

**HAVAYOLU EKİP ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN
BİR SÜTUN OLUŞTURMA YAKLAŞIMI VE UYGULAMASI**

Gözde ÇANKAYA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2008

ANKARA

Gözde ÇANKAYA tarafından hazırlanan HAVAYOLU EKİP ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN BİR SÜTUN OLUŞTURMA YAKLAŞIMI VE UYGULAMASI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Murat ARIKAN

.....

Tez Danışmanı, Endüstri Mühendisliği A.B.D.

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Serpil EROL

.....

Endüstri Mühendisliği ABD, Gazi Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Murat ARIKAN

.....

Endüstri Mühendisliği ABD, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Ümit YÜCEER

.....

Endüstri Mühendisliği ABD, Çankaya Üniversitesi

Tarih: 19/06/2008

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nermin ERTAN

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Gözde ÇANKAYA

HAVAYOLU EKİP ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN BİR SÜTUN OLUŞTURMA YAKLAŞIMI VE UYGULAMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Gözde ÇANKAYA

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Haziran 2008

ÖZET

Ekip çizelgeleme problemi, hava yolu planlamasında karşılaşılan zor ve kapsamlı problemlerden biridir. Personel maliyetleri havayolu şirketinin kontrol edebileceği en büyük gider olduğundan ekipleri uçuş seferlerine etkin olarak atamak havayolu planlamasında oldukça büyük bir önem taşır. Ekip çizelgeleme probleminde, her uçuş seferinin en az bir ekip eşleştirmesi tarafından kapsandığı minimum maliyetli eşleştirmeler kümesi bulunmaya çalışılır. Ancak tüm olası ekip eşleştirmelerini oluşturmak oldukça zordur ve optimal çözümde yer almayacak çok sayıda eşleştirmenin de gereksiz yere oluşturulması anlamına gelir. Bu çalışmada, ekip çizelgeleme probleminin çözümünde literatürde sıkça kullanılan, değişkenlerin dinamik olarak üretildiği bir sütun oluşturma algoritması kullanılmıştır. Ana problem küme kaplama problemi, alt problem ise en kısa yol problemi olarak formüle edilmiştir. Uygun bir çözüm vermeye yetecek sayıda başlangıç eşleştirmesi oluşturulmuş, ana problem ve alt problem iteratif olarak çözülmüştür. Ana problemin çözümünden elde edilen uçuş seferlerine ilişkin dual değerler alt problemin amaç fonksiyonunda kullanılmıştır. Algoritma özel bir havayolu şirketinden alınan verilere uygulanmış ve optimal ekip çizelgeleri oluşturulmuştur.

Bilim Kodu : 906.1.148

**Anahtar sözcükler : Havayolu ekip çizelgeleme, ekip eşleştirme problemi, küme
kaplama problemi, sütun oluşturma algoritması**

Sayfa Adedi : 108

Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Murat ARIKAN

**A COLUMN GENERATION ALGORITHM AND AN APPLICATION FOR
AIRLINE CREW SCHEDULING PROBLEM**

(M.Sc. Thesis)

Gözde ÇANKAYA

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

June 2008

ABSTRACT

Crew scheduling problem is one of the hard and comprehensive problems faced with in airline planning. Since personel costs is the biggest expenditure that an airline could control, assigning crews to flight legs effectively is crucial in airline planning. In crew scheduling problem, the goal is to find the minimum costly set of pairings in that each flight leg is covered at least by one crew pairing. But generating all possible crew pairings is fairly difficult and it also means that a lot of pairings which will not take place in the optimal solution, may be generated unnecessarily. In this study, a column generation approach that is commonly used in crew scheduling literature in which variables are dynamically generated is used for airline crew scheduling problem. The master problem is formulated as a set covering problem while the subproblem is formulated as a shortest path problem. Initial pairings, which are enough to give a feasible solution, are produced and the master and sub-problems are solved iteratively. Dual values related to flight legs obtained from the solution of the master problem is used in the objective function of the sub-problem. The algortihm is applied to a private airline company's crew scheduling problem using real datas and optimal crew schedules are obtained.

Science Code : 906.1.148

Key Words : Airline crew scheduling, crew pairing problem, set covering problem, column generation algorithm

Page Number : 108

Adviser : Ass. Prof. Dr. Murat ARIKAN

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bana yön gösteren, değerli bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan Hocam Yrd. Doç. Dr. Murat ARIKAN'a, çalışmalarına maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a, bana her zaman her konuda destek olan annem Gazihan ÇANKAYA ve babam Mehmet ÇANKAYA'ya ve arkadaşım Dilara'ya en samimi duygularıyla teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
2. PERSONEL ÇİZELGELEME	4
3. HAVAYOLU PLANLAMASI	7
3.1. Uçuş Çizelgesi Oluşturma	8
3.2. Filo Atama	8
3.3. Uçak Rotalama	9
3.4. Ekip Çizelgeleme	9
3.5. Ekip Atama	10
4. HAVAYOLU EKİP ÇİZELGELEME	12
4.1. Tanımlar	13
4.2. Ekip Eşleştirme Optimizasyonu Problemi	16
4.3. Kısıtlar	17
4.4. Problem Kategorileri	18
4.4.1. Günlük problem	19
4.4.2. Haftalık problem	19
4.4.3. İleri tarihli problem	20

Sayfa

4.5. Maliyet Yapısı.....	20
4.6. Matematiksel Formülasyon.....	22
4.7. Personelin Yolcu Olarak Taşınması (Deadhead) Problemi	24
4.8. Hub(Merkez)-ve-Spoke(Hedef) Şebeke Yapısı	26
5. ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI	27
5.1. Satır Yaklaşımı.....	27
5.2. Sütun Yaklaşımı.....	29
5.3. Şebeke Yaklaşımı.....	29
5.4. Doğrusal Programlama Algoritmaları.....	30
5.4.1. Sprint	30
5.4.2. Hacim algoritması	31
5.5. Tamsayılı Programlama Yöntemleri.....	31
5.5.1. Dallanma teknikleri	32
5.5.2. Dallanma ve kesme	35
5.5.3. Dallanma ve fiyatlandırma	35
5.6. Parallelleşme	36
5.7. Dantzig-Wolfe Ayrıştırması.....	36
5.8. Sütun Oluşturma Algoritması	37
6. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	38
7. HAVAYOLU EKİP ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN BİR SÜTUN OLUŞTURMA ALGORİTMASI.....	49
7.1. Sütun Oluşturma Algoritması	49
7.2. Ekip Çizelgeleme Probleminin Sütun Oluşturma Yöntemiyle Çözümü.....	51
8. UYGULAMA	57

	Sayfa
8.1. Kısıtlar.....	58
8.2. Maliyet Yapısı.....	59
8.4. Başlangıç Eşleştirmelerinin Oluşturulması.....	61
8.5. Sütun Oluşturma Algoritması	63
8.5.1. Ana problem.....	64
8.5.2. Alt problem	65
8.6. Algoritmanın İterasyonları.....	68
8.7. Optimal Ekip Çizelgesi	68
8.8. Problemin Küme Kaplama Formülasyonu İle Çözümü.....	70
9. SONUÇLAR	75
KAYNAKLAR	77
EKLER.....	82
EK-1 Literatür araştırması.....	83
EK-2 Sütun oluşturma algoritmasına ilişkin GAMS kodları	85
EK-3 Şebeke yapısı	94
EK-4 Ana problemin 17 adet başlangıç eşleştirmesi ile çözümünü gösteren GAMS optimizasyon programı çıktıları	95
EK-5 Ana problemin 44 eşleştirme ile optimal çözümünü gösteren GAMS optimizasyon programı çıktıları	100
EK-6 Tüm olası eşleştirmelerin oluşturulmasına ilişkin GAMS kodları	102
ÖZGEÇMİŞ	108

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 8.1. Uçuş çizelgesi.....	60
Çizelge 8.2. Başlangıç eşleştirmeleri.....	63
Çizelge 8.3. Optimal ekip eşleştirmeleri.....	68
Çizelge 8.4. Her uçuş seferinin tam olarak bir ekip tarafından kapsandığı optimal ekip çizelgesi.....	69
Çizelge 8.5. Tüm 4' lü yasal eşleştirmeler.....	71
Çizelge 8.6. Tüm 5' li yasal eşleştirmeler.....	73

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Havayolu planlama aşamaları.....	7
Şekil 4.1. Olası bir eşleştirme.....	15
Şekil 7.1. Ana problem alt problem ilişkisi.....	50

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılan bazı kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Kısaltmalar	Açıklama
FAA	Federal Aviation Administration
TAFB	Time Away From Base
MDG	Minimum Duty Guarantee
PMDG	Pairing Minimum Duty Guarantee
TPACS	Trip Pairing For Airline Crew Scheduling
TRIP	Trip Re-evaluation and Improvement Program
SHGM	Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü

1.GİRİŞ

Ekip çizelgeleme problemi, hava yolu planlamasında karşılaşılan en kapsamlı problemlerden biridir. Hava yolları için hava yolu ekibini çizelgelemenin önemi oldukça fazladır. Yakıt maliyetlerinden sonra, personel maliyetleri hava yolları için en büyük maliyet faktörüdür. Personel maliyetleri havayolunun kontrol edebileceği en büyük gider olduğu için, uçuş seferlerine etkin personel ataması, hava yolu planlaması açısından çok büyük önem taşır.

Ekip çizelgeleme problemi genellikle doğrusal olmayan maliyet fonksiyonuna sahip olduğu ve çok sayıda olası eşleştirme içerdiği için çözülmesi zordur. NP-zor yapıda olan problemin çözümünü kolaylaştırmak için geliştirilmiş çok sayıda farklı yöntem mevcuttur. Literatürde sıkça kullanılan çözüm yöntemleri, sütun oluşturma algoritmaları, özellikle genetik algoritma ve tavlama benzetimine dayanan meta-sezgisel teknikler, şebeke çözüm teknikleri ve ayrıştırma algoritmalarıdır.

Bir personel üssünde başlayan ve sonlanan, bir uçuş seferinin varış şehrinin bir sonraki uçuş seferinin kalkış şehri ile uyduğu bir uçuş seferleri sıralaması, eşleştirme olarak adlandırılmaktadır. Her eşleştirmenin kendisi ile ilişkili bir maliyet değeri vardır. Ekip çizelgelemede amaç, önceden belirlenen bir uçuş çizelgesindeki tüm uçuş seferlerini tam olarak bir kere kapsayan minimum maliyetli ekip eşleştirmeleri kümesini bulmaktır.

Bu çalışmada, ekip eşleştirme problemi olarak adlandırılan, havayolu şirketlerine ait uçuş seferlerine, ekipleri optimal olarak atama problemini çözebilmek için bir sütun oluşturma algoritması kullanılmıştır. Çalışmada, her olası uygun ekip eşleştirmesine bir maliyet değeri atanarak, tüm uçuş seferlerini en az bir kere kapsayan minimum maliyetli ekip eşleştirmeleri kümesi elde edilmiştir.

Sütun oluşturma algoritması ile problem ana problem ve alt problem olmak üzere iki aşamaya ayrılır. Ana problem, ekip çizelgeleme probleminin en yaygın formülasyonu olan küme kaplama problemidir. Ana problemde olası tüm yasal eşleştirmeleri

oluşturmak ve bunlar arasından her uçuş seferi en az bir eşleştirme tarafından kapsanacak şekilde minimum maliyetli eşleştirmeler kümesini seçmek, özellikle büyük boyutlu problemler için gereksiz hesaplama karmaşıklığına neden olacağından, bunun yerine değişkenlerin uygun bir alt kümesi başlangıç eşleştirmeleri olarak kullanılmıştır. Alt problem ise uçuş seferlerinin düğümlerle, uçuş seferleri arasındaki uçuş ve mola periyotlarının ise oklarla ifade edildiği bir şebekedeki en kısa yol problemidir. Ana problemde her bir kısıt bir uçuş seferine karşılık gelmektedir. Ana problem ve alt problem iteratif olarak çözülmüştür. Ana problemin çözümünden elde edilen kısıtlara ilişkin dual değerler alt problemin amaç fonksiyonunda kullanılmıştır. Alt problem ile her iterasyonda en negatif indirgenmiş maliyetli eşleştirme bulunarak ana probleme eklenmiştir. Negatif indirgenmiş maliyetli bir eşleştirme bulunmadığında algoritma sonlandırılmıştır. Sütun oluşturma algoritması sonucunda elde edilen amaç fonksiyonu değeri optimal çözümü vermektedir. Yani elde edilen ekip çizelgesi optimaldir.

Çalışmanın ikinci bölümde çizelgelemenin tanımına ve çizelgeleme model sınıflarına yer verilmiş, bu model sınıflarından biri olan personel çizelgelemenin önemine ve uygulama alanlarına değinilmiştir.

Üçüncü bölümde havayolu planlama süreci ve bu süreçte alınması gereken kararlar anlatılmış, sürecin beş temel aşaması açıklanmıştır. Bu beş aşamadan biri olan havayolu ekip çizelgeleme probleminin önemi ve neden seçildiği de bu bölümde vurgulanmıştır.

Dördüncü bölümde havayolu ekip çizelgeleme problemi ayrıntılı olarak açıklanmış, probleme ait bazı tanımlamalar ve kısıtlar verildikten sonra, problemin matematiksel formülasyonu ve eşleştirmelerin maliyet yapısı anlatılmıştır.

Beşinci bölümde havayolu ekip çizelgeleme probleminin çözümüne ilişkin literatürde önerilen çözüm yöntemlerine yer verilmiş, bu yaklaşımların çalışma yöntemleri açıklanmıştır.

Altıncı bölümde havayolu ekip çizelgeleme problemine ilişkin ayrıntılı bir literatür araştırması yapılmış, çalışmalar çözüm yöntemlerine göre ayrılmış ve bir tablo olarak sunulmuştur.

Yedinci bölümde, çalışmada problemin çözüm yöntemi olarak kullanılan sütun oluşturma yöntemi açıklanmış, sütun oluşturma algoritmasının çalışma mantığı ve sağladığı faydalar üzerinde durulmuş, uygulama alanları ve havayolu ekip çizelgeleme problemine çözüm yöntemi olarak seçilmesinin nedeni açıklanmıştır.

Sekizinci bölümde, sütun oluşturma algoritması, özel bir havayolu şirketinden alınan verilere uygulanmış, algoritmanın iterasyonları ve elde edilen optimal ekip çizelgeleri sunulmuştur.

Dokuzuncu bölümde ise çalışmadan elde edilen sonuçlara ve kullanılan yöntemin sağladığı faydalara yer verilmiştir.

2. PERSONEL ÇİZELGELEME

Çizelgeleme, imalat ve hizmet endüstrilerinde çok önemli role sahip bir karar verme sürecidir. Bir firmada çizelgeleme fonksiyonu, matematiksel teknikler veya sezgisel yöntemler kullanarak sınırlı kaynakların görevlere atanması işlemini gerçekleştirir. Kaynakların uygun olarak atanması ile firmanın amaç ve hedeflerine en iyi şekilde ulaşması sağlanır.

Üretim ve hizmet sistemleri pek çok faktör ile karakterize edilmektedirler: makinelerin ya da kaynakların sayısı, yapılandırmaları ve karakteristikleri, otomasyon seviyeleri, malzeme taşıma sistemleri tipleri vs. Tüm bu karakteristikler arasındaki farklılıklar, çok sayıda çizelgeleme modeli olarak ortaya çıkmaktadır.

En bilinen çizelgeleme model sınıfları aşağıda sıralanmıştır:

- Proje Çizelgeleme
- Atölye Tipi Çizelgeleme
- Otomatik Malzeme Taşımalı Üretim Sistemlerini Çizelgeleme
- Grup Çizelgeleme
- Rezervasyon Sistemleri ve Zaman Çizelgeleme
- Personel Çizelgeleme

Bunlar arasında personel çizelgeleme modelleri, ilk beş sınıftan farklıdır ve makine çizelgeleme problemleri yapısına uymaz. Gerçek hayatta makine çizelgeleme ile personel çizelgeleme, makinelerin çizelgelenmesi vardiyaların atanmasına bağlı olduğundan, birbiri ile iç içedir [Pinedo, 1999].

Personel çizelgeleme, bir organizasyonun ürün ya da hizmetine olan talebi karşılayabilmek için gerekli personelin iş çizelgelerini oluşturma sürecidir. Bu sürecin ilk kısmı, hizmet talebini karşılayabilmek için gerekli belirli becerilere sahip personel sayısını hesaplamayı içerir. Farklı zamanlarda gereken personel seviyelerini

karşılacak şekilde bireyler vardiyalara atanır ve sonra da personellere her vardiya için görevler atanır. Süreç boyunca ilgili işyeri anlaşmalarıyla ilişkili tüm endüstriyel tüzükler göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu tip çok kısıtlı ve karmaşık problemlere iyi sonuçlar elde etmek oldukça zordur ve maliyeti minimize eden, çalışanların isteklerini karşılayan, vardiyaları çalışanlar arasında eşit dağıtan ve tüm işyeri kısıtlarını karşılayan optimal çözümler bulmak daha da zordur.

Pek çok organizasyonda, çizelgeleri oluşturmakla görevli kişiler, yüksek seviyede çalışan iş tatmini sağlarken aynı zamanda, doğru personeli doğru zamanda ve doğru maliyetle atamalarına yardımcı olacak karar destek araçlarına ihtiyaç duyarlar. Böyle bir karar destek sisteminin bileşenleri genellikle; veritabanı araçları ve uygun matematiksel model ve algoritmalarından geliştirilmiş çizelgeleme araçları olacaktır [Gopalan ve Talluri, 1998].

Ernst ve ark.'na göre, çizelge oluşturma süreci aşağıda sıralanan bir dizi modülden oluşmaktadır. Belirli uygulama alanlarında bir çizelge oluşturmak için bu modüllerin tamamını ya da bir kaçını göz önünde bulundurmamak gerekebilir [Ernst ve ark., 2004].

- Modül 1: Talep Modelleme
- Modül 2: İzin Günlerinin Çizelgelenmesi
- Modül 3: Vardiya Çizelgeleme
- Modül 4: İş Sıralamaları Oluşturma
- Modül 5: Görev Atama
- Modül 6: Personel Atama

Personel çizelgeleme yöntemleri, havayolu ve demiryolu gibi ulaştırma sistemlerine, polis, ambulans ve itfaiye gibi acil servislere ve sağlık sistemlerine, çağrı merkezlerine, otel, restoran ve perakende satış gibi diğer birçok hizmet organizasyonuna uygulanmıştır. Personel çizelgeleme ulaştırma pazarında

(havaalanları, demiryolları, toplu taşıma araçları ve otobüsler) “*ekip çizelgeleme*” olarak bilinir. Tüm bu uygulamaların ortak özellikleri şunlardır:

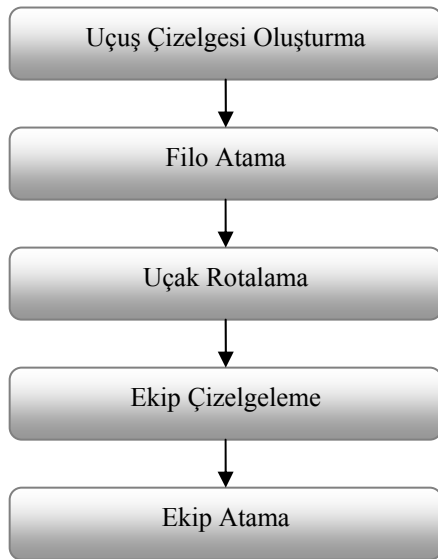
- Her görevin, başlangıç zamanı, başlangıç yeri ve bitiş zamanı, bitiş yeri ile karakterize edilmesi ile geçici ve kalıcı özellikler birlikte dâhil edilir.
- Çalışanlar tarafından gerçekleştirilmesi gereken tüm görevler belirli bir zaman çizelgesinden (uçuş, tren, otobüs ya da metro) belirlenir. Görevler en küçük elemanlardır ve uçuş, tren ya da otobüs yolculuklarının ayrışımından elde edilirler. Bir görev, havayolunda bir uçuş seferi, bir tren seyahatinde ardışık iki ya da daha fazla bölüm arasındaki yolculuk, ya da bir otobüs hattında ardışık iki ya da daha fazla durak arasındaki yolculuk olabilir.

Havayolu ekip çizelgeleme, ekonomik boyutu ve etkisi göz önüne alındığında, personel çizelgeleme uygulamalarının en kapsamlılarından biridir. Ayrıca havayolu planlama sürecindeki en önemli aşamalardan biridir. Bu nedenle, ekip çizelgeleme problemi personel çizelgeleme problemleri arasında ve bunların ulaştırma sistemlerindeki uygulama alanları arasında oldukça büyük öneme sahiptir.

3. HAVAYOLU PLANLAMASI

Havayolu planlaması birbirine bağımlı ve uğraştırıcı birçok planlama probleminden oluşur. Havayolu ekipleri, uçuş seferleri, bakım, envanter, donanım satın alma ve ekiplerin eğitilmesi bunlardan birkaçı olarak sayılabilir. Her planlama probleminin kendine has özellikleri, karmaşıklıkları ve amaçları vardır. Planlama sürecini desteklemek için bu problemlerin her birine ayrı çözüm yaklaşımları önerilebilir.

Havayolları, bir uçuş seferini gerçekleştirmeden önce birçok karar vermek zorundadırlar. Uçuşların nereden nereye, hangi uçakla, hangi ekiple, hangi uçuş görevlileriyle gerçekleştirileceği vb. havayollarının planlama aşamasında vermesi gereken kararlardandır. Bu kararlar planlama sürecinin aşamaları olarak da dikkate alınabilmektedir. Literatürde, sıklıkla, havayolu planlama süreci başlıca beş aşamada incelenmiştir. Aşağıdaki şekilde bu planlama aşamaları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Havayolu planlama aşamaları

Havayolları, bu planlama aşamalarında alınması gereken kararları eş zamanlı ya da bütünsel olarak çözmenin zor olduğunu farkına varmışlardır. Bu nedenle planlamayı aşamalara ayırmışlardır. Bu planlama sürecinde havayolu şirketi ilk olarak uçuş seferleri çizelgesini oluşturmak için nereden nereye ne zaman uçulacağı kararlarını vermek zorundadır. Ardından aynı tipe ya da yolcu kapasitesine sahip

uçakların oluşturduğu filoları belirleyerek hangi uçuş seferinin hangi uçak filosu tarafından uçurulacağı kararı talep vb. veriler dikkate alınarak verilir. Daha sonra filodaki her uçağın izleyeceği uçuş rotası belirlenerek uçak rotalama gerçekleştirilir. Bir sonraki aşamada, uçuş ekiplerinin hangi uçuş seferleri sıralamasını gerçekleştireceği kararı verilir. Bu aşamada her uçuş seferinin tam olarak bir ekip tarafından kapsanması kısıtı önem taşımaktadır. Son aşamada ise uçuş ekiplerine, hangi pilotların, yardımcı pilotların, uçuş görevlilerinin ve diğer uçuş personelinin atanacağı kararları verilir. Aşağıda bu aşamalar ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

3.1. Uçuş Çizelgesi Oluşturma

Sürecin ilk aşamasında havayolu, gerçekleştireceği tüm uçuş seferlerini içeren bir çizelge oluşturmak zorundadır. Bu çizelgeler genellikle o ay için olan trafik tahminlerine, taktik ve stratejik kararlara ve uçuş seferleri için olan dönemsel talep değişikliklerine bağlı olarak oluşturulur. Mevcut durumda neredeyse tüm havayolları bu çizelgeleri manuel olarak hazırlanmaktadır. Bir uçuş seferi, bir merkezden bir hedefe belirli kalkış ve varış zamanları olan aralıksız bir uçuşu ifade eder. Uçuş çizelgesinde, havayolunun gerçekleştirmeyi planladığı her bir uçuş seferine ait kalkış ve varış zamanı ile kalkış ve varış yeri bilgileri yer alır. Dolayısıyla, bu aşamada yapılması gerekenler uçuş seferlerine ait bu yer ve zaman bilgilerine karar vermektir. Başlangıçta oluşturulan çizelge, planlama sürecinin sonuna kadar birçok değişikliğe uğrayabilmektedir.

3.2. Filo Atama

Aynı tipe ya da aynı yolcu kapasitesine sahip uçaklar kümesi *filo* olarak adlandırılmaktadır. Yani filolar birbirinden yolcu kapasitesi ya da uçak tipi açısından farklılık gösterebilirler.

Birinci aşamada uçuş çizelgesi oluşturulduktan sonra, filo atama aşamasında çizelgeyi gerçekleştirebilmek için kaynakların nasıl verimli bir şekilde dağıtılacağına karar verilir. Bu aşamada uçuş seferlerine uygun uçak kümeleri yani filolar, yolcu

kapasiteleri göz önünde bulundurularak, atanır. Eğer çok az talebi olan bir uçuş seferine yüksek yolcu kapasiteli bir uçak atandıysa, bu gereksiz yere katlanılan sabit yüksek uçuş maliyeti ve yakıt israfı oluşturur. Diğer taraftan yüksek talepli bir uçuş seferine, çok küçük bir uçak atandıysa havayolu yolculara bir dahaki sefere hizmet verme şansını kaçıır ve bu da ileriki zamanlar için bir kazanç kaybına yol açar.

Bir uçuş seferinin kazancı, o uçuş seferinin satışlarına yani o uçuş seferi için olan talebe ve kullanılan uçağın büyüklüğüne bağlıdır. Filo atamanın amacı optimal geliri elde edebilmek için kapasite ve talep uyumunu başarmaktır. Yani, filoyu kullanarak uçurulması gereken tüm uçuş seferlerinin uygun olmasını gerektiren kısıtlar altında kazancı maksimize etmektir. Ayrıca diğer kısıtlar da sağlanmalıdır.

3.3. Uçak Rotalama

Her bir uçuş seferi bir filo tipine atandıktan sonra, aynı uçak tarafından uçurulacak uçuş seferleri belirlenmek zorundadır. Bu aşamada filodaki her bir uçağın gerçekleştirmesi gereken uçuş seferleri sıralaması belirlenir. Uçak rotalama problemi, bakım kısıtlarını karşılayacak, filo tarafından uçurulan tüm uçuşların kapsanması ve gelirlerin maksimize edilecek şekilde uçakların rotalanmasını içerir. Bir filonun rotası genellikle aynı istasyonda başlar ve sonlanır. Uygun bir rota, uçak sayısı kısıtlarını karşılamalıdır.

Bu aşamada bazı uçaklar tarafından gerçekleştirilen aktarmalı uçuşlar da belirlenmektedir. Aktarmalı uçuşlardaki yolcuların durak noktalarında araç değiştirmeleri gerekmez.

3.4. Ekip Çizelgeleme

Önceki aşamalarda elde edilen uçuş çizelgesi, filo atamaları ve filolardaki araç rotaları, ekip çizelgeleme aşaması için bir girdi oluşturmaktadırlar. Ekip çizelgeleme problemi, çizelgedeki her uçuş seferinin ekip gereksinimini karşılayacak minimum maliyetli ekip eşleştirmeleri kümesini bulmayla ilgilenir. Bir uçuş seferinin

gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan ekip gereksinimi, uçağa binmesi gereken havayolu personeli anlamına gelmektedir. Bunlar pilotlar, yardımcı pilotlar, uçuş görevlileri, uçak mühendisleri vb. havayolu personelidir. Bu ekip gereksinimleri, filo tipinden bağımsızdır.

