4779	0	2406	3138	5904	7362	5	3044	3696	6955	7530	0	SURM ₃
12.02.2015	1833	2294	4302	4741	0	1919	2509	4695	6472	6	1839	2691	5012	7710	0	SURM ₃
13.02.2015	2239	2662	5007	5737	1	2660	3510	6572	8197	7	2375	3017	5626	8761	0	SURM ₃
14.02.2015	1962	2325	4327	4880	1	2209	2865	5372	5919	7	2868	3493	6563	7980	0	SURM ₃
15.02.2015	2099	2490	4649	5161	0	2569	3260	6120	6668	6	3222	3993	7569	8220	0	SURM ₃
16.02.2015	1973	2389	4483	4909	0	2294	2975	5550	6072	8	2890	3629	6840	7530	0	SURM ₃
17.02.2015	1567	1982	3740	3951	0	2070	2672	5004	5631	6	2485	3086	5803	6210	0	SURM ₃
18.02.2015	2001	2356	4402	4749	0	2436	3130	5892	6421	6	3037	3681	6913	7680	0	SURM ₃
19.02.2015	1982	2371	4434	4999	0	2488	3176	5935	6434	8	3047	3797	7160	8190	1	SURM ₁ /SURM ₃
20.02.2015	2122	2577	4818	5525	0	2728	3453	6471	7143	7	3477	4164	7814	8940	0	SURM ₃
21.02.2015	1923	2295	1297	5004	0	2064	2738	5149	5963	8	2793	3355	6323	7230	2	SURM ₁ /SURM ₃
22.02.2015	2094	2491	1670	5197	1	2526	3247	6116	7376	7	3285	3987	7476	8400	1	SURM ₃
23.02.2015	1946	2358	4403	4931	0	1674	2330	4312	6289	7	2780	3660	6909	7860	0	SURM ₃
24.02.2015	1480	1882	3536	3925	0	725	1254	2810	6161	7	311	733	3037	5940	0	SURM ₃
25.02.2015	1938	2356	4408	5101	0	1955	2579	4837	6709	4	3091	3782	7040	7860	0	SURM ₃
26.02.2015	1933	2322	4351	4868	0	1794	2466	4587	6781	7	3102	3768	7108	7830	0	SURM ₃

	SURM ₁ (δ_{s1}^*)					SURM ₂ (δ_{s2}^*)					SURM ₃ (δ_{s2}^*)					BM
	DÇEKG	DÇOĞ	DÇEBG	EKDG	SM	DÇEKG	DÇOĞ	DÇEBG	EKDG	SM	DÇEKG	DÇOĞ	DÇEBG	EKDG	SM	
27.02.2015	2244	2683	5026	5587	0	2701	3516	6643	7300	6	3390	4226	7992	9120	0	SURM ₃
28.02.2015	1770	2348	4388	5006	1	2145	2824	5309	5914	6	2760	3458	6508	7470	1	SURM ₃
1.03.2015	2184	2585	4845	5475	0	2598	3429	6426	7601	8	3282	4129	7788	9271	1	SURM ₁ /SURM ₃
2.03.2015	2054	2493	4665	5261	0	2502	3126	5843	6727	8	3247	3841	7219	7980	1	SURM ₁ /SURM ₃
3.03.2015	1585	1927	3621	4031	0	1761	2613	4910	6373	5	2246	3022	5691	6810	0	SURM ₃
4.03.2015	1760	2150	4009	4956	0	1813	2545	4785	6876	6	3093	3671	6922	7740	0	SURM ₃
5.03.2015	1966	2397	4509	4879	0	2530	3198	6037	6517	7	2033	2730	5059	7740	2	SURM ₁ /SURM ₃
6.03.2015	2293	2709	5059	5623	0	2691	3551	6663	7359	6	2381	3104	5795	9060	0	SURM ₃
7.03.2015	1916	2344	4385	5071	0	2221	2895	5452	6189	7	2853	3526	6605	7530	0	SURM ₃
8.03.2015	2158	2581	4861	5601	0	2741	3474	6532	8168	8	3486	4138	7785	8791	0	SURM ₃
9.03.2015	2109	2508	4693	5239	0	2497	3248	6100	6890	7	3153	3908	7396	8580	0	SURM ₃
10.03.2015	1639	2064	3869	4203	1	2151	2869	5422	6514	7	2715	3291	6115	7290	1	SURM ₃
11.03.2015	1869	2294	4288	4727	1	2426	3096	5808	7142	6	2899	3607	6776	7770	0	SURM ₁ /SURM ₃
12.03.2015	1973	2389	4469	4871	0	2342	3137	5910	6462	6	3092	3726	7011	7680	1	SURM ₁ /SURM ₃
13.03.2015	2341	2753	5172	5781	0	2904	3692	6997	8035	6	1716	2377	4738	9481	0	SURM ₃
14.03.2015	2018	2450	4607	5546	0	2264	3082	5815	6852	6	2928	3724	6959	8160	2	SURM ₁ /SURM ₃
15.03.2015	834	1350	2643	5435	0	1759	2500	4651	8003	7	3356	4117	7757	8851	1	SURM ₁ /SURM ₃
16.03.2015	2031	2475	4665	5267	0	2647	3336	6276	6936	7	3238	3989	7515	9000	0	SURM ₃
17.03.2015	1673	2080	3904	4377	0	1439	2148	3957	5542	6	1621	2231	4190	6360	1	SURM ₁ /SURM ₃
18.03.2015	1989	2387	4482	4991	1	2465	3285	6140	6722	6	3120	3828	7197	8490	0	SURM ₃
19.03.2015	1454	1880	3522	5213	0	2544	3252	6104	6626	7	3188	3842	7275	8310	0	SURM ₃
20.03.2015	1537	1997	3708	5725	0	2914	3663	6881	7695	7	1586	2371	4571	9240	0	SURM ₃
21.03.2015	852	1223	2351	4821	0	331	891	3438	6162	7	2850	3584	6755	7740	0	SURM ₃
22.03.2015	2093	2587	4860	5507	0	2729	3548	6649	7625	8	3396	4188	7901	9240	0	SURM ₃
23.03.2015	2071	2512	4709	5317	1	1951	2698	4951	7435	7	3283	3993	7532	8700	0	SURM ₃
24.03.2015	1597	1996	3736	4264	0	1984	2662	5027	5717	7	2451	3141	5897	6900	0	SURM ₃
25.03.2015	1942	2448	4569	4929	0	2615	3305	6198	7049	6	1900	2795	5181	8130	0	SURM ₃
26.03.2015	711	1078	2442	4898	1	1930	2653	4898	7243	7	1972	2813	5232	8280	1	SURM ₃
27.03.2015	2349	2765	5220	5763	0	2903	3719	7020	7997	4	3791	4445	8355	9480	0	SURM ₃
28.03.2015	1195	1594	2924	5399	0	2520	3240	6091	7617	6	3222	3854	7276	8820	1	SURM ₁ /SURM ₃
29.03.2015	2469	2871	5369	6137	0	3096	3823	7171	8701	7	1649	2463	4853	10531	0	SURM ₃
30.03.2015	2415	2830	5304	5956	1	3073	3751	7017	8719	4	3099	3099	5743	9991	0	SURM ₃
31.03.2015	2245	2670	5012	5643	1	2033	2741	5125	8047	7	3019	3019	5567	9270	1	SURM ₃

