

**HAVAYOLU EKİP EŞLEME PROBLEMİ:
GENETİK VE KARMA ALGORİTMALAR**

**AIRLINE CREW PAIRING PROBLEM:
GENETIC AND HYBRID ALGORITHMS**

A. Ayyüce AYDEMİR

Başkent Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
ENDÜSTRİ Mühendisliğı Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2008

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,
Bu çalışma, jürimiz tarafından **ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda**
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan(Danışman) : Prof. Dr. Berna DENGİZ

Üye : Prof. Dr. Fulya ALTIPARMAK

Üye : Doç. Dr. Muzaffer KAPANOĞLU

ONAY

Bu tez 10/ 06/ 2008 tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen yukarıdaki jüri
üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

/06/2008

Prof. Dr. Emin AKATA
Fen Bilimleri Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam sırasında bilimsel katkıları ile bana her zaman yardımcı ve yol gösterici olan eğitimim süresince ilgi ve yardımlarını benden esirgemeyen, değerli tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Berna DENGİZ' e sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Tezimin her aşamasında desteklerini esirgemeyen Araőtırma Görevlisi Mehmet DİKMEN' e teşekkürü bir borç bilirim.

Bana maddi ve manevi her türlü desteği veren aileme, en içten teşekkürlerimi ve őükranlarımı sunarım.

ÖZ

HAVAYOLU EKİP EŞLEME PROBLEMİ: GENETİK VE KARMA ALGORİTMALAR

Ayyüce AYDEMİR

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Havayolu endüstrisi; uçuş çizelgeleme, filo atama, uçak rotalama ve ekip atama gibi birçok eniyileme problemi ile ilgilenmektedir. Literatürde, bu problemler arasından en çok ekip planlama problemi çalışılmıştır. Çünkü ekip maliyetleri havayolu şirketleri tarafından kontrol edilebilir en büyük gider kalemini oluşturmaktadır. Etkin ve düşük maliyetli ekip çizelgeleri oluşturmak için literatürde birçok model önerilmektedir. Bu modellerin çoğu, problemi ekip eşleme ve ekip atama olmak üzere iki farklı probleme ayırarak çözmektedir.

Bu tezde, uçuş çizelgesindeki tüm uçuşları kapsayan ve en düşük maliyete sahip ekip eşlemeleri kümesini seçmeyi amaçlayan ekip eşleme problemi çözülmektedir. Bu problemi çözmek için, rassal üretimli eniyileme algoritması, genetik tabanlı algoritma ve karma sütun üretme yaklaşımı olmak üzere üç farklı yaklaşım geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmaların performansını karşılaştırmak amacı ile bu problemin çözümünde literatürde en çok kullanılan teknik olan Sütun Üretme Yaklaşımı kullanılmıştır. Yaklaşımların performansları iki ayrı problem seti için incelenmiş ve sonuçlar elde edilmiştir.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: ekip planlama, ekip eşleme, genetik algoritma, sütun üretme yaklaşımı

DANIŞMAN: Prof. Dr. Berna DENGİZ, Başkent Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü.

ABSTRACT

AIRLINE CREW PAIRING PROBLEM: GENETIC AND HYBRID ALGORITHMS

Ayyüce AYDEMİR

Başkent University Institute of Science and Technology

Department of Industrial Engineering

The airline industry deals with many optimization problems such as flight and crew scheduling, fleet assignment and aircraft routing. As the crew expenses are the largest controllable component in airline companies' payments, crew scheduling is the most studied one among forementioned problems. To find effective and low cost crew schedules, many models are proposed in the literature. Many of these models divide the problem into two as crew pairing and crew rostering.

In this study, a crew pairing problem that focuses on covering all the flights at the flight schedule and selecting the low cost crew pairing set is solved. Three approaches, which are randomly generated optimization algorithm, genetic algorithm based approach and hybrid column generation approach, are developed. To compare the efficiency of the developed algorithms, a column generation approach which is commonly used in literature is preferred. Two different problem sets are used to test the performance of the algorithms and the solutions are demonstrated.