Her ekip tipi ya da her genel kategorinin içindeki farklı ekip sınıfları için ekip çizelgeleme problemi ayrı ayrı çözülür. Yani problem, belirli bir filo tipini uçurmak üzere kalifiye edilmiş pilotlar için ya da belirli kıdeme sahip uçuş görevlileri için minimum maliyetli ekip eşleştirmeleri kümesini bulma problemine dönüşebilir. Bu durumda sadece belirli bir filo tipiyle ya da belirli kıdeme sahip uçuş personeli ile gerçekleştirilecek uçuşların probleme dâhil edilmesi gerekmektedir.

Ekip çizelgelemede amaç, önceden belirlenen bir uçuş çizelgesindeki tüm uçuş seferlerini tam olarak bir kere kapsayan minimum maliyetli ekip eşleştirmeleri kümesini bulmaktır. Bir personel üssünde başlayan ve sonlanan, bir uçuş seferinin varış şehrinin bir sonraki uçuş seferinin kalkış şehri ile uyduğu bir uçuş seferleri sıralaması, eşleştirme olarak adlandırılmaktadır. Her eşleştirmenin kendisi ile ilişkili bir maliyet değeri vardır. Her eşleştirmeye bir ekip atanacağından, her uçuş seferi tam olarak bir eşleştirme tarafından kapsanmalıdır. Bir önceki aşamada olduğu gibi çok sayıda zorunluluk ve kısıt, bu aşama süresince de sağlanmalıdır.

3.5. Ekip Atama

Ekip atama aşamasında, pilotlar, yardımcı pilotlar, uçuş görevlileri ve diğer personelin bireysel olarak eşleştirmelere yani ekiplere atanmasıyla ilgilenilir. Ekip atama genellikle iki şekilde gerçekleşir: İlkinde sözleşme kurallarına uyan bir aylık eşleştirmeler oluşturulur ve pilotlar bu eşleştirmeleri kıdemlerine göre sırasıyla seçebilirler. İkincisinde ise pilotlar çizelgede önem verdikleri karakteristiklere puan ya da ağırlık verirler ve böylece her pilot için kıdemine göre optimal çizelge oluşturulur. Pilotlar, kıdemlerine ya da diğer hususlarına göre oluşturulan çizelgeler üzerinde öneri getirebilirler. Çoğu havayolunda pilotlar hangi eşleştirmeyi gerçekleştirdiklerine bakılmaksızın maaşlı olarak çalışmaktadırlar. Bazı

havayollarında pilotlara ödenen ücretler uçurulan eşleştirme verilerine bakarak hesaplanmaktadır. Ancak bu durumda bile pilotlara aylık ve yıllık olarak garanti edilmiş ücret limitleri vardır.

Bu aşamada havayolunun aylık ihtiyaç duyduğu kokpit ekibi sayısı da tam olarak hesaplanabilir. Burada oluşturulan izelge de, önceki iki aşamaya benzer olarak, çok sayıda kısıtı karşılamalıdır.

Havayolu planlamasındaki son iki aşama genellikle “havayolu ekip çizelgeleme” ye karşılık gelmektedir. Ancak bu çalışmada havayolu ekip çizelgeleme ifadesi yalnızca planlama sürecinin 4. aşaması için kullanılacaktır.

Bazı büyük havayolu şirketlerinin hızlı genişlemesi ve seyahat ihtiyaçları için havayolu taşımacılığını tercih eden yolcu sayısındaki patlamaya bağlı olarak, son 30 yılda havayolu planlamasının tüm alanlarına ilişkin problem boyutlarında olağanüstü bir artış görülmüştür. Bu etki en çok havayolu planlamasının ekip çizelgeleme aşamasında kendini hissettirmiştir. Bu nedenle planlama sürecindeki bu beş aşama arasından, havayolu ekibini çizelgelemenin önemi oldukça fazladır. Çalışmanın bundan sonraki kısmında ayrıntılı olarak açıklanacak olan ve çalışmanın konusunu da oluşturan havayolu ekip çizelgeleme problemi, literatürde de pek çok araştırmacının ilėisini çeken bir problem türü olarak ortaya çıkmaktadır.

4. HAVAYOLU EKİP ÇİZELGELEME

Ekip çizelgeleme havayolu planlamasındaki kapsamlı problemlerden biridir. Ekonomik boyutu ve etkisi nedeniyle havayolu ekip çizelgeleme problemi, personel çizelgeleme uygulamalarının da en kapsamlılarından biridir. Yakıt maliyetlerinden sonra, personel maliyetleri hava yolları için en büyük maliyet faktörüdür. Personel maliyetleri havayolunun kontrol edebileceği bir gider olduğu için, uçuş seferlerine etkin personel ataması havayolu planlaması açısından çok önemlidir. Küçük yüzdeli tasarruflar bile havayolları için milyon dolarlık kazanç sağlayabilmektedir. Havayolu ekip çizelgeleme ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Bu araştırmalar sayesinde, kesin sonuç veren matematiksel programlama teknikleri ile sezgiselleri birleştiren ileri optimizasyon teknikleri kullanılarak işletme maliyetlerinde önemli tasarruflar sağlanmıştır.

Önemli Amerikan havayolları periyodik olarak yaklaşık 500 uçak kullanarak günde 150'nin üzerinde şehire 2500 uçuş gerçekleştirmektedirler. Havayolu gerçekleştirmeyi planladığı her uçuş seferi için, belirli bir kokpit ekibi, uçuş görevlileri ekibi ve bir uçak atamak zorundadır. Bu atama aylık bazda, 5000'den fazla kokpit ekibi ve yaklaşık 10000 uçuş görevlisini çizelgelemeyi gerektirir. Dahası, bu ekip çizelgesi çok sayıda *FAA* kuralını, çalışan sözleşmesi kuralını ve havayolları arasında farklılık gösterebilen diğer havayolu kurallarını karşılamak zorundadır. Havayolları, bu görevi manuel olarak yapmanın zorluklarını fark etmişler ve ekip çizelgelemeyi yöneylem topluluğu içinde dikkate alınması gereken bir problem olarak görmeye başlamışlardır. Ekip çizelgeleme problemini matematiksel olarak modellemek ve bir optimizasyon problemi olarak yorumlamak göreceli olarak kolaydır. Modeli etkin bir biçimde çözmek ve pratik bir ekip çizelgesi üretmek ise oldukça uğraştırıcı olabilmektedir [Gopalakrishnan ve Johnson, 2005].

Ekip çizelgeleme farklı havaalanları arasında değişiklik göstermektedir. Küçük hava yolları için ekip çizelgeleme problemini çözmek, büyük hava yollarına oranla daha kolaydır. Özellikle Kuzey Amerika ve Avrupa havayolları arasında büyük farklılıklar görülmektedir. Ekip kategorileri, filo tipleri, şebeke yapıları, kuralları ve

düzenlemeleri, uçuş zaman çizelgelerinin sırası ve maliyet yapıları temel farklılıkları oluşturmaktadır [Ernst ve ark., 2004].

Ekip çizelgeleme probleminin çözümü, aşağıdaki sebeplere bağlı olarak uğraştırıcı olmaktadır:

- Eşleştirmelerin sayısı çoğu havayolu için çok fazladır. Geniş filolar için milyarlarca olası yasal eşleştirme bulunmaktadır.
- Çok sayıda karmaşık iş kuralı ve FAA güvenlik tüzükleri karşılanmak zorundadır. Bu tip kurallardan biri de 24'te 8 kuralıdır. Bu kurala göre; her hangi bir 24 saatlik periyot süresince, önceki görev periyodundaki uçuş zamanının 2 katı olan bir mola ve 8 saat limitinin ihlal edildiği bir görev periyodundan sonra en az 14 saatlik mola verilmeksizin personele 8 saatten fazla uçuş atanamaz.
- Personel maliyetleri karmaşık personel ücret güvencelerine bağlıdır ve doğrusal değildir [Gopalakrishnan ve Johnson, 2005].

Bir havayolu şirketi, belirli bir zaman periyodu içerisinde çeşitli orijin ve hedefleri olan bir dizi uçuş seferi oluşturmak zorundadır. Bu uçuş seferlerini gerçekleştirmek için, havayolu şirketi, ekiplere ihtiyaç duyacaktır ve her ekibi bir ekip eşleştirmesine ataması gerekecektir. Eşleştirme bir ekibin çizelge periyodu boyunca gerçekleştirmesi gereken uçuş seferleri sıralamasıdır. Havayolu ekip çizelgeleme probleminin amacı, tüm uçuş seferlerini tam olarak bir kere kapsayan minimum maliyetli ekip eşleştirmeleri kümesini oluşturmaktır.

Burada, havayolu ekip çizelgeleme problemine ilişkin, çalışmanın bundan sonraki bölümlerinde de sıklıkla kullanılacak olan bazı terimleri açıklamak gerekmektedir.

4.1. Tanımlar

Bir *uçuş seferi*; belirli bir şehirden başka bir şehre giden, kalkış ve varış zamanı ve uçuş periyodu belirli olan aralıksız bir uçuşu ifade eder.

Bir *görev*; personel için günlük iş değeridir.

Personel üssü ya da *merkez üssü*; uçuş ekibinin konumlandığı şehirdir. Havayolu şirketi, uçuş seferlerini gerçekleştirecek olan pilotlar, yardımcı pilotlar ve uçuş görevlilerinden oluşan ekipleri, belirli kural ve kısıtlamalara uyacak şekilde bir dizi uçuş seferine atadıktan sonra, merkez üssüne dönmelerini sağlamalıdır. Bazı havayolu şirketleri için iki farklı şehir ya da aynı şehirdeki iki farklı havaalanı personel üssü olabilmektedir.

Bir *görev periyodu*; birbirinden kısa mola periyotları ile ayrılan bir dizi uçuş seferini ifade eder.

Görev periyoduna dâhil olan *brief* ve *debrief* periyotlar; sırasıyla, uçuş görevi için hazırlık yapılması ile ilk uçuş seferi arasında ve uçuş görevinde bulunan son uçuş seferinin sona ermesinden itibaren geçen sürelerdir.

Uçuş zamanı; gerçek uçuş zamanının toplam saatlik değeridir.

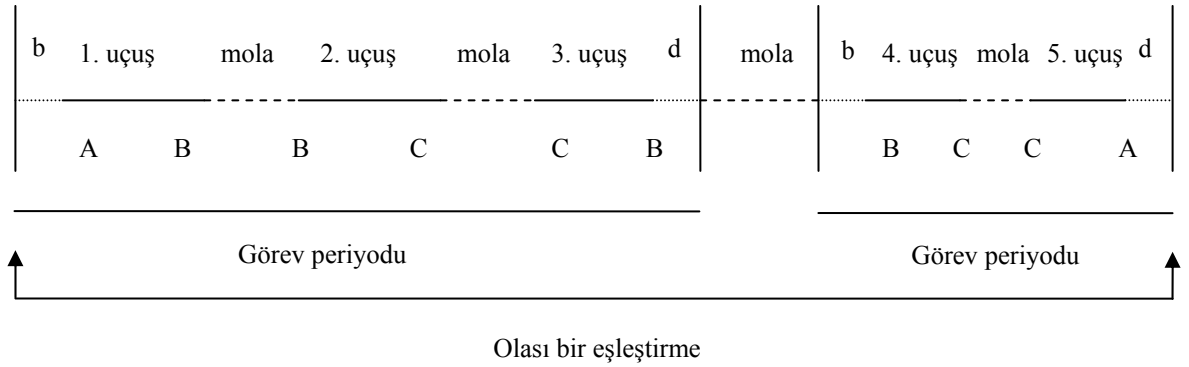
Uçuş görev süresi; brief ve debrief periyotlardan oluşan bir görev periyodu için geçen zaman olarak tanımlanır.

$$\text{Uçuş Görev Süresi} = \sum \left(\begin{array}{l} \text{Brief periyot} \\ \sum \text{Görev periyotlarının uçuş zamanları} \\ \sum \text{Kısa mola periyotları} \\ \text{Debrief periyot} \end{array} \right) \quad (4.1)$$

Bir *eşleştirme*; aralarında uzun (gece) mola periyotları bulunan bir dizi görev periyodu olarak tanımlanabilir. Her eşleştirme, personelin konumlandığı aynı personel üssünde başlar ve biter. Ayrıca eşleştirmenin içerdiği, bir uçuş seferinin varış şehri, bir sonraki uçuş seferinin kalkış şehri ile uyuşmak zorundadır.

Üsten uzakta geçen zaman (TAFB); bir eşleştirmedeki görev periyotları arasında bulunan gece molalarını içeren toplam zaman olarak tanımlanır. Başka bir deyişle eşleştirmede üsten uzakta geçen toplam zamanı ifade eder.

$$TAFB = \sum \text{Uçuş görev süreleri} + \sum \text{Uzun mola periyotları} \quad (4.2)$$



Şekil 4.1. Olası bir eşleştirme

Yukarıdaki şekilde iki görev periyodundan ve beş uçuş seferinden oluşan olası bir eşleştirme görülmektedir.

Burada;

b: Brief periyot,

d: Debrief periyot,

A: Merkez üssü konumundaki şehri ifade etmektedir.

Eşleştirme içinde ardışık iki görev periyodu arasında gerçekleşen mola periyodu *uzun mola periyodu*, bir görev periyodu içerisindeki ardışık iki uçuş seferi arasında gerçekleşen mola periyodu ise *kısa mola periyodu* olarak adlandırılmaktadır.

Bazı durumlarda eşleştirmede personel yolcu olarak uçabilir. Literatürde bu durum *deadheading* olarak adlandırılmıştır. Genellikle bir personeli bir uçuşta görevlendirilmek üzere ihtiyaç duyulduğu bir şehre yeniden konumlandırmak ya da

eşleştirmenin sonunda personelin merkez üssüne geri dönmelerini sağlamak için bu duruma başvurulur.

Bir görev periyodu, personel için iki gece mola periyodu arasına yerleştirilmiş tek bir iş günü olarak görülebilir. Dolayısıyla günlük ekip eşleştirme probleminde eşleştirmeler bir görev periyodundan oluşmaktadır. Yani günlük ekip eşleştirme probleminde görev periyotlarını ayıran gece molaları yoktur.

4.2. Ekip Eşleştirme Optimizasyonu Problemi

Bir merkezden bir hedefe giden bir uçuş seferinin yer ve zaman bilgilerinin yer aldığı çizelge havayolları tarafından uçuş çizelgesi olarak adlandırılmaktadır. Bir havayolu şirketi, belirli bir zaman periyodu içerisinde gerçekleştireceği bir uçuş çizelgesi oluşturmak zorundadır. Bu uçuş çizelgesini gerçekleştirmek için, havayolu şirketi, ekiplere ihtiyaç duyacaktır ve her ekibi bir ekip eşleştirmesine ataması gerekecektir. Eşleştirme, yukarıda tanımlar kısmında da açıklandığı gibi, bir ekibin çizelge periyodu boyunca gerçekleştirmesi gereken ve belirli kural ve kısıtlamalara göre belirlenen bir uçuş seferleri sıralamasıdır. Havayolu ekip eşleştirme probleminin amacı, tüm uçuş seferlerini tam olarak bir kere kapsayan minimum maliyetli ekip eşleştirmeleri kümesini bulmaktır. Havayolları bu eşleştirmeler kümesini elde ettikten sonra her eşleştirmeye bir ekip atamakta ve böylece ekip çizelgelerini oluşturmaktadırlar.

Ancak eşleştirmeleri oluştururken dikkat edilmesi gereken kısıt ve kurallar dışında, bir de farklı personel kategorileri için eşleştirmeleri ayrı ayrı oluşturmak gerekmektedir. Çünkü herhangi bir uçuş seferinde farklı kategorilerde personele ihtiyaç duyulabilmektedir. Bazı personel kategorileri, kaptan, ilk memurlar, uçuş görevlileri vs. dir. Pilotlar sadece belirli uçak tiplerinde uçmak için kalifiye edilmişlerdir ve her kategori için farklı kurallar işler. Böylece eşleştirme problemi personel kategorilerine ayrılır. Bunun avantajı, ekip çizelgeleme probleminin daha küçük parçalara ayrılması ve her uçak tipi için bir problemle sonuçlanmasıdır.

Dezavantajı ise, herhangi bir uçaktaki pilotları yolcu olarak taşımanın (deadheading) mümkün olmamasıdır.

Uçuş görevlilerini çizelgelemek de pilotları çizelgelemeye benzerlik gösterir fakat bu problem, bir uçuş görevlisi birden fazla araç tipinde hizmet verecek şekilde kalifiye edildiği için daha büyük çaplı bir problemdir. Bu yüzden, çeşitli uçak tipleri bireysel olarak dikkate alınmayabilir. Ayrıca, uçuş görevlilerinin uçuş seferlerine atanmasını yöneten kurallar pilotların uçuş seferlerine atanmasını yöneten kurallardan farklılık gösterebilir. Bu nedenle pilot ve uçuş görevlilerini çizelgeleme problemi ayrı ayrı ele alınmalıdır. Bununla birlikte bu iki problemin benzer genel yapıları vardır ve bu nedenle pilot metodolojisi uygulanabilir.

4.3. Kısıtlar

Ekip eşleştirme optimizasyonu problemine uygun bir çözüm bulabilmek için eşleştirmeler,

- FAA tüzüklerine
- sendika sözleşme şartlarına
- havayolları arasında farklılık gösterebilen diğer havayolu kurallarına uymak zorundadır.

Türkiye’ de havayolu şirketleri ekip çizelgelerini oluştururken, Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan “*Uçucu Ekip Uçuş Görev ve Dinlenme Süreleri ile Uygulama Esasları Talimatı*”’ na uymak zorundadırlar.

Bu gibi kısıtlayıcı kurallar, problemin boyutunun azalmasına yardımcı olmaktadır. Ancak optimal bir ekip çizelgesi elde etmek için problemi karmaşıklştırmaktadırlar. Daha önce de belirtildiği gibi eşleştirmeler bir dizi görev periyodunun, görev periyotları da bir dizi uçuş seferinin ardı ardına sıralanmasıyla oluşmaktadır. Dolayısıyla bir ekip çizelgesinin yasal bir çizelge olabilmesi için, içerdiği

eşleştirmelerin ve eşleştirmelerin içerdiği görev periyotlarının yasallık şartlarını sağlaması gerekmektedir.

Bir görev periyodunun yasal bir görev periyodu sayılabilmesi için sağlaması gereken kısıtlar, genel olarak mola süreleri ve uçuş görev sürelerine ilişkin sınırlandırmalardır. Görev periyodu içerisinde gerçekleşen *kısa mola periyotları*, bir maksimum ve minimum değer arasında olmalıdır. Bir görev periyodunda geçen zamanı ifade eden *uçuş görev süresi*, bir görevdeki toplam gerçek uçuş zamanını ifade eden *gerçek uçuş zamanı* sınırı ve bir görev periyodunda gerçekleşen uçuş seferi ya da *inişlerin sayısı* belirli bir üst sınırı aşmamalıdır. Her görev periyodundan önce ve her görev periyodunun bitişinden sonra, uçuş görevi için hazırlık yapılması ile ilk uçuş seferi arasında ve uçuş görevinde bulunan son uçuş seferinin sona ermesinden itibaren geçen süreler olan *brief* ve *debrief* periyotlar için de bir minimum ve maksimum değer söz konusudur. Havayollarının büyüklüğüne, gerçekleştirdikleri sefer sayısına ve ülkelere göre değişiklik gösteren bu kurallara uyan bir görev yasal ya da geçerli bir görev olarak adlandırılır.

Benzer şekilde yasal ya da geçerli bir eşleştirme de bazı kuralları sağlamalıdır. Bu kurallar genellikle, mola periyotları ve görev periyodu sayısına ilişkindir. Bir eşleştirmenin yasal bir eşleştirme olarak adlandırılabilmesi için içerdiği *görev periyodu sayısı* havayolu tarafından belirlenen bir maksimum görev periyodu sayısını aşmamalıdır. Benzer şekilde eşleştirme, görev periyotları arasında gerçekleşen *uzun mola periyotları* da belirli bir alt sınır değerinden büyük olmak zorundadır.

Günlük ekip eşleştirme probleminde eşleştirmeler bir görev periyodundan oluştuğu için, görev periyodu kısıtları aynı zamanda ekip eşleştirme kısıtları olmaktadır.

4.4. Problem Kategorileri

Günlük, haftalık ve ileri tarihli olmak üzere üç tip ekip eşleştirme problemi vardır. Bu problemlerin her birinde, belirli bir ekip kategorisi ve filo tipi için tüm uçuş

seferlerini kapsayan minimum maliyetli bir ekip eşleştirmeleri kümesini bulmak amaçlanır.

Havayolu ekip eşleştirme problemi kategorileri aşağıda açıklanmıştır:

4.4.1. Günlük problem

Ekip çizelgeleme süreci günlük ekip eşleştirme optimizasyon problemi ile başlar. Günlük problemde, tüm uçuş seferlerinin her gün gerçekleşeceği varsayılmıştır. Bir günlük problemin çözümü, tek bir günde tüm uçuş seferlerinin kapsandığı bir eşleştirmeler kümesini içerir. Bu çözümden yola çıkarak, tüm eşleştirmeleri bir güne atandıktan sonra kendini tekrar ederek, haftalık istisnalar ve ekip üssü dengelemesi için ayarlamalar yapılarak, istenen zaman eksenini için ileri tarihli bir versiyon elde edilebilir. Böylece, tüm uçuş seferlerinin, zaman ekseninin her günü kapsanması sağlanmaktadır.

Aylık her uçuş seferini tam olarak kapsayan eşleştirmeler bulunduğundan sonra, o aya ait çizelgeler oluşturulur ve bir öneri süreci ya da kılme göre ekip üyelerine atanır.

4.4.2. Haftalık problem

Zaman çizelgesinin kendini haftanın her günü tekrarladığı varsayımına dayanmaktadır. Haftalık problem genellikle ilk olarak günlük problem çözüldükten sonra ele alınır. Havayolları çoğunlukla haftalık istisnaları uydurmak için günlük problemi çözüldükten sonra değiştirirler. Bu genellikle iyi bir haftalık çizelgeyle sonuçlanır. Ancak bazı havayollarında haftalık istisnalar çok fazladır, bu nedenle günlük problemi değiştirerek elde edilen çözümler optimalden uzak sonuçlar verebilmektedir.

4.4.3. İleri tarihli problem

İleri tarihli problem için zaman eksenini genellikle bir aydır. Bu problemi çözmek için öncelikle haftalar arasındaki farklılıklar dikkate alınmalıdır. Günlük çözümün haftalık çözüm için uygun bir çözüm olmama ihtimali olduğu gibi, haftalık çözümü de ileri tarihli çözüme genişletmek tatiller ya da zaman çizelgesi değişikliklerine bağlı olarak mümkün olmayabilir. Ay içerisinde bazı haftalar süresince gerçekleşen uçuş iptallerine ya da yeni uçuşların eklenmesine bağlı olarak zaman çizelgesinde değişiklikler ortaya çıkabilmektedir. İleri tarihli problem hem günlük hem de haftalık probleme göre daha uğraştırıcı bir problemidir. Bu problemde günlük ve haftalık problemlerin düzenlilik özelliği olmayabilir ve bu durum problem boyutunda bir patlama ile sonuçlanabilir. Ayrıca haftalık problemi, aylık problemin çözümünde kullanmaya çalışmak kalitesiz çözümlere götürebilir.

Yukarıda açıklanan bu üç problem tipi arasında, en çok çözülen günlük ekip eşleştirme problemidir. Literatürde yapılan çalışmaların büyük bir kısmı da ekip eşleştirme problemini günlük bazda ele alarak çözmüştür. Planlama aşamasında oluşan aşırı maliyetlerin çoğu günlük atama probleminden kaynaklanır. Bu nedenle tasarruflar açısından, günlük eşleştirmeleri optimize etmek bu süreçteki en önemli aşamadır ve yöneylem araştırması teknikleri sayesinde ekip maliyetlerini azaltmada oldukça büyük bir fırsat sağlar. Bu nedenle çalışmada ele alınan problemde de amaç günlük ekip eşleştirmelerini optimize etmeyle sınırlandırılmıştır.

4.5. Maliyet Yapısı

FAA tüzükleri ve sendika sözleşme kuralları yasal görev periyotlarının ve yasal eşleştirmelerin yapısını ve maliyetini belirlemektedir. Havayollarının tüm ekiplere ödediği ücretler tüm personel maliyetlerine baskın gelmektedir. Ekip eşleştirme modeli sadece ekibin üstten uzakta olduğu zamanın uzunluğuyla ve personelin yolcu olarak taşınmasıyla ilgili artan maliyetleri dikkate alır. Bu maliyetler, uçuş zamanına ilave aşırı maliyetlerdir. Her yasal eşleştirme için sabit olan yakıt masraflarının yanısıra eşleştirmelerin aşırı maliyetlerinin temel sebepleri;

- görev periyotları içerisinde gerçekleşen kısa mola periyotlarının sıklığı
- uzun mola periyotları
- personeli yolcu olarak taşıma maliyetleridir.

Eşleştirmenin maliyeti genellikle şu formül kullanılarak hesaplanır:

$$\text{Eşleştirme Maliyeti} = \text{Max} \begin{cases} \text{Eşleştirmedeki Görev Sayısı} * \text{PMDG} \\ \text{TAFB Faktör} * \text{TAFB} \\ \text{Toplam Görev Maliyeti} \end{cases} \quad (4.3)$$

PMDG (pairing minimum duty guarantee); görev periyodunun uzunluğuna bakılmaksızın bir eşleştirmedeki her görev için personele ücret ödenmesinin garantilendiği minimum saat sayısı,

TAFB Faktör; üsten uzakta geçen toplam zaman (TAFB) ile ilişkili bir kesir,

Toplam Görev Maliyeti; eşleştirmedeki tüm görev periyotlarının maliyetleri toplamıdır.

Görev maliyeti eşleştirme maliyetininkine benzer bir formül ile hesaplanır.

$$\text{Görev Maliyeti} = \text{Max} \begin{cases} \text{MDG} \\ \text{Uçuş Görev Süresi Faktörü} * \text{Uçuş Görev Süresi} \\ \text{Uçuş Zamanı} \end{cases} \quad (4.4)$$

Burada;

MDG (minimum duty guarantee); bir görevdeki personel için ücretin garantilenmiş minimum saat sayısını,

Uçuş Görev Süresi Faktörü; görev periyoduna ait uçuş görev süresiyle ilişkili bir kesiri,

Uçuş Zamanı ise görev periyodunda gerçekleşen gerçek uçuş zamanının toplam saatlik değerini ifade eder.

Günlük ekip eşleştirme probleminde eşleştirmeler bir görev periyodundan oluştuğu için, eşleştirme maliyetlerini hesaplama zorunluluğu, görev periyodu maliyetlerini hesaplama zorunluluğuna dönüşecektir.