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : AKINCILAR, Aykan
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 06.07.1985, Ankara
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (236) 201 22 12
 Faks : 0 (236) 201 20 20
 e-mail : aykan.akincilar@cbu.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / Endüstri Mühendisliği	2017
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Endüstri Mühendisliği	2011
Lisans	Gazi Üniversitesi / Endüstri Mühendisliği	2009
Lise	Antalya Anadolu Lisesi	2004

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2012-Halen	Celal Bayar Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2012-2017	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2011-2012	Atılım Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Akincılar, A., Akincılar, E. (2017). A specific issue on sustainability of transportation planning in an urban region: Ambulance location problem. Hermann Knoflach, E. Öcalır-Akünel (Eds), *Engineering Tools and Solutions for Sustainable Transportation Planning*, IGI Global, PA USA, 303-316.

- Akincılar, A. (2017). Do judgmental factors lead to good results in exchange rates system or mislead the financial player? An application in Turkey. Stanković J, Delias P, Marinković S, Sylvie Rochhia (Eds), *Tools and Techniques for Economic Decision Analysis*, IGI Global, PA USA, 43-62.
- Akincılar, A. (2017). Mathematical model for transporting arriving passengers from the airport to the city centre. *Acta Physica Polonica A*, 132(3), 1214-16.
- Akincılar, A., Dağdeviren, M. (2014). A hybrid multi-criteria decision making model to evaluate hotel websites. *International Journal of Hospitality Management*, 36, 263-271.



DİZİN

E

Ekip atama (EA) alt problemi 2,
5, 9, 10, 16, 25, 38, 40, 41, 42,
59, 61, 103

F

Filo atama (FA) alt problemi 2,
5, 6, 7, 9

H

Havayolu çizelgeleme
problemleri (HYÇP) 1, 2, 3,
4, 5, 8, 9, 11, 13, 19, 25, 31,
32, 33, 35, 37, 38, 42, 43, 44,
45, 46, 57, 61, 71, 101, 102,
103, 104

L

Lemma 55

M

Mevcut yaygın strateji 3, 7, 19,
23, 25, 57, 61, 69, 71, 102

N

Nominal çizelgeleme (NÇ) 36,
37, 41

S

Sağlam çizelgeleme (SÇ) 3, 4,
8, 11, 31, 35, 36, 37, 38, 42,
101
Sağlam optimizasyon (SO) 11,
27, 28, 30, 42, 43, 44, 46, 47,
48, 62, 64, 67, 72, 73, 77, 101,
103
Sağlam optimizasyon modeli
(SOM) 27, 48, 57
Sağlam uçak rotalama (SUR) 45,
46, 47, 48, 49, 52, 58, 60, 61,
64, 66, 69, 74, 78, 80, 81, 82,
83, 85, 86, 87, 88, 101, 102
Sağlam uçak rotalama modeli
(SURM) 47, 48, 54, 55, 57,

58, 62, 64, 67, 68, 69, 73, 77,
78, 79, 81, 83, 84, 86, 88, 89,
92, 93, 94, 95, 97, 99, 101,
102, 103, 136, 137, 138, 139,
140

T

Tip I sağlam çizelge 3, 38, 43,
46, 64, 69, 101, 102, 103
Tip II sağlam çizelge 3, 38, 43,
101, 103

U

Uçuş çizelgeleme (UÇ) alt
problemi 5, 9, 103
Uçak rotalama (UR) alt problemi
3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 14, 16,
18, 19, 20, 22, 23, 25, 38, 40,
41, 42, 49, 50, 57, 60, 61, 62,
64, 72, 73, 101, 102, 103

Y

Yeniden çizelgeleme (YÇ) 3,
31, 34, 37



GAZİ GELECEKTİR..