KEY WORDS: crew scheduling, crew pairing, genetic algorithm, column generation approach.

SUPERVISOR: Prof. Dr. Berna DENGİZ, Başkent University, Industrial Engineering Department.

İÇİNDEKİLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZ.....	i
ABSTRACT.....	ii
İÇİNDEKİLER LİSTESİ.....	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. HAVAYOLU PLANLAMA SÜRECİ.....	4
2.1. Ekip Eşleme Problemi.....	7
2.1.1. Ekip eşlemelerinin oluşturulması.....	9
2.1.2. Ekip eşleme ile ilgili karakteristikler.....	11
2.1.3. Ekip eşleme problemi için günlük, haftalık ve tam zamanlı problemler.....	14
2.1.4. Ekip eşleme probleminin çözümünün zor ve karmaşık olmasının nedenleri.....	15
2.2. En İyi Ekip Eşlemesi Kümesinin Seçilmesi.....	16
2.3. Ekip Eşleme Problemi İçin Geliştirilen Çözüm Yöntemleri ve Kaynak Taraması.....	18
2.3.1. Ekip eşlemesi oluşturma yaklaşımları.....	18
2.3.1.1. <u>Satır yaklaşımı</u>	18
2.3.1.2. <u>Sütun üretme yaklaşımı</u>	19
2.3.1.3. <u>Şebeke yaklaşımı</u>	20
2.3.2. En iyi ekip eşlemesi kümesi seçme yaklaşımları.....	21
2.3.2.1. <u>TPACS / TRIP yaklaşımı</u>	21
2.3.2.2. <u>Doğrusal programlama algoritmaları</u>	22
2.3.2.2.1. <u>SPRINT</u>	22
2.3.2.2.2. <u>Volume algoritması</u>	23
2.3.2.3. <u>Tamsayılı programlama yöntemleri</u>	24
2.3.2.3.1. <u>Dallandır-Kes(Branch-and-Cut)</u>	24
2.3.2.3.2. <u>Dal - Fiyat (Branch-and-Price)</u>	24
2.3.2.3.3. <u>Paralleleştirme</u>	25

2.3.2.3.4. <u>Diğer yöntemler</u>	26
2.3.3. Sezgisel yöntemler.....	27
3. GENETİK ALGORİMA VE SÜTUN ÜRETME YAKLAŞIMI.....	30
3.1. Genetik Algoritmalar.....	30
3.1.1. Temel yapısı ve işleyişi.....	30
3.1.2. Dizi gösterimi (kodlama).....	32
3.1.3. Başlangıç yığınının oluşturulması.....	33
3.1.4. Değerlendirme fonksiyonu.....	33
3.1.5. Yeniden üretim operatörü.....	34
3.1.5.1. <u>Seçim Mekanizmaları</u>	34
3.1.6. Genetik operatörler.....	37
3.1.6.1. <u>Çaprazlama Operatörü</u>	37
3.1.6.2. <u>Mutasyon operatörü</u>	42
3.1.7. Kontrol Parametreleri.....	43
3.2. Sütun Üretim Yaklaşımı.....	44
3.2.1. Ekip Eşleme Problemi İçin Sütun Üretim Yaklaşımı.....	45
3.2.1.1. <u>Ana Problem</u>	45
3.2.1.2. <u>Alt Problem</u>	46
3.2.1.3. <u>Sebeke Yapısı</u>	48
3.2.1.4. <u>Doğrusal Gevşetme</u>	49
3.2.1.5. <u>Tamsayılı Çözümler Elde Etme</u>	50
4. EKİP EŞLEME PROBLEMİ İÇİN GELİŞTİRİLEN ALGORİTMALAR...	52
4.1. Problemin Tanımı ve Varsayımlar.....	52
4.2. Rassal Üretimli Eniyileme.....	53
4.3. GA Tabanlı Algoritma.....	55
4.3.1. Dizi gösterimi.....	55
4.3.2. Amaç fonksiyonu ve uygunluk fonksiyonu.....	56
4.3.3. Başlangıç yığının oluşturulması.....	56
4.3.4. Seçim mekanizması.....	57
4.3.5. Genetik operatörler.....	57
4.3.5.1. <u>Çaprazlama operatörü</u>	57
4.3.5.2. <u>Mutasyon operatörü</u>	62
4.3.6. Algoritmanın adımları.....	62