Görev periyodunun maliyeti, toplam görev zamanının belirli bir yüzdesi kadardır. Eğer bir görev periyodunda gerçekleşen gerçek uçuş zamanı bu değerden büyükse, bu ekstra bir maliyet getireceğinden, görev periyodunun maliyeti de bu değer kadar alınır. Bu değer ise her bir görev periyodu için belirlenen bir minimum süreden az olmamalıdır. Bu nedenle görev periyodunun maliyeti hesaplanırken bu üç değerden maksimum olanı alınır. Bu nedenle eşleştirmelerin maliyetleri doğrusal değildir.

Çizelgedeki toplam uçuş saati, verilen bir çizelgenin maliyeti açısından bir alt sınır olacaktır. Eşleştirmedeki toplam uçuş zamanına oranla yüksek TAFB'lara sahip eşleştirmeler pahalı eşleştirmelerdir. Bununla birlikte çizelgedeki tüm uçuş seferlerini en düşük maliyetle uçurabilmek için birkaç pahalı eşleştirme gerekli olabilmektedir. Ekip eşleştirme optimizasyonunda esas amaç, tüm uçuş seferlerini tam olarak bir kere kapsayan ve çizelgenin toplam uçuş zamanına mümkün olduğunca yakın maliyete sahip eşleştirmeler kümesini bulmaktır.

4.6. Matematiksel Formülasyon

Ekip eşleştirme probleminin herhangi bir çözümü bazı kısıtları sağlamak zorundadır ve bu kısıtlar matematiksel modelde dikkate alınmalıdır. Çözümdeki tüm eşleştirmelerin yasal olması gerekir yani tüm FAA kurallarını ve yasal eşleştirmeleri etkileyen diğer kuralları sağlamalıdır. Yasal bir eşleştirmeyi matematiksel olarak karakterize etmek imkânsız olduğundan, bir eşleştirme yasallık açısından kontrol edilmek için sıralanmalıdır.

Genellikle ekip eşleştirme problemi iki aşamada çözülür: İlk aşamada tüm yasal eşleştirmeler oluşturulur ve maliyetleri hesaplanır ve daha sonra bu eşleştirmelerin iyi bir altkümesi tüm uçuş seferlerini kapsayacak şekilde seçilir.

Havayolu ekip çizelgeleme problemi literatürde genellikle bir *küme ayrıştırma* ya da *küme kaplama* modeli olarak formüle edilmektedir.

Küme ayrıştırma modeli literatürde, araç rotalama, ekip çizelgeleme, devre ayrıştırma gibi birçok problemin çözümünde kullanılmaktadır.

Küme ayrıştırma ve küme kaplama modelinde olası tüm yasal eşleştirmelerin oluşturulduğu ve maliyetlerinin hesaplandığını varsayılmaktadır. Pratikte, sayıları çok fazla olduğundan tüm yasal eşleştirmeleri uygun olarak oluşturmak mümkün değildir. Genellikle yasal eşleştirmelerin tam üretimi için bir sütun oluşturma algoritması uygulanır. Aşağıda havayolu ekip çizelgeleme problemini küme kaplama ve küme ayrıştırma modeli ile nasıl formüle edildiği gösterilmiştir. Modelde kullanılan notasyonlar aşağıdaki gibidir:

- i ; uçuş seferi ($i = 1, 2, \dots, m$)
- j ; eşleştirme ($j = 1, 2, \dots, n$)
- $c(j)$; j eşleştirmesinin maliyeti
- $x(j)$; j eşleştirmesinin optimal çözümde yer alıp almayacağını gösteren 0-1 değişken
- $a(i, j)$; i uçuş seferinin j eşleştirmesi tarafından kapsanıp kapsanmadığını gösteren 0-1 parametre

Küme ayrıştırma modeli

$$\text{Min } z = \sum_{j=1}^n c(j) * x(j) \quad (4.5)$$

subject to

$$\sum_{j=1}^n a(i, j) * x(j) = 1 \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (4.6)$$

$$x(j) \in \{0, 1\} \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (4.7)$$

Küme kaplama modeli

$$\text{Min } z = \sum_{j=1}^n c(j) * x(j) \quad (4.8)$$

subject to

$$\sum_{j=1}^n a(i, j) * x(j) \geq 1 \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (4.9)$$

$$x(j) \in \{0, 1\} \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (4.10)$$

Küme ayrıştırma modeli ile, tüm uçuş seferleri tam olarak bir ekip eşleştirmesi tarafından kapsanacak şekilde toplam eşleştirme maliyetini minimize etmek amaçlanır.

Küme kaplama modeli ise, tüm uçuş seferleri en az bir ekip eşleştirmesi tarafından kapsanacak şekilde toplam eşleştirme maliyetini minimize etmeyi amaçlamaktadır. Küme kaplama probleminde uçuş seferlerinin tam olarak bir eşleştirme tarafından kapsanması kısıtı küme ayrıştırmaya göre gevşetilmiştir. Yani küme kaplama modeli, küme ayrıştırma modelinin gevşetilmiş versiyonudur. Sonuç yine tamsayı bir çözümdür. Sadece optimal çözümde aynı uçuş seferi birden fazla eşleştirme tarafından kapsanabilmektedir. Bu da problemin çözümünü kolaylaştırmaktadır. Küme ayrıştırma ile modellendiğinde tüm eşleştirmelerin tam olarak bir eşleştirmede yer alacağı ve tüm yasal eşleştirme kısıtlarını karşılayan uygun bir çözüm bulmak, özellikle büyük boyutlu problemlerde, oldukça güç olabilmektedir.

4.7. Personelin Yolcu Olarak Taşınması (Deadhead) Problemi

Ekip çizelgeleme probleminde personelin yolcu olarak taşınmasına izin vermek için, genel bir yaklaşım olarak, küme ayrıştırma modeli yerine küme kaplama modeli kullanılır. Bu gibi bir durumda, satırlardan biri bir ekip için bir uçuş seferini gösterirken, diğer satırlar deadhead'ler olarak dikkate alınır. Düzenli uçuş seferleri ile deadhead'ler farklı maliyetlere sahip olduklarından, deadhead'lerle oluşturulan bir eşleştirme için, eşleştirme yani sütun maliyetinde bazı çarpıklıklar olabilir. Bunun sebebi optimizasyon programlarının düzenli bir uçuş seferi ile deadhead arasında

fark gözetmemesidir. Bu durum ekip eşleştirme probleminin alt optimal bir çözümle sonuçlanmasına sebep olabilir. Küme kaplama modeli, uçuş seferleri ile deadheadlerin maliyeti yaklaşık olarak aynı olduğunda yarar sağlayabilir.

Deadhead'ler alternatif olarak küme ayrıştırma yaklaşımı kullanılarak da modellenebilir. Bu durumda bazı eşleştirmeler kayıp uçuş seferlerine sahip olabilirler. Bu kayıp uçuş seferleri, eşleştirmelerde deadhead'ler olarak dikkate alınabilir. Ekipler, yolcu olarak uçmak için deadhead'leri kullandığında aynı hava yoluna ya da başka hava yollarına ait bir uçuşu kullanmasıyla oluşan ilave maliyet, eşleştirme maliyetine etki ettirilebilir. Deadhead'leri içeren eşleştirmeler oluşturabilmek için, yasal eşleştirmeleri oluşturmadan önce, deadhead olarak kullanılabilecek tüm mümkün uçuşlar uçuş çizelgesine dâhil edilmelidir. Bununla birlikte, bu yöntem yalnızca problem boyutunda bir büyüme yarattığı için değil aynı zamanda deadhead'lerin sadece küçük bir kısmı sonuç çözümünde yer alacağı için genellikle uygulanmaz.

Tüm mümkün deadhead uçuşları kümesinden küçük bir kısmını seçmek için genellikle geçmiş veriler ve başka teknikler kullanılmaktadır. Deadhead'lerin varlığı hesaba katılarak yasal eşleştirmeler oluşturulduktan ve maliyetleri hesaplandıktan sonra, deadhead'ler küme ayrıştırma modeline dâhil edilmek zorunda değildirler. Bu yüzden, optimizasyon programına küme ayrıştırma modelinin bir parçası olarak dahil edilmezler. Deadhead'leri bu yaklaşımla yönetmenin sağladığı avantaj, küme ayrıştırma modelindeki satır sayısının artmamasıdır. Dezavantajı ise, deadhead'li eşleştirmeleri ifade eden yeni sütunların modele dâhil edilmesi zorunluluğu ve bazı problemler için bunların çok fazla sayıda olmasıdır. Ayrıca, deadhead'ler uçuş çizelgesindeki uçuş seferlerinden çıkartıldığından dolayı, eşleştirmeleri oluştururken tüm uçuşların dikkate alınması gerektiği için yasal eşleştirmeleri oluşturmak daha fazla zaman alabilmektedir.

4.8. Hub(Merkez)-ve-Spoke(Hedef) Şebeke Yapısı

Büyük çaplı havayolları için milyarlarca olası eşleştirme olmasının nedenlerinden biri de çok sayıdaki havayolunun hub-and-spoke şebeke yapısına sahip olmasıdır. Bir hub-and-spoke şebekesi, uçuş seferlerinin büyük çoğunluğu, istasyonların küçük bir alt kümesine giren ya da bu istasyon kümelerinden çıkan bir havayolu uçuş çizelgesidir. Faaliyetin fazla olduğu ve uçuşların rotalandığı merkez hava alanları hub olarak, faaliyetin az olduğu ve merkez havaalanından yola çıkan uçakların uğradıkları küçük havaalanları ise spoke olarak adlandırılmaktadır. Çoğu büyük havayolu şirketi çoklu merkeze sahiptir. Çizelge, bir merkeze varan yolcuların çok beklemenden çok sayıda ayrılan uçuşa aktarma yapabilecekleri şekilde oluşturulur. Bu, kısa bir zaman aralığı içinde merkeze çok sayıda uçuşun varacağı ve kısa aralıklarla merkezden ayrıldıkları anlamına gelir. Hub-and-spoke sisteminin amacı hava yollarına para tasarrufu sağlamak ve yolculara daha iyi rota hedefleri sunabilmektir fakat bu çeşit bir şebeke yapısı, oluşturulabilecek yasal eşleştirme sayısında bir patlamaya sebep olmaktadır.

Hub-and-spoke şebekeleri çok yaygındır ve çoğunlukla büyük çaplı havayolu şirketleri tarafından kullanılmaktadır. Hub-and-spoke şebekeleri tipik olarak noktadan noktaya (point-to-point) şebekelere kıyasla çok daha fazla yolcu bağlantısına olanak sağlamaktadır. Küçük havayolları genellikle noktadan noktaya (point-to-point) şebekeleri kullanırlar. Bu tip bir şebeke havaalanları arasındaki direkt uçuşları içerir, bu nedenle merkez hedef çiftlerinin sayısı da oldukça azdır.

Hub-and-spoke şebeke yapısı sayesinde havayolları, uçuş talebinin fazla olmadığı bir uçuş seferini, iki şehir arasında bir duraklama noktası belirleyerek aktarmalı uçuşlara bölmekte, böylece daha fazla yolcu taşıyarak bir maliyet avantajı sağlamaktadırlar. Ancak bu durum özellikle büyük çaplı havayolları için ekip çizelgeleme probleminde oluşturulması gereken olası eşleştirme sayısında bir patlamaya sebep olmaktadır. Bu şebeke yapısının fazla yaygın olmadığı havayolları için ekip çizelgeleme probleminde oluşturulabilecek olası eşleştirme sayısı çok daha az olmaktadır [Gopalakrishnan ve Johnson, 2005].

5. ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI

Havayolu ekip çizelgeleme, yöneylem araştırması topluluklarına yeni zorluklar çıkarmaya devam etmesine rağmen, problemi çoğu durumda optimale yakın olarak çözebilmek mümkün olmaktadır. Bu başarı iki temel faktöre dayandırılabilir:

- Büyük boyutlu doğrusal ve tamsayılı programları çözecek sezgisel algoritmalarındaki gelişmeler
- Hesaplama kolaylığı sağlayan donanım ve yazılım teknolojisindeki gelişmeler [Gopalakrishnan ve Johnson, 2005].

Havayolu ekip çizelgeleme problemine getirilen çözüm yöntemlerinden bazıları aşağıda açıklanmıştır. Bu ve diğer yöntemleri kullanarak literatürde yapılan çalışmalara ise bir sonraki bölümde yer verilmiştir.

5.1. Satır Yaklaşımı

Satır yaklaşımı, ekip eşleştirme problemi için uygun bir başlangıç çözümüne yerel optimizasyon uygulayan en eski yaklaşımlardan biridir. Bu tip bir çözüm, genellikle, benzer bir problemin önceki çalıştırılmalarından elde edilen iyi bir başlangıç çözümü varsa, uygun bir çözümdür. Eğer böyle bir çözüm mevcut değilse, uygun bir başlangıç çözümü elde etmek için etkili sezgisel yöntemler kullanılabilir. Ancak her uçuş seferi için bir ekip kullanmak, uygun fakat maliyeti yüksek bir başlangıç çözümü olabilir.

Satır yönteminde mevcut eşleştirme çözümünden rasgele az sayıda eşleştirme seçilir. Seçilen eşleştirmelerdeki uçuş seferlerini kullanarak oluşturulabilen tüm olası yasal eşleştirmeleri içeren bir alt problem oluşturulur ve alt problem olan küme ayrıştırma problemi için bir tamsayılı optimal çözüm hesaplanır. Alt problemin optimal çözümü, alt problemin eski çözümünden daha kötü olamayacağı için bir sonraki iterasyona devam edilir. Yani alt problemin optimal sütunları, kendisinden optimal çözümün yaratıldığı sütunlar kümesiyle yer değiştirir. Sütunların rasgele seçimi,

optimizasyon programının çözmesi için yeni bir alt problem yaratan bir sonraki iterasyonu başlatır. Bu süreç belirli bir zaman geçene kadar ya da amaç fonksiyonunda önemli bir değişiklik elde edilemeyene kadar devam eder. Bu tip bir yerel arama yönteminin dezavantajı, yerel minimumda sonlanabilme ihtimali olmasıdır. Çözümü, yerel optimumdan çıkarmaya yönelik bazı sezgiseller mevcuttur.

Ekip eşleştirme problemini çözmek için satır yaklaşımını kullanan bazı ekip eşleştirme sistemleri, United Airlines'ın da içinde bulunduğu çok sayıda büyük havayolu tarafından daha önceden kullanılan TPACS sistemleri, American Airlines ve Continental Airlines tarafından kullanılan TRIP sistemleri ve ALPS sistemleridir.

TPACS: TPACS (Trip pairing for airline crew scheduling), Jerry Rubin tarafından 1973'te ekip eşleştirme optimizasyonu problemi için geliştirilmiş oldukça yaratıcı bir çözüm tekniğidir. Bu proje IBM Newyork Bilim Merkezi'nde başlatılmış, bazı yeni tamsayılı programlama ve küme kaplama-küme ayrıştırma algoritmalarının ve kodlarının geliştirilmesini sonucunda tamamlanmıştır. Bilim merkezinin Philadelphia'ya taşınmasından sonra, TPACS, IBM Havayolları Pazarlama Grubu işbirliği ile dokuz büyük Amerikan havayolu şirketine satılmıştır. TPACS ekip çizelgeleme için çok sayıda büyük havayolu şirketi tarafından kullanılmıştır. Bu yöntem önceki çizelgeleme yöntemlerine göre üstünlük getirmiş ve havayolu için işletme maliyetlerinde önemli tasarruflar sağlamıştır [Gopalakrishnan ve Johnson, 2005].

TRIP: TRIP (Trip re-evaluation and improvement program), TPACS'i temel alarak 1989'da Gershkoff tarafından geliştirilmiş bir programdır. TRIP prosedürü bir başlangıç eşleştirmeler kümesi ile başlar. Satır yaklaşımı ile alt problemler oluşturarak başlangıç çözümü iteratif olarak iyileştirilir. Her iterasyonda yaklaşık beş eşleştirme seçilir ve seçilen eşleştirmelerdeki uçuş seferlerini kullanan tüm yasal eşleştirmeler, bir küme ayrıştırma alt problemi elde etmek için oluşturulur. Daha sonra, küme ayrıştırma problemi optimal olarak çözülür [Gopalakrishnan ve Johnson, 2005].

5.2. Sütun Yaklaşımı

Ekip çizelgeleme problemini çözmede kullanılan etkin yaklaşımlardan biri de sütun yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda alt problemdeki sütunlar, tüm satırları eş zamanlı dikkate alarak oluşturulur. Tüm yasal eşleştirmeleri oluşturduktan sonra, bazı örneklerde milyarlarca yasal eşleştirme oluşturulabileceğinden, alt problem için sütunların seçilmesi mümkün olmayabilir. Alt problem için aday eşleştirmeleri oluşturmada, sütun oluşturma yaklaşımının bazı formları kullanılır. Genellikle, alt problem için, büyük yasal eşleştirmeler kümesinden, nispeten küçük indirgenmiş maliyete sahip temsili sayıda eşleştirme seçilir. Alt problem oluşturulduktan sonra, optimal olarak çözülmek üzere bir optimizasyon programına gönderilir. Bir sonraki iterasyonda mevcut değerden daha iyi bir amaç değerine sahip olan yeni bir alt problem oluşturulur. Alt problem oluşturma ve optimize etme süreci tüm probleme ait optimal bir çözüm bulunana kadar devam eder.

Satır yaklaşımının avantajı, sürecin her herhangi bir aşamada tam sayılı uygun bir çözümle sonlandırılabilmesidir. Sütun yaklaşımı ise aynı avantajı sağlamaz fakat bu yaklaşımı kullanarak global optimal ya da global optimale yakın sonuçlar elde edilebilir.

5.3. Şebeke Yaklaşımı

Çok sayıda ekip eşleştirme sistemi, yasal ekip eşleştirmelerini oluşturmada şebeke yaklaşımını kullanmaktadırlar. Şebeke yaklaşımı temelde, sütunların uçuş seferleri ya da görev şebekesi kullanarak oluşturulduğu sütun yaklaşımıdır. Yaklaşım ilk olarak Lavoie, Minoux ve Odier tarafından incelenmiştir [Lavoie ve ark., 1988]. Kullanılan zaman eksenli bir uçuş şebekesinde, uçuş çizelgesindeki her uçuşa ilişkin bir ok bulunur. Uzun ve kısa mola periyotları da şebekede ok olarak gösterilir. Oklara ilişkin maliyetler genellikle okta harcanan zamana göre belirlenen doğrusal maliyetlerdir. Böyle bir şebeke verildiğinde merkez üslerinde başlayan ve sonlanan yollar oluşturularak tüm yasal eşleştirmeler üretilebilir. Bu yol üzerindeki herhangi iki

uçuş seferi, ikinci uçuşun kalkış zamanının ilk uçuşun varış zamanından sonra olması şartını ve yasal eşleştirmelere ilişkin tüm diğer kısıtlamaları sağlamalıdır.

Büyük çaplı ekip eşleştirme problemleri, şebeke yaklaşımı kullanılarak etkin olarak çözülebilir. Bunun sebebi, küçük boyutlu problemlerle karşılaştırıldığında, şebekenin daha küçük boyutta olması ve TAFB'in bir eşleştirmenin maliyeti için iyi bir ölçüt olmasıdır. Şebeke yaklaşımı Air France'da ekip eşleştirme sisteminde kullanılmıştır [Desaulniers ve ark., 1997/b]. Küçük boyutlu problemler için uçuş seferlerinin yerine bir görev şebekesi kullanılabilir. Bu şebekede her ok, ekip için uzun mola periyotlarını içeren potansiyel bir görev periyodunu temsil eder. Böyle bir şebeke, görev periyotlarının maliyetleri doğrusal olmayan maliyet fonksiyonları kullanılarak hesaplanabileceği için, daha doğrusal olmayan bir maliyet yapısı kullanabilir. Barnhart, Hatay ve Johnson, görev şebekesini iteratif olarak genişleten bir yöntemi incelemişlerdir [Barnhart ve ark., 1995].

5.4. Doğrusal Programlama Algoritmaları

5.4.1. Sprint

Büyük çaplı ekip eşleştirme problemlerini doğrusal programlama ile çözmek çok fazla zaman gerektirir. Bu problemi çözmek için, büyük çaplı doğrusal programlama problemlerini hızlı olarak çözen, SPRINT yöntemi olarak adlandırılan bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem bazı ekip eşleştirme sistemlerinde, büyük çaplı ekip çizelgeleme problemlerini çözmede başarıyla uygulanmıştır. SPRINT yöntemi kullanılarak, yaklaşık 850 uçuş seferi ve 5,5 milyon yasal eşleştirmeli ekip eşleştirme probleminin doğrusal programlama gevşetmesi, geleneksel yöntemlerin bazılarında çok daha hızlı olarak çözülmüştür.

Algoritmanın altında yatan temel fikir, bir dizi küçük doğrusal programı çözerek büyük çaplı bir doğrusal programın optimal çözümünü oluşturmaktır. SPRINT yönteminde, problem sütunlarının küçük bir alt kümesi seçilir ve bu alt problem üzerinde bir doğrusal program çözülür. Optimal dual çözüm kullanılarak orijinal

problemin tüm sütunları fiyatlandırılır. Eğer mevcut çözüm orijinal problem için optimal bir çözüm değilse, negatif indirgenmiş maliyete sahip sütunlar var demektir. Sütunları optimal temelde tutarak ve sonra sıfıra yakın indirgenmiş maliyete sahip sütunların küçük bir alt kümesini ekleyerek yeni bir problem oluşturulur. Bu süreç orijinal problem için optimal bir çözüm bulunana kadar devam eder.

5.4.2. Hacim algoritması

Bu algoritma dual sonuçları olduğu kadar primalleri de üretmek için, subgradient algoritmasının bir uzantısıdır. Subgradient algoritması, büyük boyutlu doğrusal programlar için daha düşük alt sınırlar üretmede başarıyla uygulanan bir algoritmadır. Düşük hesaplama maliyetine bağlı olarak subgradient algoritması çekici gelmektedir. Bu algoritma optimal dual çözümlere hızlı bir biçimde iyi yaklaşımlar üretmede kullanılabilir. Primal çözüm, tamamlayıcı gevşeklik şartları ya da tümleşik yöntem kullanılarak elde edilebilir.

Subgradient yöntem iyi tanımlanmış durdurma koşullarına sahip olmadığı için yakınsama sorunu ortaya çıkmaktadır. Süreç genellikle iterasyon sayısı ya da ilerleme kaydedilmeyen aşama sayısı ile sınırlandırılır. Hacim algoritması, kesin yöntemler kullanarak kesin sonuçlar elde etmede kullanılan primal ve dual çözümlere yaklaşımlar üretir. Hacim algoritması iyi bir durdurma kriterine ve her iterasyonda düşük hesaplama maliyetine sahiptir. Hacim algoritmasının büyük ölçekli küme ayrıştırma ve küme kaplama doğrusal programlama problemlerini çözmede çok başarılı oldukları kanıtlanmıştır.

5.5. Tamsayılı Programlama Yöntemleri

Bu bölümde ekip eşleştirme problemi için iyi tamsayılı çözümler elde edebilmek için bazı stratejilerden bahsedilmiştir. Ekip eşleştirme probleminin boyutu, geleneksel dal-sınır yöntemleri kullanarak tüm problem üzerinde bir tamsayılı çözüm araştırmasını imkansız kılmaktadır. Bu nedenle iyi bir tamsayılı uygun çözüm bulmak genellikle küçük indirgenmiş maliyete sahip göreceli olarak küçük sütun alt

kümesiyle sınırlıdır. Bu kısıtlı kümede bile tüm dal-sınır ağacını anlamak imkânsız olabilmektedir. Bu da çok sayıda sezgisel tekniğin gelişmesine öncülük etmiştir.

5.5.1. Dallanma teknikleri

Uygun bir dallanma kuralının seçilmesi, ekip eşleştirme gibi büyük boyutlu tamsayılı programlama problemlerini çözmede hayati önem taşıyabilir. Ekip eşleştirme optimizasyonu problemi için bazı ekip eşleştirme sistemlerinde başarıyla uygulanmış üç dallanma kuralı vardır:

Follow-On Dallanma

Bir follow on, bir eşleştirmedeki ardışık iki uçuş seferinin ikincisidir. İlk olarak, eşleştirmelerin bir alt kümesinin doğrusal programlama gevşetmesi optimal olarak çözülür. Genellikle milyonlarca iyi eşleştirme dikkate alınır. Follow on olarak adlandırılan dalda, herhangi iki r ve s seferleri, s 'nin r 'den sonra geldiği bir eşleştirmede, ardışık olarak görünmeye zorlanırlar. Bu, son uçuş seferinin ilk uçuş seferi tarafından takip edilmesini sağlar. Diğer dalda, yani follow-on olmayan dalda, iki uçuş seferi ardışık olarak görünemez.

F_{rs} ; r ve s uçuş seferlerinin o sıralamada ardışık olarak görünebildiği tüm eşleştirmelerin kümesi

x^* ; Küme ayrıştırma probleminin doğrusal programlama gevşetmesinin optimal kesirli çözümü olmak üzere,

$$0 < \sum_{i \in F_{rs}} x_i^* < 1 \quad (5.1)$$

koşulunu sağlayan iki uçuş seferi (r ve s) vardır.

Bu toplam, r ve s follow-on eşlerinin ağırlığı olarak adlandırılır. Follow-on dallanma kuralı, r ve s uçuş seferlerinin tüm eşleri için follow-on ağırlıklarını hesaplayarak, follow-on'ların ağırlıklarını bire sabitleyerek ve bir follow-on'un maksimum

ağırlığının birden küçük olmasını sağlayarak kullanılabilir. Temelde yer alan sütunların sıfırdan farklı değerler alan sütunlar olduğunu varsayarak, en fazla satır sayısı kadar sütun araştırılır. Bu süreç, mevcut kesirli doğrusal programlama çözümü bulununca sonlandırılır. Problem boyutu bir follow-onun sabitlenmesiyle azalır, çok sayıda sütun atılır ve follow-on uçuş seferine ilişkin satırlar da kaldırılabilir. Bu dallanma kuralı toplam dengelenmiş katsayı matrisi üretmeye çalışır. Bu kuralın arkasındaki teorik haklı taraf, follow-on'ları sabitleyerek toplam dengelenmiş matrisin belirlenmesinden hariç tutulan matrislerin katsayı matrisinden kaldırılmasıdır.

Timeline Dallanma

Eğer;

$$\tilde{F}_r = \bigcup_s F_{rs} \quad (5.2)$$

r uçuş seferini içeren tüm eşleştirmelerin kümesini gösterirse, bu durumda $\tilde{F}_r$, r uçuş seferiyle olan bağlantı zamanını temel alarak sıralanabilir. $p \in \tilde{F}_r$ eşleştirmesinin bağlantı zamanı t_p , s uçuş seferinin kalkış zamanı ile r uçuş seferinin varış zamanı arasındaki fark olarak tanımlanır. Bir r uçuş seferi için, $\tilde{F}_r$, $p \in \tilde{F}_r$ eşleştirmesinin bağlantı zamanına ve $t_p \leq t$ olan tüm eşleştirmelerin bir dala ait, diğerlerinin diğer dala ait olduğu bir t zaman uzunluğuna dayanarak ayrıştırılır. $\tilde{F}_r$ 'de ilk dalda yer alan tüm eşleştirmeler sıfıra, diğer daldakilerden de tam olarak bir tanesi bire eşitlenir. r seferinde sonlanan eşleştirmeler de ayrıca sıfıra eşitlenir.

Klabjan ve ark., yaptıkları çalışmada, timeline dallanmanın, hiçbir iki uçuşun aynı anda bir istasyondan ayrılamayacağı varsayımı altında, geçerli bir dallanma kuralı olduğunu göstermişlerdir [Klabjan ve ark., 2001/b]. Yani eğer x^* küme ayrıştırma modelinin doğrusal programlama gevşetmesine temel olan bir kesirli çözüm ise bu durumda aşağıdaki koşulu sağlayan bir t zamanında bir r uçuş seferi vardır:

$$0 < \sum_{p \in F_{rs}, t_p \leq t} x_p^* < 1 \quad (5.3)$$

Bu toplam timeline ağırlığı olarak adlandırılır. Follow-on dallanmada olduğu gibi timeline ağırlığı bire eşit olan tüm uçuş seferleri sabitleştirilir ve maksimum timeline ağırlığı birden küçük olan bir uçuş seferi de sabitleştirilir. Eğer bir istasyondan aynı anda kalkan uçuş seferleri varsa bu durumda timeline dallanma kalkış ve varış zamanlarını bir parça bozarak uygulanabilir.

Güçlü Dallanma

Hem follow-on hem de timeline dallanma stratejilerinde, bir tamsayılı çözüme gitme ya da alt düğümlerin alt sınırlarını iyileştirme şansına sahip dallanma eşleri seçmek oldukça önemlidir. İlk olarak ticari karışık tamsayılı programlama çözücüsü CPLEX CPLEX Optimization (2000)'da görülen güçlü dallanma, ekip eşleştirme optimizasyonu problemi için başarıyla kullanılmıştır. Literatürde güçlü dallanmanın çok sayıda varyasyonları önerilmiştir [Klabjan ve ark., 2001/b].

Güçlü dallanma tekniğinin altında yatan temel fikir şöyle açıklanabilir: S , dallanmaya aday kesirli değişkenlerin bir alt kümesi olmak üzere, her $p \in S$ değişkeni için iki dal oluşturulur ve belirli bir dual simplex iterasyon sayısı (k) kadar iterasyon her dalda gerçekleştirilir. P için ilgili amaç değerleri f_p^l ve f_p^0 ise, bu değerler dallanma değişkenini seçmede kullanılabilir. Eğer bir p değişkeni için iki değer göreceli olarak büyükse, bu durumda, her iki dal için de LP değerinde önemli bir artış olduğu için, p dallanma için iyi bir adaydır.

Güçlü dallanma kuralında, S kümesinin seçimi, dual iterasyon sayısı k 'nın belirlenmesi ve dallanacak değişkeni seçmek için f^l ve f^0 değerlerini birleştirme kuralının belirlenmesini kapsayan üç karar verilmesi gerekmektedir.

5.5.2. Dallanma ve kesme

Dallanma ve kesme yöntemleri, geniş çeşitlilikteki tamsayı programlama problemlerini çözmede oldukça başarılı tekniklerdir ve optimaliteyi garanti ederler. Dallanma ve kesme yöntemleri kesme düzlemi yöntemi ile dal-sınır algoritmaları birleşiminden oluşan kesin algoritmalarıdır.

5.5.3. Dallanma ve fiyatlandırma

Bu yöntemin temel fikri dallanma ve kesme tekniği ile benzerlik gösterir. Bu algoritmanın merkezinde, dallanma ve kesmedeki gibi satır ya da kısıt oluşturma yerine fiyatlandırma ya da dinamik sütun oluşturma bulunur. Değişkenleri dinamik olarak oluşturma süreci, mevcut doğrusal programlama gevşetmesinin duali için kesme düzlemi oluşturma olarak da görülebilir. Bu yüzden, doğrusal programlama tabanlı, değişkenlerin ihtiyaç duyulduklarında dinamik olarak üretildiği dal sınır algoritmaları, dallanma ve fiyatlandırma olarak da bilinir.

Algoritmada sütun kümeleri doğrusal programlama gevşetmesinin dışında bırakılır, çünkü etkin bir biçimde kontrol edilmesi gereken çok fazla sütun vardır ve bunların çoğunun ilgili değişkenleri optimal çözümde ne olursa olsun sıfıra eşit olacaktır. Dual doğrusal program için bir ayrıştırma problemi olan bir alt problem temele girecek sütunları belirlemek için çözülür. Eğer bu sütunlar bulunursa, doğrusal program yeniden optimize edilir aksi halde mevcut doğrusal programın çözümü optimaldir. Eğer doğrusal programın çözümü tamsayı değilse dallandırma yapılır. Branch and price tekniği doğrusal programların çözümünde kullanılan tekniklerle dal sınırın bir birleşimi olarak görülebilir. Fakat tamsayı programlama çözüm yöntemlerinde doğrusal programlama için sütun üretme tekniğini uygulamada belli başlı farklılıklar bulunur.

5.6. Paralelleşme

Teorik sonuçların ve akıllı çözüm yöntemlerindeki gelişmelere bağlı olarak, ekip eşleştirme çözümleri tarafından önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu ilerlemede payı olan aynı derecede önemli bir başka faktör de, hem işlemci hem de hafıza hızı açısından hesaplama gücündeki artış olmuştur. Donanımlardaki bu güç artışı optimizasyon yazılımlarındaki gelişmeyi de hızlandırmış ve paralel hesaplama optimizasyon araçlarının hesaplama gücünde önemli ilerlemeler sağlamıştır.

5.7. Dantzig-Wolfe Ayrıştırması

Göreceli olarak yasal eşleştirmelerin küçük bir kümesini içeren bir alt problem çözülür ve eşleştirmedeki uçuşlara ilişkin dual verileri kullanarak ilave sütunlar iteratif bir prosedürde seçilir. Yasal eşleştirmeler bir şebekedeki en kısa yol problemi çözülerek oluşturulur. En kısa yola ilişkin merkez üssünde başlayan ve sonlanan bir yasal eşleştirmenin eğer negatif bir indirgenmiş maliyeti varsa, bir sonraki alt problemde bu yasal eşleştirme kapsanmak üzere seçilir. Yeni doğrusal programlama öncekinden daha iyi bir amaç fonksiyonuna sahiptir. Bu iteratif prosedür, en kısa yol alt problemi, negatif olmayan bir indirgenmiş maliyete sahip olduğunda sonlandırılır. Bu noktada doğrusal programlamaya bulunan çözüm optimaldir. Bu yöntemin avantajı, öncelikli olarak tüm yasal eşleştirmeleri oluşturmaksızın, ekip eşleştirme probleminin doğrusal programına optimal bir çözüm sağlayabilmesidir. Bununla birlikte, eşleştirmelerden bazıları, uçuş seferlerine ilişkin dual değerleri düzgün bir şekilde kullanarak fiyatlanamayacağı için tamsayı bir optimal çözüm garanti edilmez. Bunun üstesinden gelebilmek için, optimal doğrusal programlama sonucu ile bilinen bir uygun tamsayı çözüm arasındaki boşluktan daha küçük indirgenmiş maliyete sahip olan tüm yasal eşleştirmeler oluşturulmak ve eklenmek zorundadır. Eğer bu boşluk büyükse, çok büyük sayıda eşleştirme oluşturulmak zorundadır. Ayrıca büyük boyutlu problemler için şebekeyi yaratmak için gereken zaman ve boyut da engelleyici olabilir.

5.8. Sütun Oluşturma Algoritması

Ekip çizelgeleme literatüründe yaygın olarak kullanılan çözüm yaklaşımlarından biri de sütun oluşturma yaklaşımlarıdır. Bu tez kapsamında ele alınan havayolu şirketinin ekip çizelgeleme problemini çözmede kullanılacak çözüm yöntemi olan ve 7. bölümde ayrıntılı olarak açıklanacak olan bu yaklaşım, büyük boyutlu doğrusal programlarda değişkenlerin çoğu simplex algoritmasında temelde olmayacağı ve optimal sonuçta sıfır değerini alacağı için, problemi çözerken değişkenlerin sadece bir alt kümesinin dikkate alınmasının yeterli olduğu düşüncesine dayanmaktadır. Algoritma, bir doğrusal program çözülürken işe sadece temelde olan değişkenlerle başlayıp, daha sonra temele girmesi gereken diğer değişkenleri belirlemek için indirgenmiş maliyeti kullanır [Kallehauge ve ark., 2005; Klabjan, 2005].

6. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatürde havayolu ekip çizelgeleme problemine çözüm getirmeyi amaçlayan birçok çalışma yer almaktadır.

Bazı araştırmacıların problemi şebeke yaklaşımı kullanarak çözdükleri görülmektedir. Carraresi ve Gallo, toplu taşıma sistemlerinde araç rotalama ve ekip çizelgeleme problemlerinin çözümünde şebeke modellerinin ve yöntemlerinin kullanımını incelemişlerdir [Carraresi ve Gallo, 1984]. Yan ve Tu, iş kurallarının diğer havayollarına göre nispeten basit olduğu bir Taiwan havayolu şirketinin ekip çizelgeleme problemini çözmek için kusursuz bir şebeke modeli önermişlerdir [Yan ve Tu, 2002].

Ball ve Roberts, havayolu ekip çizelgeleme için, problemi bir dizi alt probleme ayrıştırarak, küme ayrıştırmayı bir şebeke üzerinde gerçekleştiren bir prosedür önermişlerdir [Ball ve Roberts, 1985]. Gamache ve ark., öncelik atamalı aylık bir ekip çizelgeleme problemini çözmek için, şebeke boyama ve tabu arama algoritması tabanlı bir yöntem kullanmışlardır [Gamache ve ark., 2007].

Bunun yanında ekip çizelgeleme problemlerine kesin çözümler elde edebilmeyi hedefleyen çok sayıda tam sayılı programlama algoritması da geliştirilmiştir. Hoffman ve Padberg, havayolu endüstrisinde ortaya çıkan büyük çaplı küme ayrıştırma problemlerini optimal olarak çözebilmek için bir branch-and-cut yaklaşımı önermişler ve gerçek yaşam problemleri üzerinde uygulamışlardır [Hoffman ve Padberg, 1993]. Chu ve ark., eşleştirmelerin bir altkümesinden oluşan kısıtlı küme ayrıştırma problemine, şebeke tabanlı bir dallanma sezgiseli uygulamışlardır [Chu ve ark., 1997]. Friberg ve Haase, şehir içi toplu taşıma sistemlerinde araç ve ekip çizelgelemeyi birleştirerek ve bu modele ekiplerin maaş sözleşmeleri ve şirket anlaşmalarını içeren kısıtları da dâhil ederek yeni bir model oluşturmuşlardır. Bir sütun oluşturma algoritması kullanarak problemin sürekli gevşetmesini elde ettikten sonra, tamsayı bir çözüm elde etmek için bir dal-sınır yaklaşımı uygulamışlardır [Friberg ve Haase, 1999]. Mingozzi ve ark., küme ayrıştırma matrisini kullanmadan,

küme ayrıştırma modelinin doğrusal programlama gevşetmesinin dualine sezgisel bir çözüm bularak, ekip çizelgeleme problemine bir alt sınır hesaplamışlardır. Dual çözümleri, problemin bir dal-sınır algoritması ile çözülebilmesi için, modeldeki değişken sayısını azaltmada kullanılmışlardır [Mingozi ve ark., 1999]. Alefragis ve ark., büyük çaplı 0-1 tamsayılı doğrusal programları, özellikle havayolu ve demiryolu ekip çizelgeleme problemlerini, çözmek için sezgisel tabanlı bir Lagrange gevşetme yaklaşımının başarısını araştırmışlardır. Bu yaklaşım, İsviçre Carmen Systems'in üretiminde kullanılan ve problemi değişkenlere ayırmayı temel alan orijinal algoritmanın ölçeklenebilir paralelleştirilmiş bir şeklidir [Alefragis ve ark., 2000].

Yen ve Birge, ekip çizelgeleme problemini, olası kesintileri dikkate almaksızın deterministik olarak modellemek yerine, kesintileri dikkate alan *stokastik* bir model geliştirmişlerdir. Bu bilgileri kullanarak daha iyi çözümler elde etmeyi ve gecikme etkilerini minimize etmeyi amaçlamışlardır [Yen ve Birge, 2006].

Literatürde, ekip çizelgeleme problemine yaklaşık ya da optimal çözümler verebilen, çözüm zamanında büyük azalmalar sağlayan sezgisel yaklaşımlar da önerilmiştir. Meta sezgisel yöntemler arasında genetik algoritmayı kullanan çalışmalar sayıca fazla olup, bunun dışında tabu arama, tavlama benzetimi ve karınca kolonisi algoritmasını temel alan çalışmalar da mevcuttur.

Levine, havayolu ekip çizelgeleme problemini, durağan-durum genetik algoritma ve bir yerel arama sezgiselini birleştiren melez bir algoritma kullanarak çözmüş ve gerçek yaşam problemleri üzerinde test etmiştir. Elde edilen sonuçları, dal-sınır ve branch-and-cut algoritmalarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırmıştır [Levine, 1996]. Özdemir ve Mohan, havayolu ekip çizelgeleme problemini probleme özgü çok sayıda kısıtı gösteren bir uçuş şebeke gösterimine uygulayan bir genetik algoritma kullanarak çözmüşler ve çok sayıda havayolundan alınan uçuş verilerini kullanarak, uyguladıkları yöntemin karşılaştırmasını yapmışlardır [Özdemir ve Mohan, 2001]. Kornilakis ve Stamatopoulos, ilkinde öncelikle derinlik yaklaşımına göre eşleştirme oluşturulduğu, ikincisinde ise optimale yakın maliyetlerle oluşturulan

eşleştirmelerin bir alt kümesinin seçildiği, iki aşamalı bir çözüm yöntemi önermişlerdir. Küme kaplama modeli ile formüle edilen problemi, genetik algoritma ile çözmüşler ve Olympic Havayolları verilerini kullanarak etkinliğini test etmişlerdir [Kornilakis ve Stamatopoulos, 2002]. Adachi ve Kobayashi, çok amaçlı bir uçuş ekibi atama problemini ele alarak, tavlama benzetimi yöntemini ve genetik algoritmayı birleştiren hibrit bir yöntem önermişlerdir [Adachi ve Kobayashi, 2004]. Park ve Ryu, metro ekibi çizelgelemede eşleştirmelerin optimizasyonu problemini çözmek için özel olarak tasarlanmış yeni çaprazlama ve mutasyon operatörleri kullanan bir genetik algoritma önermişlerdir. Yeni tasarlanmış genetik operatörlerle aramanın etkinliğini artırabilmek için, bir kromozomun açıklanmış ve açıklanmamış iki parçadan oluşması sağlanmıştır. Her iki parçadaki genler de evrim geçirmesine rağmen, yeni bir birey değerlendirildiğinde sadece açıklanmış parça kullanılmıştır. Açıklanmamış parçanın amacı, genetik operatörlerin uygulanmasıyla kaybolması olası bilgileri korumak ve böylece aramanın farklılığını sağlamaktır [Park ve Ryu, 2006/b]. Aynı yazarların ekip eşleştirme optimizasyonu için önerdikleri yaklaşımla, ilk olarak çok sayıda eşleştirme oluşturup, daha sonra açıklanmamış genleri dahil eden bir genetik algoritma kullanarak eşleştirmelerin en iyi alt kümesini bulmuşlardır [Park ve Ryu, 2006/a].

Cavique ve ark., ekip çizelgeleme problemi için Lizbon metrosunun ekip çizelgeleme yönetimi için geliştirilen bir karar destek sisteminin parçası olan bir tabu arama algoritması kullanmışlardır [Cavique ve ark, 1999]. Xu ve ark., çok amaçlı uçuş eğitmeni çizelgeleme problemini çözmek için dinamik komşuluk tabanlı bir tabu arama algoritması tasarlamışlardır. Algoritma, farklı komşuluk değişimi tiplerini kullanmış ve büyük bir Amerikan havayolu şirketinden alınan verilere uygulanmıştır [Xu ve ark., 2006].

Emden-Weinert ve Proksch, havayolu ekip eşleştirme problemine bir tavlama benzetimi algoritması uygulamışlardır. Probleme özgü bir başlangıç çözümü kullanarak, kısıtları olabildiğince gevşeterek, tavlama benzetimini probleme özel başka bir yerel sezgiselle birleştirerek ve bunları bağımsız olarak çalıştırarak,

programın çalışma zamanı ve çözüm kalitesinde iyileşmeler sağlanabileceğini göstermişlerdir [Emden-Weinert ve Proksch, 1999].

Crawford ve ark., ekip eşleştirme probleminin çözümünde karınca kolonisi optimizasyonu algoritmasının performansını ve karınca kolonisinin kısıt programlama tekniği ile melezlenmesini incelemişlerdir [Crawford ve ark., 2006].

Ayrıştırma algoritmaları ve ayrıştırma algoritmasının özel bir bileşeni olan sütun oluşturma algoritmaları da ekip çizelgeleme literatüründe önemli bir yer tutmaktadır.

Desaulniers ve ark., karışık tamsayılı programlama modelleri için kullanılan Dantzig-Wolfe ayrıştırma algoritması ile, ana problemi bir küme ayrıştırma modeli, alt problemi ise okların görev periyotlarını ifade ettiği bir çok ürünlü akış şebekesi olarak modellemişler ve doğrusal olmayan maliyetlerin yaklaşık değil kesin olarak yer aldığı bir maliyet fonksiyonu kullanmışlardır. Yaklaşımı Air France'tan alınan gerçek verilere uygulamışlardır [Desaulniers ve ark., 1997/b].

Vance ve ark., geleneksel olarak bir küme ayrıştırma problemi olarak modellenen ekip çizelgeleme problemini çözebilmek için, karar sürecini iki aşamaya ayıran bir yaklaşım önermişlerdir. İlk aşamada çizelgedeki tüm uçuş seferlerini kapsayacak bir görev periyotları kümesi seçip, ikinci aşamada bu görev periyotlarını kullanarak eşleştirmeleri oluşturmuşlardır. Modeli çözmek için bir ayrıştırma yaklaşımı önermişler ve büyük bir havayolundan alınan veriler üzerinde test etmişlerdir [Vance ve ark., 1997].

Cordeau ve ark., tek bir filo tipi için ekip çizelgeleme ve uçak rotalama problemlerini eş zamanlı olarak çözebilmek için Benders ayrıştırma yaklaşımını önermişlerdir. Yaklaşım, uçak rotalama problemini çözen bir ana problem ve ekip eşleştirme problemini çözen bir alt problem arasında tekrarlayan bir çözüm sürecinden oluşmuştur. Her iki problem de sütun oluşturma algoritması ile çözülmüştür [Cordeau ve ark., 2001].

Mercier ve ark., Benders ayrıştırma yaklaşımını kullanarak, uçak rotalama ve ekip çizelgeleme problemlerini bütünleşik olarak çözmeye çalışan bir yaklaşım önermişlerdir [Mercier ve ark., 2005].

Vanderbeck ve Savelsbergh ise, Dantzig-Wolfe ayrıştırma yöntemini açıklayan bir inceleme çalışması yapmışlardır [Vanderbeck ve Savelsbergh, 2006].

Desrosiers ve ark., okul servisi çizelgeleme problemi için, başlangıç, hedef, seyahat süresi ve maliyet dışında, her seferi, başlaması gereken bir zaman aralığı ile tanımlamışlardır. Çalışmada, rota ve çizelgeleriyle birlikte gerekli araç sayısı belirlenerek ve araç sayısına göre sabit bir maliyet değeri atanarak, her seferin belirlenen bir zaman aralığı içinde başlaması ve seyahat maliyetlerinin minimizasyonu sağlanmıştır. Kullanılan model gezgin satıcı modelidir. Sütun oluşturma algoritması, simplex ve dal-sınır ile çözülen bir küme ayrıştırma problemi üzerinde uygulanmıştır. Sütunlar, düğümler üzerindeki zaman aralıklarıyla bir en kısa yol algoritması kullanılarak oluşturulmuştur [Desrosiers ve ark., 1984].

Lavoie ve ark., ekip eşleştirme problemi için önerdikleri yaklaşımda, eşleştirmelere karşılık gelen çok sayıda değişken ya da sütunun yer aldığı büyük çaplı bir küme kaplama modeli oluşturmuşlardır. Daha sonra bu büyük çaplı modelin sürekli doğrusal programlama gevşetmesini çözebilmek için bir çözüm prosedürü önermişlerdir. Bu çözüm prosedüründe, sütun oluşturma algoritmasının alt problemi ilgili bir şebekedeki en kısa yol problemine eşdeğer olarak gösterilmiştir. Bu şebekedeki her yol bir eşleştirmeye karşılık gelmektedir. Ancak yasal bir ekip eşleştirmesi oluşturmak için, bir görev periyotları sıralaması, eşleştirme içindeki ardışık iki görev periyodu arasında gerekli uzun mola süresini sağlamayı amaçlayan, bir dizi karmaşık kısıtı karşılamak zorundadır. Buradaki zorluk, bu mola süreleri için minimum kabul edilebilir değerin sadece kendisinden hemen önce ve hemen sonra gelen görev periyotlarına değil, aynı zamanda kendisinden önce gerçekleşen diğer görev periyotlarına ve/veya mola sürelerine de bağlı olmasından kaynaklanır. Yasal eşleştirmeleri gösteren şebeke, bu karmaşık kısıtlar bir karar ağacı yardımıyla kontrol edilerek oluşturulmuştur [Lavoie ve ark., 1988].

Desrochers ve Soumis, ana problemi bir küme kaplama, alt problemi ise bir en kısa yol problemi olarak formüle ederek, şehir toplu taşıma ekip çizelgeleme problemine sütun oluşturma yaklaşımını uygulamışlar ve gerçek yaşam problemleri üzerinde yaklaşımı test etmişlerdir [Desrochers ve Soumis, 1989].

Housos ve Elmroth, problemlerin boyutunu azaltan ve çözüm kalitesini arttıran alt problemlerin seçimi için bir yöntem geliştirmişlerdir. Haftalık ve ileri tarihli bir probleme odaklanarak, bir günün tüm olası bağlantılarını hesaplayan alt problemlerin çözümü için bir yöntem önermişlerdir. Uygulama sonucunda bu yöntemin günlük ekip çizelgelerinin mevcut olmadığı durumda, haftalık ve ileri tarihli problem için kaliteli çözümler ürettiği görülmüştür [Housos ve Elmroth, 1997].

Desaulniers ve ark., günlük ekip çizelgeleme ve araç rotalama problemleri için bir küme ayrıştırma ve zaman kısıtlı çok ürünlü akış şebekesinden oluşan iki model önermişlerdir. İlk modelin doğrusal programlama gevşetmesini çözmek için, alt problemin bir şebeke yapısıyla açıklandığı bir sütun oluşturma tekniği; ikinci modelin doğrusal programlama gevşetmesini çözmek için ise bir Dantzig-Wolfe ayrıştırması kullanmışlardır. Daha sonra bir dal-sınır yöntemi uygulayarak tüm probleme tamsayı bir çözüm elde etmişlerdir. İki model arasındaki eşdeğerliği kullanarak, sütun oluşturma algoritması ile uyumlu, çeşitli dallanma stratejileri önermişlerdir [Desaulniers ve ark., 1997/a].

Barnhart ve ark., yeni sütunlar oluşturmak için ya da bir dal-sınır ağacında doğrusal programlamanın optimalitesini kanıtlamak için, temelde yer almayan değişkenlerin etiketlenmesine dayanan bir sütun oluşturma algoritması kullanarak çok değişkenli tam sayılı programlama formülasyonları üzerinde çalışmışlardır [Barnhart ve ark., 1998].

Junker ve ark., karmaşık kısıtlı yöneylem araştırması problemlerinden biri olan ekip atama problemine sütun oluşturma algoritmasını, alt problemi kısıt tatmini problemi olarak formüle ederek uygulamışlardır. En kısa yol problemine, negatif indirgenmiş maliyetli yollara ulaşmayacak olan düğümleri dışarıda bırakmak için ana problemden

gelen dual değerleri kullanan bir yol kısıtı oluşturarak, en kısa yol probleminin özel durumlarını etkin bir şekilde ele almışlar ve ekip atama problemini çözmek için gereken zamanı da önemli ölçüde azaltmışlardır [Junker ve ark., 1999].

Gustafsson, sütun oluşturma algoritmasında ana problem seçiminin çözüm hızını ve kalitesini etkileyen önemli bir unsur olduğu gerçeğinden yola çıkarak, ana problemde sezgisel tabanlı bir tamsayılı optimizasyon programının kullanıldığı durumu, simplex tabanlı bir algoritma ile karşılaştırmıştır [Gustafsson, 1999].

Klabjan ve ark., rassal olarak yüz milyonlarca eşleştirme oluşturmaya dayanan bir yaklaşım önermişlerdir. İlk olarak doğrusal programlama gevşetmesi çözülmüş, daha sonra tam sayılı program için en iyi indirgenmiş maliyete sahip milyonlarca sütun seçilmiştir. Sütunların sayısı, daha sonra, doğrusal programlama tabanlı bir sezgiselle azaltılmıştır. Sonuç olarak tam sayılı bir çözüm elde edilmiştir. Kullanılan programın dallandırma kuralı, güçlü dallanma ve özel bir dallanma kuralının bir kombinasyonu ile geliştirilmiştir. Algoritma uygulamada kullanılanlardan çok daha iyi bir çözüm üretmiştir [Klabjan ve ark, 2001/b].

Aynı yazarlar, daha sonra yaptıkları çalışmada, havayolu planlama sürecinin çizelge planlama, uçak rotalama ve ekip çizelgelemeden oluşan üç temel aşamasını kısmen entegre ederek çözen bir yaklaşım sunmuşlardır. Ekip çizelgeleme problemine uçak sayısı kısıtlarını da ekleyip uygun bir araç rotası elde ederek, daha esnek bir ekip çizelgesi sağlamışlardır. Bunun yanında uçuş seferlerinin kalkış zamanları sabit değil belirli bir zaman aralığında olduğu için, gerektiğinde bu zamanları değiştirebilme esnekliğini göz önünde bulundurmuşlardır. Geleneksel modele göre maliyetlerde önemli tasarruflar sağlamışlardır [Klabjan ve ark., 2002].

Yan ve Chang, kabin ekibi maliyetlerini minimize etmeye ve kabin ekibi eşleştirmelerini doğru planlamaya yardımcı olacak, Taiwan Uluslararası Havayolları'ndan alınan gerçek verileri kullanarak, bir küme ayrıştırma modeli ve iki çizelgeleme şebekesi geliştirmişlerdir. Problemi çözmek için bir sütun oluşturma algoritması kullanmışlardır [Yan ve Chang, 2002].