4.3.7. En iyi ekip eşlemesinin belirlenmesi için küme kapsama problemi.....	63
4.4. Sütun Üretme Yaklaşımı.....	64
4.4.1. Ana problem.....	64
4.4.2. Şebeke yapısı.....	66
4.4.3. Alt problem.....	67
4.4.4. Sütun üretme algoritması.....	69
5. UYGULAMA.....	70
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	80
KAYNAKLAR LİSTESİ.....	83
EKLER LİSTESİ.....	91

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Havayolu planlama süreci.....	4
Şekil 2.2 Ekip eşleme problemi çözüm yöntemi aşamaları.....	6
Şekil 2.3 Ekip eşlemesi örneği.....	9
Şekil 3.1 Genetik algoritmaların genel yapısı.....	31
Şekil 3.2 Tek noktalı çaprazlama örneği.....	38
Şekil 3.3 İki noktalı çaprazlama örneği.....	39
Şekil 3.4 Uniform çaprazlama örneği.....	39
Şekil 3.5 Kısmi eşlenmiş çaprazlama örneği.....	40
Şekil 3.6 Sıralı çaprazlama örneği.....	41
Şekil 3.7 Çevrimsel çaprazlama.....	41
Şekil 3.8 Mutasyon örneği.....	42
Şekil 4.1 Dizi gösterimi.....	55
Şekil 5.1 Sütun Üretme Yaklaşımları Yakınsama Grafiği (172 uçuş).....	76
Şekil 5.2 Sütun Üretme Yaklaşımları Yakınsama Grafiği (150 uçuş).....	77

ÇİZELGELER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 Uçuş çizelgesi örneği.....	10
Çizelge 2.2 Ekip eşlemeleri örneği.....	11
Çizelge 2.3 Avrupa ve Kuzey Amerika için benzerlikler ve farklılıklar.....	13
Çizelge 2.4 Problem büyüklüğü.....	16
Çizelge 4.2 Birinci ebeveyn için kalkış ve varış yerleri.....	60
Çizelge 4.3 İkinci ebeveyn için kalkış ve varış yerleri.....	60
Çizelge 4.4 Çaprazlama tablosu.....	60
Çizelge 5.1 172 uçuşlu THY uçuş çizelgesi için sonuçlar.....	70
Çizelge 5.2 150 uçuşlu THY uçuş çizelgesi için sonuçlar.....	71
Çizelge 5.3 Tekrarlı uçuş içeren ekip eşlemeleri.....	72
Çizelge 5.4 172 uçuşlu THY uçuş çizelgesi için Sütun Üretme yaklaşımı sonuçları.....	75
Çizelge 5.5 150 uçuşlu THY uçuş çizelgesi için Sütun Üretme yaklaşımı sonuçları.....	76
Çizelge 5.6 172 uçuşlu THY verisi için geliştirilen 3 yaklaşımın karşılaştırılması.....	78
Çizelge 5.7 150 uçuşlu THY verisi için geliştirilen 3 yaklaşımın karşılaştırılması.....	78

SİMGELER VE KISALTMALAR

FLT	Filo Tipi
FAA	A.B.D. Federal Havacılık Kurumu
ICAO	Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatı
JAA	Ortak Havacılık Otoriteleri Birliği
THY	Türk Hava Yolları
GA	Genetik Algoritma

1. GİRİŞ

Havayolu planlama problemi, birbirinden bağımsız ve zor birçok alt planlama probleminden oluşmaktadır. Bunlardan bazıları; ekip, uçuş, bakım, stok, ekipman giderleri ve ekip eğitimlerinin planlanmasıdır. Her planlama probleminin kendi içinde kuralları, karmaşıklığı, belirli bir zaman periyodu ve amaçları vardır.

Son 30 yıl içerisinde, büyük havayolu şirketlerinin hızla büyümesi ve seyahat için havayolu taşımacılığını kullanan yolcu sayısındaki artışa bağlı olarak, havayolu planlamanın her alanındaki problem boyutlarında, çok büyük ölçüde artış olmuştur [1]. Fransa'da yayınlanan Capital dergisini verdiği rakamlara göre, 2007 yılında, dünyada 2.1 milyar insan havayolu taşımacılığını tercih etmiştir. Bu da, 2002 yılına göre, havacılık sektörünün yüzde 30'un üzerinde bir artış göstermesi anlamına gelmektedir. Öte yandan, 2001 yılında 13 milyar dolar zarar eden havayolu şirketlerinin, 2007 yılında 5.1 milyar dolar kar ettikleri bildirilmiş ve Boeing firmasının yaptığı bir araştırmaya göre, havacılık sektörünün, 2026 yılına kadar her yıl yüzde 5 oranında büyüyeceği belirtilmiştir. Böylece, pazarın büyüklüğünün 2.8 trilyon dolara çıkması beklenmektedir [2]. Bu durum, havacılık sektörünün, ülkelerin ekonomisi üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir.

Bu etki, en çok havayolu planlamanın ekip planlama aşamasında hissedilmektedir. Ekip planlama problemi, yönelem araştırması alanında yeni sorunlar yaratmaya devam etse de, birçok durumda en iyiye yakın çözümlerin elde edilmesinde büyük aşamalar kaydedilmiştir. Bu durumda büyük ölçekli doğrusal ve tamsayılı programlama problemlerinin çözümü için geliştirilen algoritma ve sezgisel yöntemlerdeki önemli ilerlemeler ve hesaplama amaçlı kullanılan yazılım ve donanım teknolojilerindeki gelişmeler, iki ana faktör olarak ortaya çıkmaktadır.

Bu tezde, havayolu planlama probleminin ekip planlama aşamasında yer alan ekip eşleme problemi konusu üzerinde çalışılmıştır. Ekip giderlerinin, yakıt giderlerinden sonra gelen en büyük gider kalemini oluşturması nedeniyle, ekip planlamanın havayolları şirketleri için çok büyük bir önemi vardır. Ayrıca, ekip maliyetleri havayolu şirketleri tarafından kontrol edilebilir en büyük gider kalemidir. Bu nedenle de, planlamada ekiplerin uçuşlara etkin şekilde atanması çok önemlidir.

[1]. Atama işleminin etkin olarak yapılması için ise uygun ekip eşlemelerinin oluşturulması gerekmektedir. Ekip planlama ile yapılan çok küçük miktardaki tasarruflar bile, havayolu şirketlerinde milyon dolarlara varan kazançlar sağlamaktadır. Havayolu ekip planlama probleminde, ileri en iyileme tekniklerinin kesin çözüm veren matematiksel programlama yöntemleri ve sezgisel yöntemler ile birlikte kullanılması ile işletim maliyetlerinde çok büyük ölçüde tasarruf sağlandığı bildirilmiştir.

Ekip planlama problemi, havayolu planlamanın en zor problemlerinden biridir. Amerika'nın büyük hava yolu şirketleri, periyodik olarak her gün 15'den fazla şehre, 500'e yakın uçak ile 2500'den fazla uçuş planlamaktadır ve bu uçuşlar için belirli bir kokpit ekibi, kabin ekibi ve uçak ataması yapmalıdır. Bu durum, aylık bazda 5000'den fazla kokpit ve 10000'e yakın kabin ekibinin planlamasını içermektedir. Ülkemizde, filusunda en fazla uçak bulunan Türk Hava Yolları (THY), dünyanın çeşitli bölgelerindeki 141 uçuş noktasına 102 uçak ile hizmet vermekte ve 11000'e yakın ekip personelinin planlamasını yapmaktadır [3]. Bunun ötesinde, ekip planları, sivil havacılık kuralları, iş sözleşmeleri ve havayolunun kendi kurallarına uygun olarak planlanmalıdır.