Makri ve Klabjan, sütun sıralamayı anlamak için yaklaşık ve tam olarak kategorize edilmiş çok sayıda dallanma kuralı kullanan bir sütun oluşturma planı geliştirmişlerdir. Doğrusal olmayan bir fiyatlama stratejisi kullanarak hesaplama denemelerini gerçekleştirmişlerdir [Makri ve Klabjan, 2004].

Lübbecke ve Desrosiers, büyük çaplı doğrusal programlar için geliştirilen Dantzig-Wolfe ayrıştırması ile sütun oluşturma algoritmalarını incelemiş ve birbirleriyle olan ilişkilerini ele almışlardır. Sütun oluşturmaya teoride ve uygulamada ilerlemeler sağlayan dual bakış açısı anlayışına odaklanmışlardır [Lübbecke ve Desrosiers, 2005].

Borndörfer ve ark., havayolu ekip çizelgeleme problemini çözmek için, küme ayrıştırma modelini temel alan bir sütun oluşturma yaklaşımı önermişler ve birçok endüstriyel örneğe ait uygulama sonuçlarını sunmuşlardır [Borndörfer ve ark., 2005].

Demasse ve ark., sütun oluşturma alt problemlerinin modellenmesinde ve çözümünde yarar sağlayan ve düzenli maliyet olarak adlandırdıkları, yönlü bir şebekedeki en kısa ve en uzun yolları hesaplamaya dayanan yeni bir optimizasyon kısıtı önermişlerdir. Bu kısıtın davranışını, kısıt programlama tabanlı esnek bir sütun oluşturma yaklaşımı aracılığıyla, karmaşık personel çizelgeleme problemleri üzerinde incelemişlerdir [Demasse ve ark., 2006].

Desaulniers, kaynak kısıtlarını dahil ederek ya da yok sayarak, sütun oluşturma algoritmasının alt probleminin bir en kısa yol problemi olarak alındığı bir dal-sınır yaklaşımı ile çözülebilen araç rotalama ve ekip çizelgeleme problemlerini incelemiştir. Bunlar arasından, özellikle, birincil amacın kullanılan araç ya da ekip sayısını, ikincil amacın işletme maliyetlerini minimize etmeyi amaçladığı, iki seviyeli hiyerarşik bir amaç fonksiyonu içeren çalışmalarla ilgilenmiştir [Desaulniers, 2007].

Crainic ve Rousseau, genel yaklaşım yerine yaklaşık çözüm veren hacim algoritmasını kullanarak, doğrusal bir program geliştirmişler ve çözüm zamanını oldukça kısaltmışlardır [Crainic ve Rousseau, 1987]. Anbil ve ark., havayolu ekip çizelgeleme problemine yaklaşık çözüm getiren ancak çözüm zamanında önemli azalmalar sağlayan bir doğrusal programlama yöntemi olan hacim algoritmasını önermişlerdir [Anbil ve ark., 1998].

Barnhart ve ark., ekip eşleştirme çözümlerini iyileştirmek için, deadhead uçuş seferlerini etkin bir şekilde seçmeye ve kullanmaya dayanan, sezgisel bir yöntem geliştirmişlerdir [Barnhart ve ark., 1995].

Klincewicz ve Rosenwein, havayolu çizelge planlamada karşılaşılan, günlük ekip çizelgelemede dikkate alınmayan ancak çizelgeye sonradan eklenmesi gereken değişiklikleri, bir şebeke akış modeli ile çizelgeye dâhil eden bir yaklaşım önermişlerdir [Klincewicz ve Rosenwein, 1995].

Beasley ve Cao, ekip çizelgeleme problemine bir alt sınır sağlamak için Lagrange yoluyla gevşetilen bir 0-1 tamsayılı programlama formülasyonu uygulamışlar ve bu alt sınırı bir ağaç arama prosedürüne dahil ederek optimal bir çözüm elde etmişlerdir [Beasley ve Cao, 1996]. Aynı yazarlar, ekiplerin çalışarak harcadıkları toplam zaman bir sınırı aşmayacak şekilde görevleri başlama ve bitirme zamanlarının sabit olduğu bir ekip çizelgeleme problemi için dinamik programlamayı kullanmışlardır [Beasley ve Cao, 1998].

Barnhart ve Shenoi, ekip çizelgeleme problemine, ilk olarak problemin yaklaşık bir modelini çözen ve daha sonra bu çözümü klasik çözümler için iyi bir başlangıç çözümü olarak kullanan bir yöntem önermişlerdir. Başlangıç çözümü kullanarak çözüm sürecini hızlandırmışlar ve ekip eşleştirmelerinin çözümünün kalitesini arttırabilmek için, yöntemi bir deadhead seçici ile beraber kullanılmayı önermişlerdir [Barnhart ve Shenoi, 1998].

Freling ve ark., araç ve ekip çizelgeleme problemlerini birlikte ele alarak çözmenin sağlayacağı faydayı göstermek için, önce bu problemleri birbirinden bağımsız olarak çözen bir yöntem geliştirmişler, ardından eş zamanlı olarak çözmüşlerdir. Geliştirdikleri matematiksel modeli Hollanda'da RET adlı toplu taşıma şirketinden aldıkları verilere uygulamışlar [Freling ve ark., 1999].

Lettovsky ve ark., havayolu çizelgelerinde meydana gelen gecikme, bakım ya da hava şartlarından kaynaklanan kesintiler yüzünden uçakların ya da ekiplerin yeniden atanmasını kapsayan iyileştirme problemi için bir yaklaşım geliştirmişlerdir [Lettovsky ve ark., 2000].

Alefragis ve ark., Avrupa havayollarının çoğunda kullanılan Carmen Systems'i temel alan bir çalışmada paralelleşme tekniğini kullanmışlardır [Alefragis ve ark., 1998].

Lagerholm ve ark., havayolu ekip çizelgeleme problemine iyi çözümler bulmak için Potts yapay sinir ağı yaklaşımı kullanmışlardır [Lagerholm ve ark., 1997], [Lagerholm ve ark., 2000].

Klabjan ve ark., havayolu ekip çizelgeleme problemini, maliyetleri minimize etmenin yanında, haftalık bir zaman ekseni boyunca seyahat planlarının devamlılığını ya da tekrarını maksimize etmeyi amaçlayan ikinci bir amaç ekleyerek modellemişlerdir [Klabjan ve ark., 2001/a].

Schaefer ve ark., ekip çizelgeleme problemini kesintileri dikkate alarak belirsizlik altında modellemişler ve optimal çizelge maliyetlerinde daha düşük bir alt sınır elde etmeyi başarmışlardır [Schaefer ve ark., 2005].

Tran ve ark., ekip eşleştirme probleminde, dual noktaların salınımını durağanlaştırmak için; bir durağanlaştırılmış sütun oluşturma yöntemini önermişler ve bu yöntemin performansını artırmada box-step yöntemlerinden yararlanmışlardır [Tran ve ark., 2006].

Guo ve ark., ekip üyelerinin merkez üsleri arasında düzensiz dağılım gösterdiği havayolları için ekip çizelgeleme ve atama problemlerini ele almışlardır. İlkinde haftalık ekip eşleştirmeleri zincirinin oluşturulduğu, ikincisinde ise bu eşleştirme zincirinin parçalarını ekip üyeleri çizelgelerine göre yeniden düzenlendiği, kısmi bütünleşik bir yaklaşım önermişlerdir [Guo ve ark., 2006].

Literatürde yer alan çalışmaların, kullanılan yöntemlere göre dağılımı EK-1’de sunulmuştur.

7. HAVAYOLU EKİP ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN BİR SÜTUN OLUŞTURMA ALGORİTMASI

7.1. Sütun Oluşturma Algoritması

Sütun oluşturma, bir problemin küçük, yönetilebilir bir parçasından değişkenlerin tamamıyla değil bir kısmı ile başlar. Bu küçük parça çözülerek çözüm analiz edilir ve problemin modele eklenecek bir sonraki parçası olarak bir ya da daha fazla değişken belirlenir. Daha sonra genişletilmiş model tekrar çözülür. Sütun oluşturma yoluyla çözümde, problemin bütününe tatmin edici bir sonuç bulunana kadar bu süreç tekrarlanır.

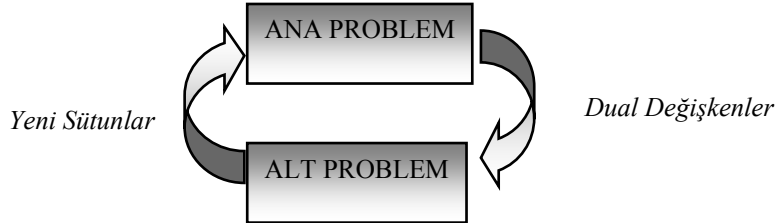
Sütun oluşturma algoritması büyük boyutlu doğrusal programları çözmek için kullanılan etkili bir algoritmadır. Bazı doğrusal programlarda, değişkenlerin ya da başka bir deyişle simplex algoritmasındaki sütunların sayısı milyonları bulabilmektedir. Algoritma, büyük boyutlu doğrusal programlarda değişkenlerin çoğu simplex algoritmasında temelde olmayacağı ve optimal çözümde sıfır değerini alacağı için, problemi çözerken değişkenlerin sadece bir alt kümesinin dikkate alınmasının yeterli olduğu düşüncesine dayanmaktadır. Algoritma, bir doğrusal program çözülürken işe sadece temelde olan değişkenlerle başlayıp, daha sonra temele girmesi gereken diğer değişkenleri belirlemek için indirgenmiş maliyeti kullanır.

Sütun oluşturma algoritmaları, iki aşamadan oluşur:

- Ana problem
- Alt problem

Ana problem, değişkenlerin sadece bir alt kümesini dikkate alan orijinal problemidir. Alt problem, ana probleme gönderilmek üzere yeni bir değişken tanımlamak için oluşturulan yeni bir problemidir. Alt problemin amaç fonksiyonu, yeni değişkenin mevcut dual değişkenlere göre oluşturulan indirgenmiş maliyetinin minimize

edilmesidir ve alt problemde üretilen bu yeni değişkenin, tüm gerekli kısıtları karşılaması sağlanır. Ana problemin alt problemle olan ilişkisi Şekil 7.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.1. Ana problem alt problem ilişkisi

Algoritma şu şekilde çalışır:

- Ana problem, uygun bir çözüm bulmaya yetecek belirli sayıda değişken ile çözülür.
- Bu problemin çözümünden ana problemdeki her kısıt için bir dual değişken değeri elde edilir. Bu dual değişkenler daha sonra alt problemin amaç fonksiyonunda kullanılır.
- Alt problem çözülür.
- Eğer alt problemin amaç fonksiyonu değeri negatif ise, negatif indirgenmiş maliyetli bir değişken (sütun) tanımlanır.
- Bu değişken daha sonra ana probleme eklenir ve ana problem yeniden çözülür.
- Ana problemi yeniden çözmek yeni bir dual değerler kümesi oluşturur ve süreç hiçbir negatif indirgenmiş maliyetli değişken oluşturulmayana kadar tekrarlanır.
- Alt problemin çözümü negatif olmayan bir indirgenmiş maliyetle döndüğünde, ana probleme bulunan çözümün optimal olduğu sonucuna varılır.

Çoğu durumda bu süreç daha önce kontrol edilmesi zor olarak düşünülen büyük doğrusal programların optimal olarak çözülmesini sağlar. Bu bağlamda, çok sayıda araştırmacı sütun oluşturmayı endüstriyel problemlerin büyük bir kısmını optimal ya da optimale yakın olarak çözmek için çok güçlü bir teknik olarak görmektedirler.

En bilinen örneği ise sütun oluşturma'nın başarılı bir biçimde uygulandığı kesme kaybı problemidir. Sütun oluşturma algoritması ayrıca, ekip çizelgeleme, ekip eşleştirme problemi, filo atama, araç rotalama, zaman pencereli gezgin satıcı problemi, personel çizelgeleme problemleri, hemşire çizelgelemede öncelik atama, esnek imalat sistemlerinde iş gruplama, uydu iletişim sistemlerinde trafik atama, genel atama problemi, grafik boyama, grafik ayırıştırma, paralel makineli tam zamanında çizelgeleme problemleri ve kapasiteli p-medyan problemi gibi birçok tamsayılı kısıtlı probleme de uygulanmaktadır.

Winston (1994)'ın kitabında belirttiği gibi; Ford ve Fulkerson, 1958'de sütun oluşturmaya çok ünlü şebeke akış problemi bağlamında önermiş, Dantzig ve Wolfe, 1960'da bunu bir ayırıştırma yapısında doğrusal programlama problemlerine adapte etmiş, Gilmore ve Gomory ise 1961'de algoritmanın etkinliğini bir kesme kaybı problemi ile göstermişlerdir [Winston, 1994].

7.2. Ekip Çizelgeleme Probleminin Sütun Oluşturma Yöntemiyle Çözümü

Sütun oluşturma yönteminin en etkin kullanıldığı alanlardan biri havayolu ekip çizelgeleme problemidir. Literatürde sütun oluşturma algoritmasını havayolu ekip eşleştirme problemine uygulayan ilk çalışma Minoux tarafından yapılmıştır [Minoux, 1984]. Ekip çizelgeleme problemi daha önce de açıklandığı gibi genellikle bir küme ayırıştırma ya da küme kaplama modeli ile formüle edilmektedir. Ancak problemi bu modellerde çözebilmek için temel varsayım, olası tüm yasal eşleştirmelerin oluşturulduğudur. Çünkü model, tüm yasal eşleştirmeler oluşturulduktan sonra bu eşleştirmelere bir maliyet değeri atayarak, tüm uçuş seferlerini en az ya da tam olarak bir kere kapsayan minimum maliyetli ekip eşleştirmeleri kümesini bulmayı amaçlamaktadır. Ancak tüm yasal eşleştirmeleri uygun bir biçimde oluşturmak bazen imkânsız olabilmektedir.

Sütun oluşturma algoritmasının havayolu ekip çizelgeleme problemine uygulanışı kesme kaybı problemine uygulanışına göre daha uğraştırıcıdır. Bu zorluk, havayolu ekip çizelgelemede sütun oluşturma algoritmasının ana problem ve alt probleminin

doğrusal programlama modeli olmamasından kaynaklanmaktadır. Havayolu ekip çizelgeleme probleminde ana problem bir küme kaplama ya da küme ayrıştırma modeli, alt problem ise genellikle bir en kısa yol problemi olarak formüle edilmektedir. Ana problemde belirli sayıda başlangıç eşleştirmesi arasından tüm uçuş seferlerini en az ya da tam olarak bir kere kapsayan minimum maliyetli ekip eşleştirmeleri kümesini bulmak amaçlanır. Alt problem ise, ana problemin amaç fonksiyonu değerini, yani toplam eşleştirme maliyetini azaltacak yeni eşleştirmelerin oluşturularak ana probleme gönderilmesini sağlar. Eşleştirmeler, değişkenlere yani simplex tablosundaki sütunlara, uçuş seferleri ise kısıtlara yani simplex tablosundaki satırlara karşılık gelmektedir. Ana problem ve alt problem, optimal çözüm bulunana kadar ardarda çözülür.

Ana Problem

Ana problemde amaç, toplam eşleştirme maliyetlerini minimize etmektir. Kısıt ise, her uçuş seferinin tam olarak ya da en az bir eşleştirme tarafından kapsanmasını sağlamaktır.

$$\text{Min } z = \sum_{j=1}^{n_i} c(j) * x(j) \quad (7.7)$$

subject to

$$\sum_{j=1}^{n_i} a(i, j) * x(j) = (\geq) 1 \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (7.8)$$

$$x(j) \in \{0, 1\} \quad \forall j = 1, \dots, n_i \quad (7.9)$$

Modelde kullanılan notasyonlar aşağıdaki gibidir:

$x(j)$; j eşleştirmesinin optimal çözümde yer alıp almayacağını gösteren 0-1 değişken
 $a(i, j)$; i uçuş seferinin j eşleştirmesi tarafından kapsanıp kapsanmadığını gösteren parametre

$c(j)$; j eşleştirmesinin maliyet değeri

m ; uçuş seferlerinin sayısı

n_t ; t. iterasyondaki eşleştirme sayısı

t ; mevcut iterasyon

$t=0$ iken n_t , başlangıçta oluşturulan eşleştirme sayısı kadar alınır. Her iterasyon sonucunda, alt problem aracılığı ile yeni bir eşleştirme oluşturularak, n_t değeri bir artırılmaktadır.

Alt Problem

Ana problem bir küme ayrıştırma ya da küme kaplama modeli ile çözüldükten sonra, ana problemdeki her bir uçuş seferi için oluşturulan kısıtlara ilişkin dual değerler alt probleme gönderilir. Alt problem şebeke akış modellerinden biriyle formüle edilir. En sık kullanılan alt problem tipi ise en kısa yol problemidir.

Çünkü alt problem, uçuş çizelgesindeki uçuş seferinin her birinin bir düğüm olarak yer aldığı, uçuş seferleri arasındaki uçuş ve mola sürelerinin oklarla gösterildiği, personelin konumlandığı merkez üssünde başlayan ve burada sonlanan bir uçuş şebekesindeki en kısa yolları bulmayla ilgilenmektedir. Şebekedeki her yol bir eşleştirmeye karşılık gelmektedir.

Alt problemin amacı, bu şebekede yasal eşleştirme olma kısıtlarını sağlayan minimum negatif indirgenmiş maliyetli eşleştirmeyi bulmaktır. Minimum indirgenmiş maliyetli eşleştirme aynı zamanda ana problemin amaç değerini iyileştirebilme potansiyeli olan bir eşleştirme anlamına gelmektedir. Alt problemin ana problemle olan bağlantısını ise dual değişkenler sağlamaktadır. Ana problemde her bir uçuş seferine karşılık gelen kısıtlara ilişkin dual değerler, alt problemin amaç fonksiyonunda eşleştirmelerin indirgenmiş maliyetlerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Alt problemde her bir eşleştirmeye karşılık gelen değişkenlere ilişkin indirgenmiş maliyetler, o eşleştirmenin maliyetinden karını çıkartarak elde edilir. Ana problemde gelen dual değerler kullanılarak eşleştirmelerin karları hesaplanır. Eşleştirmelerin maliyetleri ise günlük ekip eşleştirmeleri göz önünde bulundurulacağı için;

$$\text{Eşleştirme Maliyeti} = \text{Max} \begin{cases} \text{PMDG} \\ \text{TAFB Faktör} * \text{TAFB} \\ \text{Toplam Uçuş Zamanı} \end{cases} \quad (7.10)$$

formülasyonuna göre hesaplanmaktadır.

Burada oluşturulacak eşleştirmelere ilişkin maliyet değerleri yukarıda açıklanan maliyet yapısından ötürü doğrusal olmadığı için, alt problemin çözümünde bu yapı doğrusallaştırılmıştır. Alt problemin matematiksel formülasyonu aşağıda verilmiştir.

$$\text{Min } z = V - \sum_{i,j=1}^n d(i,j) * x(i,j) \quad (7.11)$$

subject to

$$V \geq \left(\sum_{i,j=1}^n f(i,j) * x(i,j) + \sum_{i,j=1}^n r(i,j) * x(i,j) \right) * \text{TAFB Faktör} \quad (7.12)$$

$$V \geq \sum_{i,j=1}^n f(i,j) * x(i,j) \quad (7.13)$$

$$V \geq \text{PMDG} \quad (7.14)$$

$$\sum_{i=1}^n x(i,j) - \sum_{i=1}^n x(j,i) = 0 \quad \forall j = 2 \dots n-1 \quad (7.15)$$

$$\sum_{j=1}^n x(1,j) = 1 \quad (7.16)$$

$$\sum_{i=1}^n x(i,n) = 1 \quad (7.17)$$

$$\sum_{i,j=1}^n f(i,j) * x(i,j) \leq \text{Toplam Uçuş Zamanı} \quad (7.18)$$

$$\sum_{i,j=1}^n f(i,j) * x(i,j) + \sum_{i,j=1}^n r(i,j) * x(i,j) \leq \text{TAFB} \quad (7.19)$$

$$\sum_{i,j=1}^n x(i,j) \leq \text{Max İniş Sayısı} \quad (7.20)$$

$$\sum_{i,j=1}^n x(i,j) \geq \text{Min İniş Sayısı} \quad (7.21)$$

Modelde kullanılan notasyonlar aşağıdaki gibidir:

$f(i,j)$; i ve j şehirleri arasındaki uçuş periyodu

$r(i,j)$; i ve j uçuş seferleri arasındaki mola periyodu

$d(i,j)$; ana problemten alt probleme gönderilen uçuş seferlerine ilişkin dual değerler

$x(i,j)$; i ve j düğümleri arasındaki uçuş ya da mola oku seçilirse 1, seçilmezse 0 değerini alan karar değişkeni

$$V; \text{ her bir eşleştirmeye ait Eşleştirme Maliyeti} = \text{Max} \begin{cases} \text{PMDG} \\ \text{TAFB Faktör} * \text{TAFB} \\ \text{Toplam Uçuş Zamanı} \end{cases}$$

formülüne göre hesaplanan maliyet değeri

Burada eşleştirme maliyetlerinin daima pozitif değerler olduğu varsayımı vardır. Aksi durumda yeni oluşturulan eşleştirmenin ana problem üzerinde bir iyileştirme sağlaması beklenemez.

Eş. 7.11 ile gösterilen amaç fonksiyonuna göre, amaç, şebekedeki tüm eşleştirmeler arasından minimum indirgenmiş maliyetli eşleştirmeyi bulmaktır. V ile gösterilen maliyet değerinin, “PMDG”, “TAFB Faktör*TAFB” ve “Toplam Uçuş Zamanı”ndan maksimum olanını alması, sırasıyla Eş. 7.12 – Eş. 7.14 tarafından sağlanmaktadır. Eş. 7.15, her düğüme giren ve çıkan ok sayılarının birbirine eşit olmasını sağlar. Eş. 7.16, merkez üssünü ifade eden 1 no’lu düğümden çıkan okların toplamının bire eşit olmasını sağlar. Eş. 7.17, merkez üssünü ifade eden “ n ” no’lu düğüme giren okların toplamının bire eşit olmasını sağlar. Eş. 7.18 ve Eş. 7.19 sırasıyla, eşleştirmedeki uçuş seferlerine ait toplam gerçek uçuş zamanının ve bir eşleştirmede merkez üssünden uzakta geçen toplam zamanı ifade eden TAFB değerinin, önceden belirlenen bir üst sınır değerini aşmamasını sağlar. Eş. 7.20 ve Eş. 7.21, bir eşleştirmedeki inişlerin maksimum ve minimum sınırlar arasında gerçekleşmesini sağlar.

Alt problemi çözebilmek için oluşturulan şebekede, her bir uçuş seferi bir düğümlerle ifade edilir. Bu düğümlere ilaveten, her eşleştirmenin merkez üssünde başlayıp sonlanmasını sağlayan iki adet düğüm de gerekmektedir. Uçuş seferlerini ifade eden bu düğümler birbirlerine oklarla bağlanırlar. Şebekede birbiri ardına gelebilecek uçuş

seferlerini bağlayan mola okları, tüm eşleştirmelerin merkez üssünde başlamasını sağlayan başlangıç okları ve merkez üssünde sonlanmasını sağlayan bitiş okları olmak üzere üç çeşit ok bulunmaktadır.

8. UYGULAMA

Bu tez kapsamında, merkez üssü İstanbul olan özel bir havayolu şirketi için günlük ekip eşleştirme problemi sütun oluşturma algoritması kullanılarak çözülmüştür. Çalışmada havayolunun sadece yaz dönemi iç hatlar tarifesine ait uçuş çizelgesinden haftanın her günü gerçekleştirilen 42 uçuş seferi seçilmiştir. Haftanın her günü tekrar eden bu uçuş seferleri dışında havayolunun haftanın belirli günleri ya da sadece bir günü gerçekleştirilen uçuş seferleri de vardır. Burada bir temel oluşturması açısından günlük ekip eşleştirme probleminin çözülmesi amaçlanmıştır. Günlük eşleştirme problemine uygun bir çözüm elde edildikten sonra, haftalık istisnalar ve diğer uçuş seferleri de modele eklenerek, ileri tarihli bir versiyon elde edilebilir.

Çalışmada ele alınan havayolu şirketinin günlük ekip eşleştirme problemini sütun oluşturma algoritması ile çözebilmek için gerekli olan veriler;

- Uçuş çizelgesi
- Başlangıç eşleştirmeleri
- Uçuş şebekesi

olarak sıralanabilir. Bu veriler, bölümün ilerleyen kısımlarında yeri geldikçe verilmiştir.

Bu bölümde, öncelikle ele alınan havayolu şirketinin ekip çizelgelerini oluştururken uymak zorunda olduğu kısıtlar açıklanmıştır. Ardından eşleştirmelerin maliyet değerlerinin nasıl hesaplandığı gösterilmiş ve daha önce Eş. 4.3'te açıklanan maliyet fonksiyonunda belirtilen parametrelerin çalışmada ele alınan değerleri verilmiştir. Daha sonra, havayolunun haftanın her günü gerçekleşen uçuş seferlerinden oluşan uçuş çizelgesi ve ana probleme başlangıçta uygun bir çözüm elde edebilmek için oluşturulan başlangıç eşleştirmeleri çizelgeler halinde sunulmuştur. Ardından, çözüm yöntemi olarak seçilen sütun oluşturma algoritmasının ana problem ve alt probleminin matematiksel formülasyonları ve algoritmanın çalışma süreci

açıklanmış, alt problemin çözümünde şebeke yapısından nasıl yararlanıldığına yer verilmiştir. Ardından, elde edilen optimal ekip çizelgelerine yer verilmiştir. Son olarak, tüm olası yasal ekip eşleştirmeleri bir ön faz olarak oluşturulduktan sonra, problemin geleneksel çözüm yöntemi olan küme kaplama modeli ile çözülmüş ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

8.1. Kısıtlar

SHGM'nün hazırladığı Uçucu Ekip Uçuş Görev ve Dinlenme Süreleri ile Uygulama Esasları Talimatı (SHT-6A.50 Rev. 04)'na göre, bir görev periyodu içinde gerçekleştirilen kısa mola periyodu en az 30 dk en fazla 300 dk olmalıdır. Bir görev periyodunda geçen toplam zaman, yani azami uçuş görev süresi en fazla 14 saat (840 dk) olmalıdır. Bir görevde gerçekleşen uçuş seferlerine ait toplam gerçek uçuş zamanı en fazla 8 saat (480 dk) olmalıdır. Uçuş görevi için hazırlık yapılması ile ilk uçuş seferi arasında gerçekleşen brief periyot en az 60 dk, uçuş görevinde bulunan son uçuş seferinin sona ermesinden itibaren geçen süre ise en az 30 dk olmak zorundadır. Bu nedenle brief ve debrief periyotları da dikkate almak için bir görevde gerçekleşen uçuş seferlerine ait toplam gerçek uçuş zamanı en fazla 6,5 saat (390 dk) olmalıdır. Bir görevdeki inişlerin sayısı en fazla 5 olmalıdır.

Günlük ekip eşleştirme probleminde eşleştirmeler bir görev periyodundan oluştuğu için, görev periyodu kısıtları aynı zamanda ekip eşleştirme kısıtları olmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan uçuş çizelgesi verilerinin ait olduğu hava yolu şirketinin ekip planlama bölümü SHGM'nün belirlediği kuralları uygulamaktadır. Bu nedenle yukarıda açıklanan eşleştirme ve görev periyodu kısıtları mevcut veriler için geçerlidir ve havayolu şirketinin ekip eşleştirmelerini oluştururken uymak zorunda olduğu kurallardır. Çalışmada bu kurallar doğrultusunda söz konusu havayolu şirketi için, her uçuş seferinin en az bir eşleştirme tarafından kapsandığı minimum maliyetli optimal ekip eşleştirmeleri elde edilmiştir.

8.2. Maliyet Yapısı

Günlük ekip eşleştirme probleminde eşleştirmeler bir görev periyodundan oluştuğu için, eşleştirme maliyetleri, görev periyodu maliyetlerine eşit olacaktır.

Eşleştirmedeki Görev Sayısı = 1 olduğundan Uçuş Görev Süresi = TAFB olmaktadır.

Bu çalışmada günlük ekip çizelgeleme problemi ele alındığı için, eşleştirme maliyetlerinin hesaplanmasında kullanılan parametrelerin aldığı değerler şöyledir:

$$\begin{aligned} \text{Uçuş Görev Süresi Faktörü} &= \text{TAFB Faktör} = 0,6 \quad \text{MDG} = 3 \text{ saat} = 180 \text{ dk} \\ \text{Eşleştirme Maliyeti} &= \text{Max} \{ 180, \text{TAFB} * 0.6, \text{Toplam Uçuş Zamanı} \} \end{aligned} \quad (8.1)$$

Eşleştirmenin maliyeti, eşleştirmede üsten uzakta geçen toplam zamanın %60'ı kadardır. Eğer bir eşleştirmede gerçekleşen toplam gerçek uçuş zamanı bu değerden büyükse, bu fazladan bir maliyet getireceğinden, eşleştirmenin maliyeti de bu değer kadar alınır. Bu değer ise her eşleştirme için belirlenen üç saatlik alt sınır değerinden az olmamalıdır. Bu nedenle eşleştirmenin maliyeti hesaplanırken bu üç değerden maksimum olanı alınmalıdır.

8.3. Uçuş Çizelgesi

Özel bir havayolu şirketinden alınan iç hatlar yaz dönemi tarifesine ait 42 uçuş seferinden oluşan uçuş çizelgesi Çizelge 8.1'de gösterilmiştir. Merkez üssü konumundaki şehir İstanbul olduğundan, eşleştirmeler oluşturulurken başlangıç ve bitiş şehrinin, IST kodlu İstanbul şehri olması gerekmektedir. Ayrıca uçuş seferleri sıralanırken şehir ve zaman öncelikleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Yani bir eşleştirme içindeki birinci uçuş seferinin varış şehri ile ikinci uçuş seferinin kalkış şehri aynı şehir olmalıdır. Aynı zamanda birinci uçuş seferinin varış zamanı, ikinci uçuş seferinin kalkış zamanından daha küçük olmalıdır. Uçuş seferleri arasındaki mola süreleri ise, Bölüm 8.1'de açıklandığı gibi, en az 30 en fazla 300 dk olacak şekilde uçuş seferleri sıralanmalıdır.

Çizelge 8.1. Uçuş çizelgesi

Uçuş Seferi	Kalkış Şehri	Varış Şehri	Kalkış Zamanı	Varış Zamanı
1	IST	ADA	16:55	18:10
2	ADA	IST	18:40	20:00
3	IST	ANK	09:55	10:45
4	IST	ANK	11:10	12:00
5	ANK	IST	15:30	16:25
6	ANK	IST	16:15	17:10
7	IST	ANT	12:20	13:25
8	IST	ANT	18:45	19:50
9	IST	ANT	20:50	21:55
10	ANT	IST	13:55	15:00
11	ANT	IST	20:20	21:25
12	ANT	IST	22:30	23:40
13	IST	BOD	07:25	08:30
14	IST	BOD	15:30	16:35
15	BOD	IST	09:00	10:10
16	BOD	IST	17:05	18:15
17	IST	DLM	20:30	21:35
18	DLM	IST	22:05	23:15
19	IST	DIY	15:30	17:10
20	IST	DIY	14:50	16:30
21	DIY	IST	17:40	19:25
22	DIY	IST	17:00	18:45
23	IST	GZT	10:40	12:05
24	GZT	IST	12:35	14:05
25	IST	IZM	06:55	07:45
26	IST	IZM	18:30	19:30
27	IZM	IST	08:25	09:20
28	IZM	IST	20:00	20:55
29	IST	TRB	19:15	20:45
30	IST	TRB	19:55	21:25
31	TRB	IST	21:15	22:50
32	TRB	IST	21:55	23:35
33	ANK	DIY	13:30	14:50
34	DIY	ANK	15:35	16:55
35	ANK	ERZ	12:30	13:50
36	ERZ	ANK	14:20	15:45
37	ANK	TRB	20:50	21:55
38	TRB	ANK	11:35	12:45
39	ANK	VAN	11:15	12:45
40	VAN	ANK	13:25	15:00
41	IST	TRB	09:35	11:05
42	TRB	IST	22:25	00:00

8.4. Başlangıç Eşleştirmelerinin Oluşturulması

Olası tüm uygun eşleştirmeleri dikkate almak yerine yasal eşleştirmelerin tüm uçuş seferlerini en az bir kere kapsayan küçük bir alt kümesi belirlenerek ana problem çözülmüştür. Başlangıç eşleştirmeleri ana problemin uygun bir çözümle sonlanmasına yetecek sayıda oluşturulmalıdır. Bunun için başlangıç eşleştirmeleri oluşturulurken yasal eşleştirme olma kısıtları göz önünde bulundurulmuştur. Ve tüm uçuş seferlerinin başlangıçta oluşturulan bu eşleştirmeler tarafından da en az bir kere kapsanması sağlanmıştır. Başlangıç eşleştirmeleri literatürde genellikle, uygun bir çözüm veren sezgisel bir yöntem kullanılarak ya da manuel olarak oluşturulmaktadır. Burada başlangıç eşleştirmeleri, manuel olarak ya da başka bir kod yapısı kullanılarak değil, bir doğrusal programlama model yapısı kullanılarak oluşturulmuştur. Başlangıç eşleştirmelerini oluşturmada kullanılan matematiksel model yapısı aşağıdaki gibidir.

$$\text{Min } z = M \quad (8.2)$$

s.t.

$$\sum_{i,k} X(i,j,k) \geq 1 \quad \forall j \text{ için} \quad (8.3)$$

$$\sum_{i,k} X(j,i,k) \geq 1 \quad \forall j \text{ için} \quad (8.4)$$

$$\sum_{j,k} X(0,j,k) = M \quad (8.5)$$

$$\sum_{j,k} X(j,43,k) = M \quad (8.6)$$

$$\sum_i X(i,j,k) - \sum_i X(j,i,k) = 0 \quad \forall j, k \text{ için} \quad (8.7)$$

$$\sum_{i,j} f(i) * X(i,j,k) \leq 390 \quad \forall k \text{ için} \quad (8.8)$$

$$\sum_{i,j} (f(i) + r(i,j)) * X(i,j,k) \leq 840 \quad \forall k \text{ için} \quad (8.9)$$

$$\sum_{i,j} X(i,j,k) \leq 5 \quad \forall k \text{ için} \quad (8.10)$$

$$\sum_{i,j} X(i,j,k) \geq 4 \quad \forall k \text{ için} \quad (8.11)$$

Bunun dışında eşleştirmeler, herhangi bir programlama dili tabanlı bir eşleştirme üretici kullanılarak da elde edilebilir.

Modelde kullanılan notasyonlar aşağıda belirtilmiştir:

$X(i,j,k)$; i ve j uçuş seferlerinin k eşleştirmesi tarafından kapsanıp kapsanmadığını gösteren 0-1 değişken

$f(i)$; i uçuş seferinin uçuş periyodu

$r(i,j)$; i ve j uçuş seferleri arasındaki mola periyodu

M ; başlangıç eşleştirmelerinin sayısı

i,j ; uçuş seferleri

k ; eşleştirme

Eş. 8.3 ve Eş. 8.4, her j uçuş seferinin en az bir eşleştirme tarafından kapsanmasını, Eş. 8.5 ve Eş. 8.6, tüm eşleştirmelerin merkez üssü olan İstanbul'da başlayıp sonlandırılmasını, Eş. 8.7, her eşleştirmede tüm uçuş seferlerine giren ve çıkan ok sayısının eşit olmasını, böylece çizelgenin devamlılığını sağlamaktadır.

Eş. 8.8 ve Eş. 8.9, her eşleştirme için toplam uçuş süresi ve görev süresi kısıtını, Eş. 8.10 ve Eş. 8.11 ise her eşleştirmede gerçekleşecek uçuş seferi sayısının alt ve üst sınırını ifade etmektedir.

Yukarıdaki model GAMS optimizasyon programı ile çözdürülerek, yapılan denemeler sonrasında oluşturulan 17 adet başlangıç eşleştirmesinin, problemin uygun bir çözümle sonlanmasına yetecek sayıda olduğu sonucuna varılmıştır. Ana probleme başlangıç eşleştirmeleriyle bulunan çözümün amaç değeri 5309 olup, bu çözüm uygun bir çözümdür.

Oluşturulan 17 adet başlangıç eşleştirmesi Çizelge 8.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 8.2. Başlangıç eşleştirmeleri

Başlangıç Eşleştirmeleri	Uçuş Seferleri					Eşleştirme Maliyetleri
X1	19	21	9	12		340
X2	23	24	26	28		369
X3	4	33	34	37	42	462
X4	4	33	21	17	18	435
X5	3	35	36	6		270
X6	3	5	8	11		414
X7	41	38	33	22		345
X8	1	2	9	12		290
X9	7	10	29	32		405
X10	20	22	29	31		390
X11	41	38	33	21		354
X12	3	35	36	6		270
X13	3	39	40	6		290
X14	20	21	30	42		390
X15	13	15	7	10		273
X16	14	16	8	12		294
X17	25	27	3	5		342

8.5. Sütun Oluşturma Algoritması

Problem, ana problem ve alt problem olmak üzere iki aşamada çözülmüştür. Sütun oluşturma algoritmasının ana problemi, ekip çizelgeleme probleminin en yaygın formülasyonu olan küme kaplama problemidir. Ana problemde olası tüm yasal eşleştirmeleri oluşturmak ve bunlar arasından her uçuş seferi en az bir eşleştirme tarafından kapsanacak şekilde minimum maliyetli eşleştirmeler kümesini seçmek, özellikle büyük boyutlu problemler için gereksiz hesaplama karmaşıklığına neden olacağından, bunun yerine değişkenlerin uygun bir alt kümesi başlangıç eşleştirmeleri olarak kullanılmıştır. Alt problem ise, uçuş seferlerinin düğümlerle, uçuş ve mola periyotlarının oklarla ifade edildiği bir şebekedeki en kısa yol problemidir. Ana problemde her bir kısıt bir uçuş seferine karşılık gelmektedir. Ana problem ve alt problem iteratif olarak çözülmüştür. Ana problemin çözümünden elde edilen kısıtlara ilişkin dual değerler alt problemin amaç fonksiyonunda kullanılmıştır. Bu dual değerler alt problemde eşleştirmelerin indirgenmiş maliyetlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Alt problem ile her iterasyonda en negatif

indirgenmiş maliyetli eşleştirme bulunarak ana probleme eklenmiştir. Negatif indirgenmiş maliyetli bir eşleştirme bulunmadığında algoritma sonlandırılmıştır. Sütun oluşturma algoritması sonucunda elde edilen amaç fonksiyonu değeri optimal çözümü vermektedir. Yani elde edilen ekip çizelgesi optimaldir.

Eşleştirmeleri alt problem aracılığıyla oluşturarak, ana problemin amaç değerini, yani toplam eşleştirme maliyetini, azaltma potansiyeli olan eşleştirmeler, her aşamada ana probleme gönderilmiştir. Böylece aşama aşama optimal çözüme yaklaşılmıştır. Tüm değişkenleri oluşturmaya gerek kalmadan problem çözülmüştür. Böylece hesaplama karmaşıklığı da ortadan kaldırılmıştır.

Problemin çözümünde kullanılan sütun oluşturma yönteminin, ana problem ve alt probleminin matematiksel formülasyonları aşağıda gösterilmiştir. Başlangıç eşleştirmeleri, ana problem ve alt problem, GAMS optimizasyon programı kullanılarak bütünleşik olarak kodlanmış ve iteratif olarak çözülmüştür. Sütun oluşturma algoritmasına ait GAMS optimizasyon programı kodları EK-2’ de sunulmuştur.

8.5.1. Ana problem

Sütun oluşturma algoritmasının ana probleminin matematiksel formülasyonu aşağıdaki gibi bir küme kaplama modelidir:

$$\text{Min } z = \sum_{k=1}^{n_t} c(k) * x(k) \quad (8.12)$$

subject to

$$\sum_{k=1}^{n_t} a(i, k) * x(k) \geq 1 \quad \forall i = 1, \dots, 42 \quad (8.13)$$

$$x(k) \geq 0 \quad \forall k = 1, \dots, n_t \quad (8.14)$$

$$a(i, k) \in \{0, 1\} \quad \forall i = 1, \dots, 42, \forall k = 1, \dots, n_t$$

Modelde kullanılan notasyonlardan k ; eşleştirme indisi olup, diğer notasyonlar Bölüm 7.2.'de açıklandığı gibidir.

Çalışmada ana problemin küme kaplama modeli olarak formüle edilmesinin nedeni, bu modelde kısıtların küme ayrıştırma modeline göre gevşetilmiş olmasıdır. Küme ayrıştırma modeli, tüm uçuş seferlerinin tam olarak bir kere kapsanmasını gerektirdiğinden, sütun oluşturma algoritmasının çözüm süresi oldukça artmakta ve optimal bir çözüm bulunamaması söz konusu olabilmektedir.

Problem için oluşturulan başlangıç eşleştirmelerinin sayısı 17 olduğundan, mevcut aşamadaki eşleştirme sayısını gösteren n_t parametresi, $t=0$ iken yani başlangıçta 17 değerini almaktadır. Her iterasyonda alt problem aracılığı ile yeni bir eşleştirme oluşturularak n_t 'yi bir artırmaktadır. Amaç, toplam eşleştirme maliyetlerini minimize etmektir. Kısıt ise, her uçuş seferinin en az bir eşleştirme tarafından kapsanmasını sağlamaktır.

8.5.2. Alt problem

Alt problem bir en kısa yol problemidir. Alt problem, uçuş çizelgesindeki 42 uçuş seferinin her birinin bir düğüm olarak yer aldığı, uçuş seferleri arasındaki olası bağlantıların oklarla gösterildiği, merkez üssü olan İstanbul şehrinde başlayan ve sonlanan bir uçuş şebekesindeki en kısa yolları bulmayla ilgilenmektedir. Bu şebeke sadece uçuş seferleri arasındaki öncelikler ve mola süreleri dikkate alınarak oluşturulmuştur. Şebekedeki her yol bir eşleştirmeye karşılık gelmektedir.

Amaç, bu şebekede merkez üssü olan İstanbul'da başlayıp İstanbul'da sonlanan ve yasal eşleştirme olma kısıtlarını sağlayan minimum negatif indirgenmiş maliyetli eşleştirmeyi bulmaktır.

Minimum indirgenmiş maliyetli eşleştirme aynı zamanda ana problemin amaç değerinin iyileştirebilme potansiyeli olan bir eşleştirme anlamına gelmektedir.

Alt problemin ana problemle olan bağlantısını ise dual değişkenler sağlamaktadır. Ana problemde her bir uçuş seferini ifade eden kısıtlara ilişkin dual değerler, alt problemin amaç fonksiyonunda eşleştirmelerin indirgenmiş maliyetlerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Alt problemde her bir eşleştirmeye karşılık gelen değişkenlere ilişkin indirgenmiş maliyetler, o eşleştirmenin maliyetinden karını çıkartarak elde edilir. Ana problemde gelen dual değerler eşleştirmelerin karlarına karşılık gelmektedir.

Eşleştirmelerin maliyetleri ise, Eş. 8.1 formülasyonuna göre hesaplanmaktadır.

Burada oluşturulacak eşleştirmelere ilişkin maliyet değerleri Bölüm 8.1’de açıklanan maliyet yapısından ötürü doğrusal olmadığı için, alt problemin çözümünde bu yapı doğrusallaştırılmıştır.

Alt problemin matematiksel formülasyonu aşağıdaki gibidir:

$$\text{Min } z = \left(V - \sum_{i,j} d(i) * X(i,j) \right) \quad (8.15)$$

$$\text{subject to} \quad (8.16)$$

$$V \geq 0.6 * \sum_{i,j} (f(i) + r(i,j)) * X(i,j) \quad (8.17)$$

$$V \geq \sum_{i,j} f(i) * X(i,j) \quad (8.18)$$

$$V \geq 180 \quad (8.19)$$

$$\sum_j X(i,j) = \sum_j X(j,i) \quad \forall i = 1, \dots, 42 \quad (8.20)$$

$$\sum_i X(0,i) = 1 \quad (8.21)$$

$$\sum_i X(i,43) = 1 \quad (8.22)$$

$$\sum_{i,j} f(i) * X(i,j) \leq 390 \quad (8.23)$$

$$\sum_{i,j} (f(i) + r(i,j)) * X(i,j) \leq 840 \quad (8.24)$$

$$\sum_{i,j} X(i,j) \leq 5 \quad (8.25)$$

$$\sum_{i,j} X(i,j) \geq 4$$

Modelde kullanılan notasyonlar aşağıdaki gibidir:

$f(i)$; i uçuş seferine ait uçuş periyodu

$r(i,j)$; i ve j uçuş seferleri arasındaki mola periyodu

$d(i)$; ana problemde alt probleme gönderilen uçuş seferlerine ilişkin dual değerler

$x(i,j)$; i ve j düğümleri arasında bir bağlantı mümkünse 1 değilse 0 değerini alan karar değişkeni

V ; her bir eşleştirmeye ait $Max \{180, TAFB * 0.6, Toplam Uçuş Zamanı\}$ formülüne göre hesaplanan maliyet değeri

Alt problemi çözebilmek için oluşturulan şebekede, her bir uçuş seferiyle ilişkili 42 adet düğüm vardır. Bunlara ilaveten her eşleştirmenin İstanbul'da başlamasını ve sonlanmasını sağlayan iki adet düğüm bulunmaktadır (0 ve 43 nolu düğümler). Bu nedenle şebekede toplam 44 adet düğüm bulunmaktadır. Ardı ardına gelebilecek uçuş seferlerini birbirine bağlayan mola okları, tüm eşleştirmelerin merkez üssü İstanbul'dan başlamasını sağlayan başlangıç okları ve merkez üssünde sonlanmasını sağlayan bitiş okları olmak üzere üç çeşit ok bulunmaktadır. Şebekedeki her bir uçuş seferinin kalkış ve varış şehri ve zamanları GAMS optimizasyon programına parametre olarak girilmiştir. Alt probleme ait şebeke yapısı EK-3'te sunulmuştur.

Ana problem ve alt probleme ait modeller ve başlangıç eşleştirmelerini elde etmek için oluşturulan matematiksel model, GAMS IDE 2.0.24.12 versiyonu ile bütünleşik kodlanmış olup, bu üç model arasındaki iteratif yapının sağlanması için GAMS optimizasyon programının sunduğu bazı özel yapılardan faydalanılmıştır.

Ana problemin 17 adet başlangıç eşleştirmesi ile çözümünü gösteren GAMS optimizasyon programı çıktıları EK-4'te, ana problemin 44 eşleştirme ile optimal çözümünü gösteren GAMS optimizasyon programı çıktıları ise EK-5'te sunulmuştur.

Modelde yer alan kısıtlar, daha önce de belirtildiği gibi, SHGM tarafından belirlenen ve havayolunun ekip çizelgelerini oluştururken dikkate alması gereken kısıtlardır. Minimum indirgenmiş maliyetli yasal eşleştirmenin oluşturulmasında karşılanması

gereken bu kısıtlar, şebekedeki düğüm ve oklar aracılığıyla alt problemde kontrol edilirler. Buna göre şebekedeki her düğüme giren ve çıkan ok sayıları eşit olmalıdır. Merkez üssünü ifade eden 0 no'lu düğümden çıkan okların toplamı bir olmalıdır. Merkez üssünü ifade eden 43 no'lu düğüme giren okların toplamı bir olmalıdır. Eşleştirmedeki uçuş seferlerine ait toplam gerçek uçuş zamanı altı buçuk saati, eşleştirmenin görev periyodu ondört saati aşmamalıdır. Bir eşleştirmedeki inişlerin sayısı en az dört en fazla beş olmalıdır. Amaç, şebekedeki tüm eşleştirmeler arasından minimum indirgenmiş maliyetli eşleştirmeyi bulmaktır.

8.6. Algoritmanın İterasyonları

Başlangıçta 17 eşleştirme ile maliyet 5309 olarak elde edilmiştir. Her iterasyonda ana problemde alt probleme uçuş seferlerine ilişkin dual değerler gönderilmiş, bu değerler alt problemin amaç fonksiyonunda minimum negatif indirgenmiş maliyetli eşleştirmenin bulunmasında kullanılmıştır. 13 iterasyon sonucunda optimal maliyet değeri olan 3593 değerine ulaşılmıştır.

8.7. Optimal Ekip Çizelgesi

Sütun oluşturma algoritması sonucunda elde edilen optimal çizelgenin maliyeti 3593 olup oluşturulan eşleştirmeler Çizelge 8.3'teki gibidir.

Çizelge 8.3. Optimal ekip eşleştirmeleri

Optimal Çözümde Yer Alan Değişkenler	Optimal Ekip Eşleştirmeleri
X3	4-33-34-37-42
X8	3-35-36-6
X10	14-16-8-11
X12	25-27-23-24
X15	20-22-29-31
X18	1-2-17-18
X22	19-21-9-12
X24	41-38-5-26-28
X25	3-39-40-5
X31	14-16-30-32
X43	13-15-7-10

Optimal ekip eşleştirmelerinde yer alan 3 no'lu uçuş seferi hem 8 hem 25 no'lu eşleştirme, 5 no'lu uçuş seferi hem 24 hem 25 no'lu eşleştirme, 14 ve 16 no'lu uçuş seferleri de hem 10 hem 31 no'lu eşleştirmeler tarafından kapsanmaktadırlar. Ancak aynı uçuş seferinin birden fazla eşleştirme tarafından kapsanması, aynı uçuş seferine birden fazla ekibin atanması anlamına gelmektedir. Uygulamada her uçuş seferi tam olarak bir ekip tarafından uçurulacağından, bu tekrarlayan uçuş seferlerini ekiplerin birinden kaldırmak gerekmektedir. Aksi takdirde bu durum, ekibin yani kaynakların gereksiz kullanımına neden olacaktır.

Bu nedenle, 14 ve 16 no'lu uçuş seferleri maliyette daha fazla azalma sağlayacağı 31 nolu eşleştirmeden, 3 ve 5 no'lu uçuş seferleri de 25 no'lu eşleştirmeden kaldırılmıştır. 25 no'lu eşleştirmede gerçekleştirilmesi gereken 39 no'lu uçuş seferi Ankara'dan gerçekleşeceği için bir IST - ANK seferi ile personel yolcu olarak Ankara'ya taşınacaktır.

Oluşturulan yeni çizelge Çizelge 8.4.'teki gibidir.

Çizelge 8.4. Her uçuş seferinin tam olarak bir ekip tarafından kapsandığı optimal ekip çizelgesi

Ekipler	Eşleştirmeler			
1.ekip	IST	ANK	11:10	12:00
	ANK	DIY	13:30	14:50
	DIY	ANK	15:35	16:55
	ANK	TRB	20:50	21:55
	TRB	IST	22:25	00:00
2.ekip	IST	ANK	09:55	10:45
	ANK	ERZ	12:30	13:50
	ERZ	ANK	14:20	15:45
	ANK	IST	16:15	17:10
3.ekip	IST	BOD	15:30	16:35
	BOD	IST	17:05	18:15
	IST	ANT	18:45	19:50
	ANT	IST	20:20	21:25
4.ekip	IST	IZM	06:55	07:45
	IZM	IST	08:25	09:20
	IST	GZT	10:40	12:05
	GZT	IST	12:35	14:05

Çizelge 8.4. (Devam) Her uçuş seferinin tam olarak bir ekip tarafından kapsandığı optimal ekip çizelgesi

5.ekip	IST	DIY	14:50	16:30
	DIY	IST	17:00	18:45
	IST	TRB	19:15	20:45
	TRB	IST	21:15	22:50
6.ekip	IST	ADA	16:55	18:10
	ADA	IST	18:40	20:00
	IST	DLM	20:30	21:35
	DLM	IST	22:05	23:15
7.ekip	IST	DIY	15:30	17:10
	DIY	IST	17:40	19:25
	IST	ANT	20:50	21:55
	ANT	IST	22:30	23:40
8.ekip	IST	TRB	09:35	11:05
	TRB	ANK	11:35	12:45
	ANK	IST	15:30	16:25
	IST	IZM	18:30	19:30
	IZM	IST	20:00	20:55
9.ekip	ANK	VAN	11:15	12:45
	VAN	ANK	13:25	15:00
10.ekip	IST	TRB	19:55	21:25
	TRB	IST	21:55	23:35
11.ekip	IST	BOD	07:25	08:30
	BOD	IST	09:00	10:10
	IST	ANT	12:20	13:25
	ANT	IST	13:55	15:00

8.8. Problemin Küme Kaplama Formülasyonu İle Çözümü

Havayolu ekip çizelgeleme problemi, tüm olası yasal ekip eşleştirmeleri oluşturularak bu eşleştirmeler arasından tüm uçuş seferlerinin en az bir kez kapsandığı minimum maliyetli ekip eşleştirmelerini seçmeye dayanan ve yukarıda açıklanan sütun oluşturma algoritmasının ana problemini oluşturan, bir küme kaplama modeli ile de çözülebilir. Burada ele alınan uçuş seferlerinin sayısı nispeten az olduğundan, mümkün olan tüm yasal eşleştirmeleri oluşturmak çok fazla zaman gerektirmemektedir. Ancak uluslararası faaliyet gösteren büyük havayolları için milyonlarca olası eşleştirmeyi oluşturmak oldukça zaman gerektirmektedir.

Çalışmada ele alınan havayolu şirketi için mümkün olan tüm olası eşleştirmelerin sayısı 110'dur.