Bu tezde, ekip planlama problemi içindeki ekip eşleme problemi, yani en iyi ekip eşlemesinin oluşturulması ele alınarak sezgisel yaklaşımlarla çözülmeye çalışılmıştır. Bu nedenle, çalışmanın ikinci bölümünde havayolu planlama sürecinde ekip eşleme, en iyi ekip eşleme kümesinin belirlenmesi problemleri detaylı olarak açıklanmış, problemin özellikleri, çözümünde kullanılan modelleme yaklaşımları, literatürde yer alan çözüm yöntemleri ve kaynak taramasına yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde ise, tezde problemin çözümü için kullanılan Genetik Algoritma ve Sütun Üretme Yaklaşımı hakkında bilgi verilmiştir. Genetik Algoritmanın yapısı ve işleyişi incelenmiştir. Ayrıca Sütun Üretme Yaklaşımının genel algoritması verilmiştir. Ancak, bu yaklaşım, problemin özelliğine göre değişiklik gösterdiği için, yaklaşımın alt adımları ekip eşleme problemine özgü olarak incelenmiştir.

Dördüncü bölümde ise tezde ele alınan problemin tanımı, kısıtları ve yapılan varsayımlar açıklanmaktadır. Ele alınan probleme özgü olarak geliştirilen Rassal

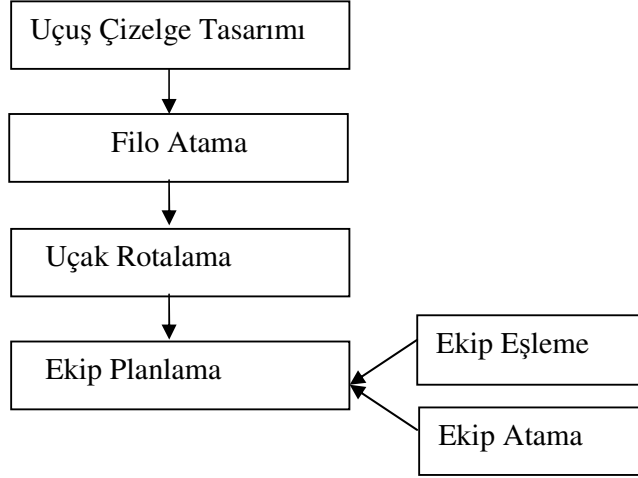
Eniyileme Algoritması, Genetik Tabanlı Algoritma ve Sütun Üretme Yaklaşımları verilmektedir. Genetik Tabanlı Algoritmanın her adımı ayrıntılı olarak incelenmiş, probleme özgü geliştirilen çaprazlama genetik operatörü örnek yardımıyla açıklanmıştır. Ayrıca, Sütun Üretme Yaklaşımının algoritması ve alt adımları ayrıntılı olarak incelenmekte, geliştirilen matematiksel modele açıklamaları ile yer verilmektedir.

Tezde, geliştirilen her üç yaklaşım da, 172 ve 150 uçuşa sahip Türk Hava Yolları iç seferler uçuş çizelgesi verileri için çözülmüştür. Beşinci bölümde, kullanılan veri seti için bu yaklaşımlardan elde edilen sonuçlara yer verilmekte ve geliştirilen yaklaşımların değerlendirilmeleri ve birbirleri ile karşılaştırılmaları yapılmaktadır.

Altıncı bölümde ise tezin bir bütün olarak sonuçları ve değerlendirilmesi yer almaktadır.

2. HAVAYOLU PLANLAMA SÜRECİ

Büyük hava yolu şirketlerinde uçakların ve ekiplerin planlanması ve çizelgelenmesi çok karmaşık bir problemdir. Bu nedenle havayolu planlama süreci, Uçuş Çizelge Tasarımı, Filo Atama, Uçak Rotalama ve Ekip Planlama olmak üzere dört ayrı temel problem olarak ele alınmaktadır. Şekil 2.1, havayolu planlama sürecinin aşamalarını mantıksal bir sırada göstermektedir. Burada her aşamanın çıktısı bir sonraki aşamanın girdisini oluşturmaktadır [4].



Şekil 2.1 Havayolu planlama süreci

Uçuş Çizelge Tasarımı: Uçuş çizelge tasarımı probleminin amacı; piyasa talebi ve elde bulunan kaynakları dikkate alarak belirli bir zaman süresi için, uçuş noktalarının ve bu noktalara yapılacak uçuş sayı ve zamanlarının belirlenmesidir. Uçuş çizelgesi her uçuşun kalkış yeri, varış yeri; kalkış saati ve varış saati bilgilerini içerir.

Filo Atama: Filo atama problemi, uçak tiplerinin (filoların) uçuş çizelgesindeki her uçuş ayağına atanmasıdır. Filo; yolcu kapasitesi, yakıt tüketimi, kara ve maliyete etki eden diğer faktörler yönünden birbirine benzerlik gösteren uçak sınıfıdır [5].

Bir uçuş ayağından elde edilen kar, o uçuş ayağına olan piyasa talebine ve o uçuş ayağına atanan uçağın büyüklüğüne bağlıdır [1]. Bu problemde amaç, her filodaki sınırlı sayıdaki uçak ile uçuş çizelgesindeki tüm uçuş ayaklarının uçulmasını

zorunlu koşarak karı en byklemektir. Ancak uyulması gereken birçok başka kısıt da mevcuttur.

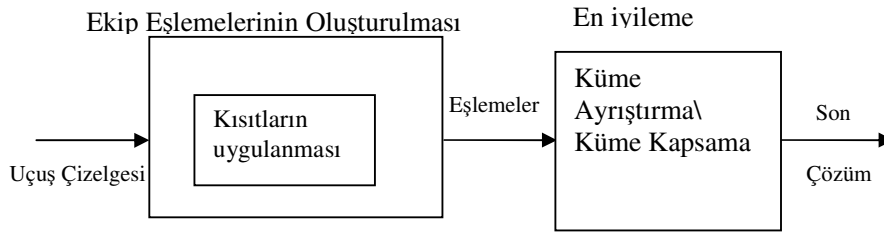
Uçak Rotalama: Bu problem her uçak tipi (filo) için ayrı ayrı çözülmektedir. Bu aşamada bireysel olarak her uçak için uçulacak olan uçuş ayakları sırası belirlenir [6]. Aynı zamanda, belirli havaalanlarında, uçakların rutin bakım kontrollerinin yapılması için yeterli bakım süresini garanti edecek şekilde, her bir uçağın uçuş ayaklarına atanmasıdır.

Ekip Planlama: Ekip planlama problemi havayolu planlamanın en zor problemlerinden biridir. Ekip planlama probleminin, havayolu şirketleri için çok büyük bir önemi vardır. Havayolu şirketleri için, ekip maliyetleri yakıt maliyetinden sonra gelen en büyük gider kalemini oluşurmaktadır. 1991 yılında, American Airlines şirketinin ekip giderlerine 1.3 milyon dolar (Anbil et al., [7]), 1989 yılında, Northwest Airlines şirketinin 1.05 milyon dolar (Barutt and Hull, [8]), United Airlines şirketinin ise sadece pilotlar için 0,6 milyon dolar (Graves et al., [9]) harcadığı belirtilmiştir. Ekip maliyetleri, havayolu şirketi tarafından kontrol edilebilen bir gider kalemidir. Bu durumda havayolu planlamada, uçuşların ekiplere etkin bir şekilde atanması çok önemli bir yer tutmaktadır [1].