Çizelge 8.5. Tüm 4' lü yasal eşleştirmeler

Eşleştirme	İçerdiği Uçuş Seferleri				Eşleştirme Maliyeti
1	1	2	9	12	290
2	1	2	17	18	290
3	3	5	1	2	363
4	3	5	8	11	414
5	3	5	8	12	495
6	3	5	9	12	495
7	3	5	17	18	480
8	3	35	36	6	270
9	3	39	40	5	290
10	3	39	40	6	290
11	3	5	26	28	396
12	3	5	29	31	465
13	3	5	29	32	492
14	3	5	30	32	492
15	4	5	1	2	318
16	4	5	8	11	369
17	4	5	8	12	450
18	4	5	9	12	450
19	4	5	17	18	435
20	4	5	26	28	351
21	4	6	8	11	369
22	4	6	8	12	450
23	4	6	9	12	450
24	4	6	17	18	435
25	4	6	26	28	351
26	4	35	36	6	270
27	4	5	29	31	420
28	4	5	29	32	447
29	4	5	29	42	462
30	4	5	30	32	447
31	4	5	30	42	462
32	4	6	29	31	420
33	4	6	29	32	447
34	4	6	29	42	462
35	4	6	30	32	447
36	4	6	30	42	462
37	7	10	1	2	285
38	7	10	8	11	327

Çizelge 8.5. (Devam) Tüm 4' lü yasal eşleştirmeler

39	7	10	8	12	408
40	7	10	14	16	265
41	7	10	19	21	335
42	7	10	26	28	309
43	7	10	29	31	378
44	7	10	29	32	405
45	7	10	29	42	420
46	7	10	30	32	405
47	7	10	30	42	420
48	13	15	4	5	324
49	13	15	4	6	351
50	13	15	7	10	273
51	13	15	20	21	432
52	13	15	20	22	408
53	13	15	23	24	310
54	14	16	8	11	265
55	14	16	8	12	294
56	14	16	9	12	294
57	14	16	17	18	279
58	14	16	29	31	320
59	14	16	29	32	325
60	14	16	29	42	320
61	14	16	30	32	325
62	14	16	30	42	320
63	19	21	9	12	340
64	19	21	17	18	340
65	19	21	30	42	390
66	20	21	9	12	340
67	20	21	17	18	340
68	20	21	30	42	390
69	20	22	9	12	340
70	20	22	17	18	340
71	20	22	29	31	390
72	20	22	29	42	390
73	20	22	30	42	390
74	23	24	1	2	336
75	23	24	8	11	387
76	23	24	8	12	468
77	23	24	14	16	310
78	23	24	19	21	380
79	23	24	20	21	380
80	23	24	20	22	380

Çizelge 8.5. (Devam) Tüm 4' lü yasal eşleştirmeler

81	23	24	26	28	369
82	25	27	3	5	342
83	25	27	4	5	342
84	25	27	4	6	369
85	25	27	7	10	291
86	25	27	23	24	280
87	41	38	33	21	354
88	41	38	33	22	345

Çizelge 8.6. Tüm 5' li yasal eşleştirmeler

Eşleştirme	İçerdiği Uçuş Seferleri					Eşleştirme Maliyeti
1	3	33	21	9	12	495
2	3	33	21	17	18	480
3	3	33	22	9	12	495
4	3	33	22	17	18	480
5	4	33	21	9	12	450
6	4	33	21	17	18	435
7	4	33	22	9	12	450
8	4	33	22	17	18	435
9	4	33	34	37	42	462
10	13	15	4	33	21	432
11	13	15	4	33	22	408
12	25	27	3	33	21	450
13	25	27	3	33	22	426
14	25	27	4	33	21	450
15	25	27	4	33	22	426
16	41	38	5	1	2	375
17	41	38	5	8	11	426
18	41	38	5	17	18	492
19	41	38	5	26	28	408
20	41	38	6	8	11	426
21	41	38	6	17	18	492
22	41	38	6	26	28	408

Çizelge 8.5 ve Çizelge 8.6'da havayolu için mümkün olan 110 adet yasal eşleştirme görülmektedir. Bu eşleştirmeler GAMS optimizasyon programı içerisinde yasal eşleştirme kısıt yapıları tanımlanarak elde edilmiştir. Bu modele ilişkin GAMS kodları EK-6'da sunulmuştur.

Sadece küme kaplama modeli kullanılarak tüm mümkün eşleştirmeler arasından seçilen eşleştirmelerin toplam maliyeti, sütun oluşturma algoritmasıyla 17 başlangıç eşleştirmesi kullanılarak elde edilen çözümle aynı değeri vermektedir. Çözüm süreleri açısından karşılaştırıldığında ise, problemin küme kaplama formülasyonu ile çözülmesinde, olası tüm 4'lü ve 5'li yasal eşleştirmeleri oluşturmak, Intel Core2Duo 2.20 GHz. işlemci ve 2 Gb Ram'e sahip bir bilgisayarda 14,30 dk. sürmektedir. Problem sütun oluşturma algoritması ile çözüldüğünde ise, sadece 17 adet başlangıç eşleştirmesi oluşturmak yeterli olduğu için, çözüm süresi oldukça kısalmaktadır.

9. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, günlük havayolu ekip çizelgeleme problemi, iç hatlarda 42 uçuş seferi olan özel bir havayolu şirketi için çözülmüştür. Problemin çözümü için, tüm yasal eşleştirmeleri oluşturmak yerine, 17 adet başlangıç eşleştirmesinin oluşturulduğu bir sütun oluşturma algoritması kullanılmıştır. Sütun oluşturma algoritmasında, ana problem bir küme kaplama problemi, alt problem ise bir en kısa yol problemi olarak formüle edilmiştir.

Sütun oluşturma algoritmasının ana problemi, alt problemi ve başlangıç eşleştirmeleri bütünlük olarak GAMS optimizasyon programında kodlanmış ve bu bütünlük model iteratif olarak çözülmüştür. Bu şekilde bir kodlama yapısı, algoritmanın uygulanabilirliği açısından oldukça büyük yarar sağlamaktadır. Problem sütun oluşturma algoritması ile çözüldüğünde, sadece uygun bir çözüm sağlayacak sayıda başlangıç eşleştirmesi oluşturmak yeterli olduğu için, çözüm süresi oldukça kısalmıştır. Bu sayede, ele alınan havayolu şirketinde mevcut durumda manuel olarak yapılan ve işgücü-saat açısından fazla kaynak kullanımına neden olan ekip çizelgeleme sürecinde bir iyileşme sağlanmıştır.

Sütun oluşturma algoritması ile alt problem negatif olmayan bir amaç değeri (indirgenmiş maliyetli eşleştirme) üretene kadar, alt problem ve ana problem iteratif olarak çözülmüştür. Her iterasyonda ana problemde alt probleme uçuş seferlerine ilişkin dual değerler gönderilmiş, bu değerler alt problemin amaç fonksiyonunda minimum negatif indirgenmiş maliyetli eşleştirmenin bulunmasında kullanılmıştır. Başlangıç çözümü için belirlenen 17 eşleştirme ile maliyet 5309 olarak elde edilmiştir. 13 iterasyon sonucunda optimal maliyet değeri olan 3593 değerine ulaşılmıştır.

Ekip çizelgeleme probleminde elde edilen çözümün optimal olup olmadığını test etmek için olası tüm ekip eşleştirmeleri oluşturularak küme kaplama problemi ile çözülmüştür. Tüm olası yasal eşleştirmelerin sayısı 110 olup elde edilen amaç

fonksiyonu değeri, sütun oluşturma algoritması ile elde edilen 3593 değerini vermektedir.

Çalışmada ele alınan havayolu şirketi mevcut durumda ekip çizelgelerini manuel olarak hazırlamaktadır. Bu nedenle bu konuda görevli personelin oluşturduğu ekip çizelgeleri sezgisel olup, optimallikten uzaktır. Çalışmada kullanılan sütun oluşturma algoritmasıyla, ele alınan havayolu şirketinin ekip çizelgeleri, GAMS optimizasyon programı aracılığıyla çok kısa sürede oluşturulmuştur.

Buradaki uygulama nisbeten küçük çaplı olduğundan çözümün optimalliğini test etmek için tüm ekip eşleştirmeleri oluşturulabilmiştir. Ancak havayolları için tüm ekip eşleştirmelerini oluşturmak bazen imkânsız olabilmektedir. Çünkü yüzlerce uçuş seferine sahip uluslararası bir havayolu için milyonlarca olası eşleştirme vardır. Bu çalışmada havayolu ekip çizelgeleme problemini sütun oluşturma algoritması ile çözerek, tüm eşleştirmeleri oluşturmaya gerek kalmadan optimal çizelgelere ulaşılmıştır.

Böylece optimal çözümde yer almayacak değişkenlerin gereksiz yere oluşturularak hesaplama karmaşıklığına sebep olması önlenmiştir. Bu örnek için, sütun oluşturma algoritmasının kullanımı, değişken sayısını %84 azaltmıştır. Bu azalma özellikle büyük çaplı havayolu şirketleri için bir avantaj sağlayacaktır.

Sonuç olarak, havayolu şirketi için optimal ekip eşleştirmeleri oluşturulmuş ve etkin bir ekip çizelgesi elde edilmiştir. Oluşturulan her ekip eşleştirmesine bir ekip atanacağından, bu uçuş seferlerini gerçekleştirebilmesi için havayolunun toplam 11 adet uçuş ekibine ihtiyacı olduğu belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Adachi, N., Kobayashi, S., “Crew Roster Scheduling by The Extended Cooperative Genetic Algorithm” , ***Electronics and Communications in Japan Part Iii-Fundamental Electronic Science***, 87 (10): 44-53 (2004).
2. Alefragis, P., Goumopoulos, C., Housos, E., et al., “Parallel Crew Scheduling in PAROS” , ***Lecture Notes in Computer Science***, 1470: 1104-1113 (1998).
3. Alefragis, P., Sanders, P., Takkula, T., Et Al., “Parallel Integer Optimization for Crew Scheduling” , ***Annals of Operations Research***, 99: 141-166 (2000).
4. Anbil, R., Forrest, J. J., Pulleyblank, W. R., “Column Generation and The Airline Crew Pairing Problem” , ***Documenta Mathematica- Extra Volume ICM*** (3): 677-686 (1998).
5. Ball, M., Roberts, A ., “A Graph Partitioning Approach to Airline Crew Scheduling” , ***Transportation Science***, 19 (2): 107-126 (1985).
6. Barnhart, C., Johnson, E., Nemhauser, G. L., Savelsbergh, M. W. P., Vance, P., “Branch-and-Price: Column Generation for Solving Huge Integer Programs” , ***Operations Research***, 46 (3): 316-329 (1998).
7. Barnhart, C., Hatay, L., Johnson, E. L., “Deadhead Selection for The Long-Haul Crew Pairing Problem” , ***Operations Research***, 43 (3): 491-499 (1995).
8. Barnhart, C., Shenoi, R. G., “An Approximate Model and Solution Approach for The Long-Haul Crew Pairing Problem” , ***Transportation Science***, 32 (3): 221-231 (1998).
9. Beasley, J. E., Cao, B., “A Tree Search Algorithm for The Crew Scheduling Problem” , ***European Journal of Operational Research***, 94 (3): 517-526 (1996).
10. Beasley, J. E., Cao, B., “A Dynamic Programming Based Algorithm for The Crew Scheduling Problem” , ***Computers & Operations Research***, 25 (7-8): 567-582 (1998).
11. Borndörfer, R., Schelten, U., Schlechte, T., Weider, S., “A Column Generation Approach to Airline Crew Scheduling” , ***ZIB Report***, Berlin, Germany, 5-37 (2005).
12. Carraresi, P., Gallo, G., “Network Models for Vehicle and Crew Scheduling” , ***European Journal of Operational Research***, 16 (2): 139-151 (1984).
13. Cavique, I., Rego, C., Themido, I., “Subgraph Ejection Chains and Tabu Search for The Crew Scheduling Problem” , ***Journal of The Operational Research Society***, 50 (6): 608-616 (1999).

14. Chu, H., Gelman, E., Johnson, E., L., "Solving Large Scale Crew Scheduling Problem", *European Journal of Operational Research*, 97 (2): 260-268 (1997).
15. Cordeau, J.F., Stojkovic, G., Soumis, F., Et Al., "Benders Decomposition for Simultaneous Aircraft Routing and Crew Scheduling", *Transportation Science*, 35 (4): 375-388 (2001).
16. Crainic, T. G., Rousseau, J. M., "The Column Generation Principle and The Airline Crew Scheduling Problem", *INFOR*, 25 (2): 136-151 (1987).
17. Crawford, B., Castro, C., Monfroy, E., "A Hybrid Ant Algorithm for The Airline Crew Pairing Problem", *Lecture Notes in Computer Science*, 4293: 381-391 (2006).
18. Demasse, S., Pesant, G., Rousseau, L. M., "A Cost-Regular Based Hybrid Column Generation Approach", *Constraints*, 11 (4): 315-333 (2006).
19. Desaulniers, G., Desrosiers, J., Dumas, Y., Solomon, M. M., Soumis, F., "Daily Aircraft Routing and Scheduling", *Management Science*, 43(6): 841-855 (1997/a).
20. Desaulniers, G., Desrosiers, J., Dumas, Y., et al. "Crew Pairing at Air France", *European Journal of Operational Research*, 97 (2): 245-259 (1997/b).
21. Desaulniers, G., "Managing Large Fixed Costs in Vehicle Routing and Crew Scheduling Problems Solved by Column Generation", *Computers & Operations Research*, 34 (4): 1221-1239 (2007).
22. Desrochers, M., Soumis, F., "A Column Generation Approach to The Urban Transit Crew Scheduling Problem", *Transportation Science*, 23 (1): 1-14 (1989).
23. Desrosiers, J., Soumis, F., Desrochers, M., "Routing with Time Windows by Column Generation", *Networks*, 14: 545-565 (1984).
24. Emden-Weinert, T., Proksch, M., "Best Practice Simulated Annealing for The Airline Crew Scheduling Problem", *Journal of Heuristics*, 5 (4): 419-436 (1999).
25. Ernst, A. T., Jiang, H., Krishnamoorthy, M., Sier D., "Staff Scheduling and Rostering: A Review of Applications, Methods and Models", *European Journal of Operational Research*, 153: 3-27 (2004).
26. Freling, R., Wagelmans, A. P. M., Paixao, J. M. P., "An Overview of Models and Techniques for Integrating Vehicle and Crew Scheduling", *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, 471: 441-460 (1999).

27. Friberg, C., Haase, K., “An Exact Branch and Cut Algorithm for The Vehicle and Crew Scheduling Problem” , *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, 471: 63-80 (1999).
28. Gamache, M., Hertz, A., Ouellet, J. O., “A Graph Coloring Model for A Feasibility Problem in Monthly Crew Scheduling with Preferential Bidding”, *Computers & Operations Research*, 34 (8): 2384-2395 (2007).
29. Gopalakrishnan, B., Johnson, E. L., “Airline Crew Scheduling: State-of-The-Art”, *Annals of Operations Research*, 140 (1): 305-337 (2005).
30. Gopalan, R., Talluri, K. T., “Mathematical Models in Airline Schedule Planning: A Survey”, *Annals of Operations Research*, 76: 155-185 (1998).
31. Guo, Y. F., Mellouli, T., Suhl, L., et al. “A Partially Integrated Airline Crew Scheduling Approach with Time-Dependent Crew Capacities and Multiple Home Bases”, *European Journal of Operational Research*, 171 (3): 1169-1181 (2006).
32. Gustafsson, T., “A Heuristic Approach to Column Generation for Airline Crew Scheduling”, *Licentiate thesis*, Chalmers University of Technology and Göteborg University, S-412 96 Göteborg, Sweden (1999).
33. Hoffman, K.L., Padberg, M., “Solving Airline Crew Scheduling Problems by Branch-and-Cut” , *Management Science*, 39 (6): 657-682 (1993).
34. Housos, E., Elmroth, T., “Automatic Optimization of Subproblems in Scheduling Airline Crews”, *Interfaces*, 27: 68-77 (1997).
35. Junker, U., Karisch, S., Kohl, N., Vaaben, B., Fable, T., Sellmann, M., “A Framework for Constraint Programming Based Column Generation” , *5th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming CP'99*, Jaffar, J., Alexandria, VA, USA, 261-275 (1999).
36. Kallehauge, B., Larsen, J., Madsen, O. B. G., Solomon, M., “Vehicle Routing Problem with Time Windows”, Column Generation, Desaulniers, G., Desrosiers, J., Solomon, M. M., *Springer*, Newyork, 67-95 (2005).
37. Klabjan, D., “Large Scale Models in The Airline Industry”, Column Generation, Desaulniers, G., Desrosiers, J., Solomon, M., *Springer*, Newyork, 163-187 (2005).
38. Klabjan, D., Johnson, E. L., Nemhauser, G. L., et al., “Airline Crew Scheduling with Regularity”, *Transportation Science*, 35 (4): 359-374 (2001/a).
39. Klabjan, D., Johnson, E. L., Nemhauser, G. L., et al., “Solving Large Airline Crew Scheduling Problems: Random Pairing Generation and Strong Branching”, *Computational Optimization and Applications*, 20 (1): 73-91 (2001/b).

40. Klabjan, D., Johnson, E. L., Nemhauser, G. L., Et Al., "Airline Crew Scheduling with Time Windows and Plane-Count Constraints", ***Transportation Science***, 36 (3): 337-348 (2002).
41. Klineciewicz, J. G., Rosenwein, M. B., " The Airline Exception Scheduling Problem", ***Transportation Science***, 29(1): 4-16 (1995).
42. Kornilakis, H., Stamatopoulos, P., "Crew Pairing Optimization with Genetic Algorithms" , ***Lecture Notes in Artificial Intelligence***, 2308: 109-120 (2002).
43. Lagerholm, M., Peterson, C., Soderberg, B., "Airline Crew Scheduling Using Potts Mean Field Techniques" , ***European Journal of Operational Research***, 120 (1): 81-96 (2000).
44. Lagerholm M., Peterson, C., Soderberg, B., "Airline Crew Scheduling with Potts Neurons" , ***Neural Computation***, 9 (7): 1589-1599 (1997).
45. Lavoie, S., Minoux, M., Odier, E., "A New Approach for Crew Pairing Problems by Column Generation with An Application to Air Transportation" , ***European Journal of Operational Research***, 35 (1): 45-58 (1988).
46. Lettovsky, L., Johnson, E. L., Nemhauser, G. L., "Airline Crew Recovery", ***Transportation Science***, 34 (4): 337-348 (2000).
47. Levine, D., "Application of A Hybrid Genetic Algorithm to Airline Crew Scheduling" , ***Computers & Operations Research***, 23 (6): 547-558 (1996).
48. Lübbecke, M., Desrosiers, J., "Selected Topics in Column Generation" , ***Operations Research***, 53(6): 1007-1023 (2005).
49. Makri, A., Klabjan, D., "A New Pricing Scheme for Airline Crew Scheduling", ***Infirms Journal on Computing***, 16 (1): 56-67 (2004).
50. Mercier, A., Cordeau, J.F., Soumis, F., "A Computational Study of Benders Decomposition for The Integrated Aircraft Routing and Crew Scheduling Problem" , ***Computers & Operations Research***, 32 (6): 1451-1476 (2005).
51. Mingozi, A., Boschetti, M. A., Ricciardelli, S., Et Al., "A Set Partitioning Approach to The Crew Scheduling Problem" , ***Operations Research***, 47 (6): 873-888 (1999).
52. Minoux, M., "Column Generation Techniques in Combinatorial Optimisation, A New Application to Crew-Pairing Problems" , ***Proceedings XXIVth AGIFORS Symposium***, Strasbourg, France, (1984).
53. Ozdemir, H. T., Mohan, C. K., "Flight Graph Based Genetic Algorithm for Crew Scheduling in Airlines" , ***Information Sciences***, 133 (3-4): 165-173 (2001).

54. Park, T., Ryu, K. R., “Crew Pairing Optimization by A Genetic Algorithm with Unexpressed Genes” , ***Journal of Intelligent Manufacturing***, 17 (4): 375-383 (2006/a).
55. Park, T., Ryu, K. R., “Solving A Large-Scaled Crew Pairing Problem by Using A Genetic Algorithm” , ***Lecture Notes in Computer Science***, 4031: 228-237 (2006/b).
56. Pinedo, M., “Workforce Scheduling”, Operations Scheduling with Applications in Manufacturing and Services, ***Mcgraw-Hill***, Singapur, 186-207 (1999).
57. Schaefer, A. J., Johnson, E. L., Kleywegt, A. J., et al., “Airline Crew Scheduling Under Uncertainty”, ***Transportation Science***, 39 (3): 340-348 (2005).
58. Tran, V. H., Reinelt, G., Bock, H. G., “Box Step Methods for Crew Pairing Problems” , ***Optimization and Engineering***, 7 (1): 33-46 (2006).
59. Vance, P.H., Barnhart, C, Johnson, E.L., Et Al., “Airline Crew Scheduling: A New Formulation and Decomposition Algorithm” , ***Operations Research***, 45 (2): 188-200 (1997).
60. Vanderbeck, F., Savelsbergh, M. W. P., “A Generic View of Dantzig-Wolfe Decomposition in Mixed Integer Programming”, ***Operations Research Letters***, 34: 296-306 (2006).
61. Winston, W. L., “Using Column Generation to Solve Large-Scale LPs”, Operations Research: Applications and Algorithms, 3rd edition, ***Duxbury Press***, Belmont, California, 570-574 (1994).
62. Xu, J., Sohoni, M., McCleery, M., Bailey, T. G., “A Dynamic Neighborhood Based Tabu Search Algorithm for Real-World Flight Instructor Scheduling Problems”, ***European Journal of Operational Research***, 169: 978–993 (2006).
63. Yan, S., Chang, J., “Airline Cocpit Crew Scheduling”, ***European Journal of Operatioal Research***, 136: 501-511 (2002).
64. Yan, S. Y., Tu, Y. P., “A Network Model for Airline Cabin Crew Scheduling” , ***European Journal of Operational Research***, 140 (3): 531-540 (2002).
65. Yen, J. W., Birge, J. R., “A Stochastic Programming Approach to The Airline Crew Scheduling Problem” , ***Transportation Science***, 40 (1): 3-14 (2006).

EKLER

EK-1 Literatür araştırması

YÖNTEM	YAZARLAR
Şebeke Yöntemi	• Carraresi, P., Gallo, G., 1984. • Ball, M., Roberts, A., 1985. • Yan, S. Y., Tu, Y. P., 2002. • Gamache, M., Hertz, A., Ouellet, J. O., 2007.
Stokastik Programlama	• Yen, J. W., Birge, J. R., 2006.
Genetik Algoritma	• Levine, D., 1996. • Ozdemir, H. T., Mohan, C. K., 2001. • Kornilakis, H., Stamatopoulos, P., 2002. • Adachi, N., Kobayashi, S., 2004. • Park, T., Ryu, K. R., 2006. • Park, T., Ryu, K. R., 2006.
Karınca Kolonisi Algoritması	• Crawford, B., Castro, C., Monfroy, E., 2006.
Tabu Arama Algoritması	• Cavique, I., Rego, C., Themido, I., 1999. • Xu, J., Sohoni, M., McCleery, M., Bailey, T. G., 2006.
Tavlama Benzetimi Yöntemi	• Emden-Weinert, T., Proksch, M., 1999.
Sütun Oluşturma Algoritması	• Desrosiers, J., Soumis, F., Desrochers, M., 1984. • Crainic, T. G., Rousseau, J. M., 1987. • Desrochers, M., Soumis, F., 1989. • Lavoie, S., Minoux, M., Odier, E., 1988. • Housos, E., Elmroth, T., 1997. • Desaulniers, G., Desrosiers, J., Dumas, Y., Solomon, M. M., Soumis, F., 1997. • Anbil, R., Forrest, J. J., Pulleyblank, W. R., 1998. • Barnhart, C., Johnson, E., Nemhauser, G. L., Savelsbergh, M. W. P., Vance, P., 1998. • Junker, U., Karisch, S., Kohl, N., Vaaben, B., Fable, T., Sellmann, M., 1999. • Gustafsson, T., 1999. • Klabjan, D., Johnson, E. L., Nemhauser, G. L., ve ark., 2001. • Klabjan, D., Johnson, E. L., Nemhauser, G. L., ve ark., 2002. • Yan, S., Chang, J., 2002. • Makri, A., Klabjan, D., 2004. • Borndörfer, R., Schelten, U., Schlechte, T., Weider, S., 2005. • Lübbecke, M., Desrosiers, J., 2005. • Demasse, S., Pesant, G., Rousseau, L. M., 2006. • Desaulniers, G., 2007.
Ayrıştırma Algoritmaları	• Vance, P.H., Barnhart, C., Johnson, E.L., Et Al., 1997. • Desaulniers, G., Desrosiers, J., Dumas, Y., ve ark., 1997. • Cordeau, J.F., Stojkovic, G., Soumis, F., ve ark., 2001. • Mercier, A., Cordeau, J.F., Soumis, F., 2005. • Vanderbeck, F., Savelsbergh, M. W. P., 2006.

EK-1 (Devam) Literatür araştırması

Tamsayılı Programlama Teknikleri	• Hoffman, K.L., Padberg, M., 1993. • Chu, H., Gelman, E., Johnson, E., L., 1997. • Friberg, C., Haase, K., 1999. • Mingozi, A., Boschetti, M. A., Ricciardelli, S., ve ark., 1999. • Alefragis, P., Sanders, P., Takkula, T., ve ark., 2000.
Box-Step Yöntemleri	• Tran, V. H., Reinelt, G., Bock, H. G., 2006.
Paralleştirme Algoritmaları	• Alefragis, P., Goumopoulos, C., Housos, E., ve ark., 1998.
Yapay Zeka Teknikleri	• Lagerholm M., Peterson, C., Soderberg, B., 1997. • Lagerholm, M., Peterson, C., Soderberg, B., 2000.
Diğer Çalışmalar	• Barnhart, C., Hatay, L., Johnson, E. L., 1995. • Klineciewicz, J. G., Rosenwein, M. B., 1995. • Beasley, J. E., Cao, B., 1996. • Barnhart, C., Sheno, R. G., 1998. • Gopalan, R., Talluri, K. T., 1998. • Beasley, J. E., Cao, B., 1998. • Freling, R., Wagelmans, A. P. M., Paixao, J. M. P., 1999. • Letovsky, L., Johnson, E. L., Nemhauser, G. L., 2000. • Klabjan, D., Johnson, E. L., Nemhauser, G. L., ve ark., 2001. • Ernst, A. T., Jiang, H., Krishnamoorthy, M., Sier D., 2004. • Schaefer, A. J., Johnson, E. L., Kleywegt, A. J., et al., 2005. • Gopalakrishnan, B., Johnson, E. L., 2005. • Guo, Y. F., Mellouli, T., Suhl, L., ve ark., 2006.