Ekip planlama problemi, toplu sözleşme ve hava trafik kurallarınca belirlenmiş olan kısıtları sağlayacak şekilde, uçuş çizelgesindeki tüm uçuşlara en düşük maliyetle uçucu ekip personelinin atanması problemini çözer. Uyulması gereken toplu sözleşme ve yasal kuralların karmaşık yapıda olması ekip planlama probleminin çözümünü zor hale getirmektedir. Ekip planlama probleminin kısıtları, A.B.D. Federal Havacılık Kurumu (FAA), Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatı (ICAO), Ortak Havacılık Otoriteleri Birliği (JAA) ve Türk Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü tarafından belirlenen talimatlara ve sendikal sözleşmelerin gerekliliklerine uyum sağlamalıdır. Bu düzenlemeler, genel olarak uçucu personelin çalışma saatlerinin sınırlarını belirler ve kesinlikle uyulması gereken kurallardır. Hava yolu şirketlerinin direk operasyonel maliyetlerinin en büyük yüzdesini ekip maliyetleri oluşurmaktadır. Bu nedenle, ekip planlama probleminin havayolu endüstrisine olan ekonomik anlamdaki önemi yadsınamaz [10].

Ekip planlama problemi, karmaşık olması nedeni ile birbirini takip eden iki aşamaya ayrılarak incelenmektedir (Bkz Şekil 2.1). Birinci aşama, en iyi ekip eşleme kümesinin belirlenmesi problemidir. Bu aşamada, uçuş çizelgesi girdi olarak alınır ve ekip eşlemesi adı verilen kural ve düzenlemelere uygun sıralı uçuş ayaklarından meydana gelen turlar oluşturulur. Bu aşamada ekibin bireysel ihtiyaç ve istekleri dikkate alınmamaktadır. Burada ana amaç, uçuş çizelgesindeki tüm uçuşları kapsayacak şekilde en az sayıda kaynağın, yani ekibin kullanılmasıdır [11]. Oluşturulan ekip eşlemeleri ikinci aşamanın girdisidir [12].

Literatürde, ekip eşleme problemi iki aşamaya ayrılarak çözülmektedir. İlk aşamada tüm yasal eşlemeler oluşturulur, ikinci aşamada ise tüm uçuş ayaklarını oluşturan ekip eşlemeleri kümesi seçilir (küme kapsama veya küme ayrıştırma problemi) [13]. Şekil 2.2, ekip eşleme probleminin çözüm yöntemi aşamalarını göstermektedir.



Şekil 2.2 Ekip eşleme problemi çözüm yöntemi aşamaları [14]

İkinci aşama ise ekip atama / nöbet listesi oluşturma problemidir. Ekip atama problemi, ilk aşamanın tersine, ekip elemanları için çözülmektedir. Yine kurallara ve düzenlemelere uygun olarak ve bu sefer her ekip elemanının önceden planlanmış aktiviteleri göz önünde bulundurularak, ekip eşleme aşamasında oluşturulan eşlemelere gereken ekip ihtiyacı karşılanacak şekilde ekiplerin ataması yapılır. Ekip elemanlarının önceden planlanmış aktiviteleri eğitim ve izin ana başlıkları altında bulunmakta ve parmak izi ya da iskelet liste (Barnhart et al.,[15]) olarak adlandırılmaktadır. Problemin her iki aşaması da NP-zor problem sınıfında yer almaktadır [4].

2.1 Ekip Eşleme Problemi

Problemin özelliğinden ötürü kendine özgü uluslararası ortak kullanılan terminolojisi aşağıda sırasıyla açıklanmaktadır:

Uçuş ayağı (*flight leg*): En küçük planlama birimi, iki hava alanı arasındaki kesintisiz uçuştur.

Ekip (*crew*): Aynı uçakta görev yapmakta olan uçuş personelidir. Pilot, yardımcı pilot, hostes vb. elemanlardan oluşur.