EK-2 Sütun oluşturma algoritmasına ilişkin GAMS kodları

```
sets
n all nodes /0*43/
i(n) fly nodes /1*42/
begin(n) dummy begin node /0/
last(n) dummy last node /43/
esl eslestirme /1*1000/
kesl(esl) alt eslestirme /1*42/;
alias (n,nn);
alias(i,j,k);
alias(esl,itr);
acronyms ADA,ANK,ANT,BOD,DIY,DLM,ERZ,GZT,IST,IZM,TRB,VAN;
```

```
parameters kalkis(n)
/
```

1	1015
2	1120
3	595
4	670
5	930
6	975
7	740
8	1125
9	1250
10	835
11	1220
12	1350
13	445
14	930
15	540
16	1025
17	1230
18	1325
19	930
20	890
21	1060
22	1020
23	640
24	755
25	415
26	1110
27	505
28	1200
29	1155
30	1195

EK-2 (Devam) Sütun oluşturma algoritmasına ilişkin GAMS kodları

```
31    1275
32    1315
33    810
34    935
35    750
36    860
37    1250
38    695
39    675
40    805
41    575
42    1345
/
```

```
parameters varis(n)
```

```
/
1    1090
2    1200
3    645
4    720
5    985
6    1030
7    805
8    1190
9    1315
10   900
11   1285
12   1420
13   510
14   995
15   610
16   1095
17   1295
18   1395
19   1030
20   990
21   1165
22   1125
23   725
24   845
25   465
26   1170
27   560
28   1255
```

EK-2 (Devam) Sütun oluşturma algoritmasına ilişkin GAMS kodları

```

29      1245
30      1285
31      1370
32      1415
33      890
34      1015
35      830
36      945
37      1315
38      765
39      765
40      900
41      665
42      1440
/;

```

parameters SehirKalk(n)

```

/
1      IST
2      ADA
3      IST
4      IST
5      ANK
6      ANK
7      IST
8      IST
9      IST
10     ANT
11     ANT
12     ANT
13     IST
14     IST
15     BOD
16     BOD
17     IST
18     DLM
19     IST
20     IST
21     DIY
22     DIY
23     IST
24     GZT
25     IST
26     IST

```

EK-2 (Devam) Sütun oluşturma algoritmasına ilişkin GAMS kodları

```

27    IZM
28    IZM
29    IST
30    IST
31    TRB
32    TRB
33    ANK
34    DIY
35    ANK
36    ERZ
37    ANK
38    TRB
39    ANK
40    VAN
41    IST
42    TRB
/;

```

parameter SehirVar(n)

```

/
1    ADA
2    IST
3    ANK
4    ANK
5    IST
6    IST
7    ANT
8    ANT
9    ANT
10   IST
11   IST
12   IST
13   BOD
14   BOD
15   IST
16   IST
17   DLM
18   IST
19   DIY
20   DIY
21   IST
22   IST
23   GZT
24   IST

```

EK-2 (Devam) Sütun oluşturma algoritmasına ilişkin GAMS kodları

```

25    IZM
26    IZM
27    IST
28    IST
29    TRB
30    TRB
31    IST
32    IST
33    DIY
34    ANK
35    ERZ
36    ANK
37    TRB
38    ANK
39    VAN
40    ANK
41    TRB
42    IST
/;

```

```

parameter link(n,nn), flytime(n), resttime(n,nn);
flytime(i)= varis(i)-kalkis(i);
resttime(i,j)=kalkis(j)-varis(i);

```

```

link(n,'0')=0;
link('43',n)=0;
link('0',n)$(SehirKalk(n)=IST)=1;
link(n,'43')$(SehirVar(n)=IST)=1;
link(i,j)$((ord(i)<>ord(j)) and (SehirVar(i)=SehirKalk(j)) and (resttime(i,j)>=30) and
(resttime(i,j)<=300))=1;

```

```

variables FOBJFUNC;
binary variables FX(n,nn,k);
positive variables M;
FX.fx(n,nn,k)$(link(n,nn)=0)=0;

```

equations

FOBJ

FCONST1a her j düğümüne giren en az 1 ark olmalı

FCONST1b her j düğümünden çıkan en az 1 ark olmalı

FCONST1c toplam M kadar yol (eşleştirme) seçilmeli

FCONST1d toplam M kadar yol (eşleştirme) seçilmeli

EK-2 (Devam) Sütun oluşturma algoritmasına ilişkin GAMS kodları

FCONST2 tüm eşleştirmelerdeki her uçuş seferi (düğüm) için giren arklar çıkanlara eşit olmalı

FCONST3 her eşleştirme için toplam uçuş süresi kısıtı

FCONST4 her eşleştirme için toplam görev süresi kısıtı

FCONST5 her eşleştirme en fazla 5 uçuş seferi içerebilir

FCONST6 her eşleştirme en az 4 uçuş seferi içerebilir

;

FOBJ.. FOBJFUNC =E=M;

FCONST1a(J).. sum((N,K),FX(N,J,K))=G=1;

FCONST1b(J).. sum((N,K),FX(J,N,K))=G=1;

FCONST1c.. sum((J,K),FX('0',J,K))=E=M;

FCONST1d.. sum((I,K),FX(I,'43',K))=E=M;

FCONST2(J,K).. sum(N,FX(N,J,K)-FX(J,N,K))=E=0;

FCONST3(K).. sum((i,n),flytime(i)*FX(i,n,K))=L=390;

FCONST4(K).. sum((i,n),(flytime(i)+resttime(i,n))*FX(i,n,k))=L=840;

FCONST5(K).. sum((i,n),FX(i,n,k))=L=5;

FCONST6(K).. sum((i,n),FX(i,n,k))=G=4;

MODEL FeasSol

/FOBJ,FCONST1a,FCONST1b,FCONST1c,FCONST1d,FCONST2,FCONST3,FCO
NST4,FCONST5,FCONST6/;

FeasSol.optfile=1;

FeasSol.limrow=10000;

FeasSol.limcol=10000;

FeasSol.optcr=0;

SOLVE FeasSol USING MIP MINIMIZING FOBJFUNC;

display FX.l;

PARAMETER goonout, goonin, a(j,esl), cost(esl), V1(k), V2(k), Vall(k);

V1(k)=0.6*sum((n,nn),(flytime(n)+resttime(n,nn))*FX.l(n,nn,k));

V2(k)=sum((n,nn),flytime(n)*FX.l(n,nn,k));

Vall(k)\$(V1(k)>0 and V2(k)>0)=max(V1(k),V2(k),120);

goonout=1;

loop(kesl \$ (goonout=1),

goonin=1;

loop(k \$ (goonin=1),

EK-2 (Devam) Sütun oluşturma algoritmasına ilişkin GAMS kodları

```

if(sum((j,n),FX.l(j,n,k))>0,
    a(j,kesl)$ (sum(n,FX.l(j,n,k))=1)=1;
    cost(kesl)=Vall(k);
    FX.l(j,n,k)=0;
    goonin=0;
);
);
display a, cost, Vall;

*Ana Problem için gerekli tanımlamalar
VARIABLE MOBJFUNC;
BINARY VARIABLE MX(esl);

equations
MOBJ
MCONST
;

MOBJ..      MOBJFUNC =E=sum(esl,cost(esl)*MX(esl));
MCONST(j).. sum (esl ,a(j,esl)*MX(esl))=G=1;

MODEL Master /MOBJ,MCONST/;
Master.limrow=10000;
Master.limcol=10000;
Master.optcr=0;

*Alt Problem için gerekli tanımlamalar
PARAMETER DualVal(j);
DualVal(j)=0;

VARIABLE AOBJFUNC;
BINARY VARIABLE AX(n,nn);
POSITIVE VARIABLE AV;

AV.up=sum((i,j)$ (link(i,j)=1), flytime(i)+resttime(i,j));
AX.fx(n,nn)$ (link(n,nn)=0)=0;

*display link, V.up, flytime,resttime;

equations
AOBJ

```

EK-2 (Devam) Sütun oluşturma algoritmasına ilişkin GAMS kodları

```

ACONST1
ACONST2
ACONST3
ACONST4
ACONST5
ACONST6
ACONST7
ACONST8
ACONST9
ACONST10
;

```

```

AOBJ..          AOBJFUNC=E= AV - sum((j,n), DualVal(j)*AX(j,n));
ACONST1..       AV=G=0.6*sum((i,n),(flytime(i)+resttime(i,n))*AX(i,n));
ACONST2..       AV=G=sum((i,n),flytime(i)*AX(i,n));
ACONST3..       AV=G=120;
ACONST4(i)..    sum(n,AX(i,n))=E=sum(n,AX(n,i));
ACONST5..       sum(j,AX('0',j))=E=1;
ACONST6..       sum(i,AX(i,'43'))=E=1;
ACONST7..       sum((i,n),flytime(i)*AX(i,n))=L=390;
ACONST8..       sum((i,n),(flytime(i)+resttime(i,n))*AX(i,n))=L=840;
ACONST9..       sum((i,n),AX(i,n))=L=5;
ACONST10..      sum((i,n),AX(i,n))=G=4;

```

```

MODEL SubProblem
/AOBJ,ACONST1,ACONST2,ACONST3,ACONST4,ACONST5,ACONST6,ACONST7,ACONST8,ACONST9,ACONST10/;

```

```

SubProblem.optfile=1;
SubProblem.limrow=10000;
SubProblem.limcol=10000;
SubProblem.optcr=0;

```

```

parameter AltPrbCost, BestMCost, inneriter, Results(itr);
AltPrbCost=-100;
BestMCost=1e9;
inneriter=0;

```

```

loop(itr $(AltPrbCost<-0.01) and (inneriter<20)),
    if(cost(itr)=0,
        MX.lo(esl)=0;
        MX.up(esl)=1;
        MX.fx(esl)$(cost(esl)=0)=0;
        SOLVE Master USING RMIP MINIMIZING MOBJFUNC;
    )

```

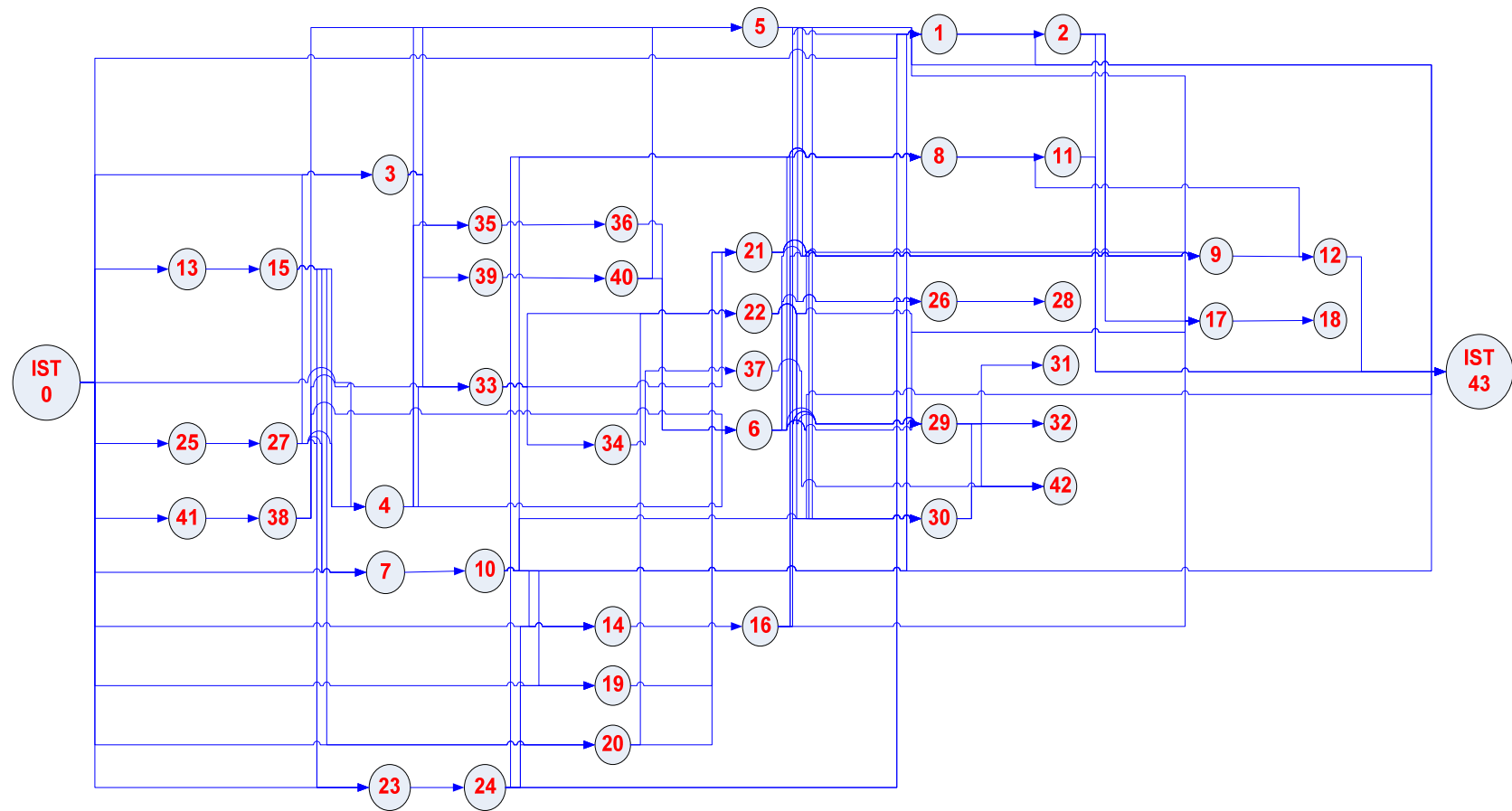
EK-2 (Devam) Sütun oluşturma algoritmasına ilişkin GAMS kodları

```

DualVal(j)=MCONST.M(j);
SOLVE SubProblem USING MIP MINIMIZING AOBJFUNC;
cost(itr)=AV.l;
    AltPrbCost=AOBJFUNC.l;
    a(j,itr)$(SUM(n,AX.l(j,n))=1)=1;
    Results(itr)=MOBJFUNC.l;
    if(MOBJFUNC.l<BestMCost,
inneriter=0;
    else
        inneriter=inneriter+1;
    )
);
display Results, a, cost;
SOLVE Master USING MIP MINIMIZING MOBJFUNC;

```

EK-3 Şebeke yapısı



EK-4 Ana problemin 17 adet başlangıç eşleştirmesi ile çözümünü gösteren GAMS optimizasyon programı çıktıları

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL		
---- VAR FOBJFUNC	-INF	17.000	+INF	.		
---- 249 VARIABLE FX.L						
	1	2	3	4	5	6
0.3					1.000	1.000
0.4			1.000	1.000		
0.19	1.000					
0.23		1.000				
3.5						1.000
3.35					1.000	
4.33			1.000	1.000		
5.8						1.000
6.43					1.000	
8.11						1.000
9.12	1.000					
11.43						1.000
12.43	1.000					
17.18				1.000		
18.43				1.000		
19.21	1.000					
21.9	1.000					
21.17				1.000		
23.24		1.000				
24.26		1.000				
26.28		1.000				
28.43		1.000				
33.21				1.000		
33.34			1.000			
34.37			1.000			
35.36					1.000	
36.6					1.000	
37.42			1.000			
42.43			1.000			
+	7	8	9	10	11	12
0.1		1.000				
0.3						1.000
0.7			1.000			

EK-4 (Devam) Ana problemin 17 adet başlangıç eşleştirmesi ile çözümünü gösteren GAMS optimizasyon programı çıktıları

0 .20				1.000	
0 .41	1.000				1.000
1 .2		1.000			
2 .9		1.000			
3 .35					1.000
6 .43					1.000
7 .10			1.000		
9 .12		1.000			
10.29			1.000		
12.43		1.000			
20.22			1.000		
21.43					1.000
22.29			1.000		
22.43	1.000				
29.31			1.000		
29.32			1.000		
31.43			1.000		
32.43			1.000		
33.21					1.000
33.22	1.000				
35.36					1.000
36.6					1.000
38.33	1.000				1.000
41.38	1.000				1.000
+	13	14	15	16	17
0 .3	1.000				
0 .13			1.000		
0 .14				1.000	
0 .20		1.000			
0 .25					1.000
3 .5					1.000
3 .39	1.000				
5 .43					1.000
6 .43	1.000				
7 .10			1.000		
8 .12				1.000	
10.43			1.000		
12.43				1.000	
13.15			1.000		
14.16				1.000	
15.7			1.000		

EK-4 (Devam) Ana problemin 17 adet başlangıç eşleştirmesi ile çözümünü gösteren GAMS optimizasyon programı çıktıları

16.8		1.000
20.21	1.000	
21.30	1.000	
25.27		1.000
27.3		1.000
30.42	1.000	
39.40	1.000	
40.6	1.000	
42.43	1.000	

---- 273 PARAMETER a

	1	2	3	4	5	6
3					1.000	1.000
4			1.000	1.000		
5						1.000
6					1.000	
8						1.000
9	1.000					
11						1.000
12	1.000					
17				1.000		
18				1.000		
19	1.000					
21	1.000			1.000		
23		1.000				
24		1.000				
26		1.000				
28		1.000				
33			1.000	1.000		
34			1.000			
35					1.000	
36					1.000	
37			1.000			
42			1.000			
+	7	8	9	10	11	12
1		1.000				
2		1.000				
3						1.000

EK-4 (Devam) Ana problemin 17 adet başlangıç eşleştirmesi ile çözümünü gösteren
GAMS optimizasyon programı çıktıları

6					1.000
7			1.000		
9		1.000			
10			1.000		
12		1.000			
20				1.000	
21					1.000
22	1.000			1.000	
29			1.000	1.000	
31				1.000	
32			1.000		
33	1.000				1.000
35					1.000
36					1.000
38	1.000				1.000
41	1.000				1.000
+	13	14	15	16	17
3	1.000				1.000
5					1.000
6	1.000				
7			1.000		
8				1.000	
10			1.000		
12				1.000	
13			1.000		
14				1.000	
15			1.000		
16				1.000	
20		1.000			
21		1.000			
25				1.000	
27				1.000	
30		1.000			
39	1.000				
40	1.000				
42		1.000			

---- 273 PARAMETER cost

1 340.000, 2 369.000, 3 462.000, 4 435.000, 5 270.000

EK-4 (Devam) Ana problemin 17 adet başlangıç eşleştirmesi ile çözümünü gösteren
GAMS optimizasyon programı çıktıları

6 414.000, 7 345.000, 8 290.000, 9 405.000, 10 390.000
11 354.000, 12 270.000, 13 290.000, 14 390.000, 15 273.000
16 294.000, 17 342.000

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
---- VAR M	.	17.000	+INF	.

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

GAMS Rev 148 x86/MS Windows 05/07/08 13:28:18 Page 6
General Algebraic Modeling System Execution

EK-5 Ana problemin 44 eşleştirme ile optimal çözümünü gösteren GAMS optimizasyon programı çıktıları

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
---- VAR MOBJFUNC	-INF	3593.000	+INF	.

---- VAR MX

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
1	.	1.000	340.000	
2	.	1.000	369.000	
3	1.000	1.000	462.000	
4	.	1.000	435.000	
5	.	1.000	270.000	
6	.	1.000	414.000	
7	.	1.000	345.000	
8	1.000	1.000	290.000	
9	.	1.000	405.000	
10	1.000	1.000	390.000	
11	.	1.000	354.000	
12	1.000	1.000	270.000	
13	.	1.000	290.000	
14	.	1.000	390.000	
15	1.000	1.000	273.000	
16	.	1.000	294.000	
17	.	1.000	342.000	
18	1.000	1.000	325.000	
19	.	1.000	325.000	
20	.	1.000	290.000	
21	.	1.000	290.000	
22	1.000	1.000	280.000	
23	.	1.000	426.000	
24	1.000	1.000	408.000	
25	1.000	1.000	340.000	
26	.	1.000	432.000	
27	.	1.000	327.000	
28	.	1.000	320.000	
29	.	1.000	265.000	
30	.	1.000	390.000	
31	1.000	1.000	290.000	
32	.	1.000	390.000	
33	.	1.000	273.000	
34	.	1.000	408.000	
35	.	1.000	309.000	

EK-5 (Devam) Ana problemin 44 eşleştirme ile optimal çözümünü gösteren GAMS optimizasyon programı çıktıları

36	.	.	1.000	432.000
37	.	.	1.000	291.000
38	.	.	1.000	280.000
39	.	.	1.000	310.000
40	.	.	1.000	375.000
41	.	.	1.000	325.000
42	.	.	1.000	378.000
43	.	1.000	1.000	265.000
44	.	.	.	309.000

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

EXECUTION TIME = 0.000 SECONDS 4 Mb WIN225-148 May 29,
2007

EK-6 Tüm olası eşleştirmelerin oluşturulmasına ilişkin GAMS kodları

```
sets
n all nodes /0*43/
begin(n) dummy begin node /0/
last(n) dummy last node /43/
i(n) fly nodes /1*42/
;
alias (n,nn);
alias(i,j,k,l,m,p);

acronyms ADA,ANK,ANT,BOD,DIY,DLM,ERZ,GZT,IST,IZM,TRB,VAN;

parameters kalkis(n)
/
1      1015
2      1120
3      595
4      670
5      930
6      975
7      740
8      1125
9      1250
10     835
11     1220
12     1350
13     445
14     930
15     540
16     1025
17     1230
18     1325
19     930
20     890
21     1060
22     1020
23     640
24     755
25     415
26     1110
27     505
28     1200
29     1155
30     1195
31     1275
```

EK-6 (Devam) Tüm olası eşleştirmelerin oluşturulmasına ilişkin GAMS kodları

```

32    1315
33    810
34    935
35    750
36    860
37    1250
38    695
39    675
40    805
41    575
42    1345
/

```

```

parameters varis(n)
/

```

```

1    1090
2    1200
3    645
4    720
5    985
6    1030
7    805
8    1190
9    1315
10   900
11   1285
12   1420
13   510
14   995
15   610
16   1095
17   1295
18   1395
19   1030
20   990
21   1165
22   1125
23   725
24   845
25   465
26   1170
27   560
28   1255
29   1245

```

EK-6 (Devam) Tüm olası eşleştirmelerin oluşturulmasına ilişkin GAMS kodları

```

30      1285
31      1370
32      1415
33      890
34      1015
35      830
36      945
37      1315
38      765
39      765
40      900
41      665
42      1440
/;
parameters SehirKalk(n)
/
1      IST
2      ADA
3      IST
4      IST
5      ANK
6      ANK
7      IST
8      IST
9      IST
10     ANT
11     ANT
12     ANT
13     IST
14     IST
15     BOD
16     BOD
17     IST
18     DLM
19     IST
20     IST
21     DIY
22     DIY
23     IST
24     GZT
25     IST
26     IST
27     IZM
28     IZM

```

EK-6 (Devam) Tüm olası eşleştirmelerin oluşturulmasına ilişkin GAMS kodları

```

29     IST
30     IST
31     TRB
32     TRB
33     ANK
34     DIY
35     ANK
36     ERZ
37     ANK
38     TRB
39     ANK
40     VAN
41     IST
42     TRB
/;
parameter SehirVar(n)
/
1     ADA
2     IST
3     ANK
4     ANK
5     IST
6     IST
7     ANT
8     ANT
9     ANT
10    IST
11    IST
12    IST
13    BOD
14    BOD
15    IST
16    IST
17    DLM
18    IST
19    DIY
20    DIY
21    IST
22    IST
23    GZT
24    IST
25    IZM
26    IZM
27    IST

```

EK-6 (Devam) Tüm olası eşleştirmelerin oluşturulmasına ilişkin GAMS kodları

```

28     IST
29     TRB
30     TRB
31     IST
32     IST
33     DIY
34     ANK
35     ERZ
36     ANK
37     TRB
38     ANK
39     VAN
40     ANK
41     TRB
42     IST
/;

```

```

parameter flytime(n), resttime(n,nn),pair(i,j,k,l), pair2(i,j,k,l,m), costpair(i,j,k,l),
costpair2(i,j,k,l,m);
flytime(n)= varis(n)-kalkis(n);
resttime(n,nn)=kalkis(nn)-varis(n);
parameter sum4,sum5;

```

```

pair(i,j,k,l)$((ord(i)<>ord(j)) and (ord(i)<>ord(k)) and (ord(i)<>ord(l)) and
(ord(j)<>ord(k)) and (ord(j)<>ord(l))and (ord(k)<>ord(l))and (SehirKalk(i)=IST) and
(SehirVar(l)=IST) and (SehirVar(i)=SehirKalk(j))and (SehirVar(j)=SehirKalk(k))
and (SehirVar(k)=SehirKalk(l))and (resttime(i,j)>=30) and (resttime(i,j)<=300) and
(resttime(j,k)>=30) and (resttime(j,k)<=300) and (resttime(k,l)>=30) and
(resttime(k,l)<=300) and ((flytime(i)+flytime(j)+flytime(k)+flytime(l))<=390) and
((flytime(i)+resttime(i,j)+flytime(j)+resttime(j,k)+flytime(k)+resttime(k,l)+flytime(l)
)<=840))=1;
sum4=sum((i,j,k,l),pair(i,j,k,l));
pair2(i,j,k,l,m)$((ord(i)<>ord(j)) and (ord(i)<>ord(k)) and (ord(i)<>ord(l)) and
(ord(i)<>ord(m))and (ord(j)<>ord(k)) and (ord(j)<>ord(l))and (ord(j)<>ord(m))and
(ord(k)<>ord(l))and (ord(k)<>ord(m))and (ord(l)<>ord(m))and (SehirKalk(i)=IST)
and (SehirVar(m)=IST) and (SehirVar(i)=SehirKalk(j))and
(SehirVar(j)=SehirKalk(k)) and (SehirVar(k)=SehirKalk(l))and
(SehirVar(l)=SehirKalk(m))and resttime(i,j)>=30 and resttime(i,j)<=300 and
resttime(j,k)>=30 and resttime(j,k)<=300 and resttime(k,l)>=30 and
resttime(k,l)<=300 and resttime(l,m)>=30 and resttime(l,m)<=300 and
(flytime(i)+flytime(j)+flytime(k)+flytime(l)+flytime(m))<=390 and
(flytime(i)+resttime(i,j)+flytime(j)+resttime(j,k)+flytime(k)+resttime(k,l)+flytime(l)
+resttime(l,m)+flytime(m))<=840))=1;
sum5=sum((i,j,k,l,m),pair2(i,j,k,l,m));

```

EK-6 (Devam) Tüm olası eşleştirmelerin oluşturulmasına ilişkin GAMS kodları

```
costpair(i,j,k,l)$ (pair(i,j,k,l)=1)=max((flytime(i)+flytime(j)+flytime(k)+flytime(l)),(flytime(i)+resttime(i,j)+flytime(j)+resttime(j,k)+flytime(k)+resttime(k,l)+flytime(l))*0.6 , 120);
```

```
costpair2(i,j,k,l,m)$ (pair2(i,j,k,l,m)=1)=max((flytime(i)+flytime(j)+flytime(k)+flytime(l)+flytime(m)),(flytime(i)+resttime(i,j)+flytime(j)+resttime(j,k)+flytime(k)+resttime(k,l)+flytime(l)+resttime(l,m)+flytime(m))*0.6 , 120);
```

```
display pair,pair2,sum4,sum5,costpair,costpair2;
```

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÇANKAYA, Gözde
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 01.01.1984 Sivas
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (538) 385 78 05
 e-mail : gozde_cankaya@yahoo.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü	2001-2005
Lise	Keçiören Kanuni Y.D.A. Lisesi	1997-2001

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2005 - 2008	Gazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü	Araştırma Görevlisi
2008	Vakıfbank T.A.O. Genel Müdürlüğü Takip İşleri Başkanlığı	Uzman Yardımcısı

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Yamaç Paraşütü, Bilim/Teknoloji, İnternet, Kitap, Müzik, Fitness, Sinema, Tiyatro