Ana Üs (*home base*): Havacılık işletmesinin uçuş faaliyetlerini yürüttüğü ve işletme ruhsatında ana merkez olarak belirlenen, uçucu ekiplerin kendi imkânları ile konaklama ve yaşelerini sağladığı mahalidir [16]. Yani ekiplerin yaşadığı şehir anlamına gelmektedir.

Geçici Üs (*base*): Ana üs veya üslerin dışında, uçuş harekâtının devamlılığı için, uçucu ekip üyesinin uçuş görev süresinin başlayıp sona erdiği ve uçucu ekip üyesine, havacılık işletmesinin uygun konaklama tesisi ve iâşe imkânı sağlamakla yükümlü olduğu, uçucu ekiplerin geçici bir süre kalacağı, havacılık işletmeleri tarafından belirlenen yurt içi ve/veya yurt dışındaki yerleşim merkezidir [16].

Uçuş Süresi (Blok Süresi) (*flight time*): Bir hava aracının kalkış yapmak maksadıyla, kendi gücü ile veya harici bir güç uygulanmak suretiyle ilk hareketine başlama anından, uçuşun veya görevin sonunda tam olarak durarak yolcu, yük veya diğer muhteviyatı indirme ve/veya bindirme amacıyla kendisine tahsis edilen park yerine gelme anına kadar geçen toplam süredir [16].

Uçuş Görev Süresi (*duty period*): Tek bir uçuş ya da uçuş serilerinden oluşmuş bir uçuş görevi için, uçucu ekip üyesinin uçuş hazırlığı ile başlayan ve aynı uçuş veya uçuş serilerinin sonundaki tüm uçuş görevlerinden muaf tutulduğu ana kadar geçen toplam süresidir (ilk uçuş başlamadan önce ve son uçuşun bitiminden sonra hazırlık süresi dahil). Uçuş görevi bir ekibin bir günlük çalışmasıdır.

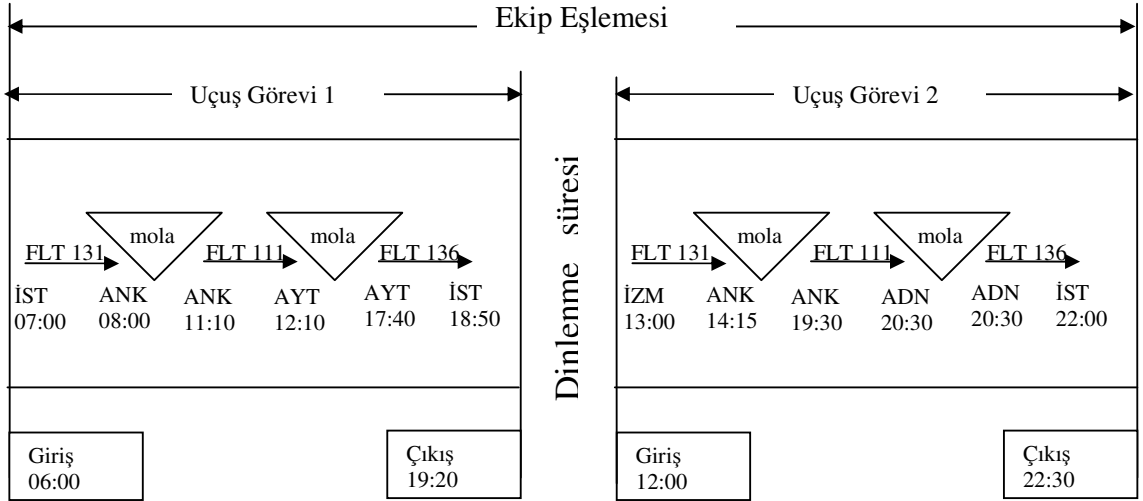
Mola (*sit time*): Bir uçuş görevinde birbirini takip eden uçuşlar arasındaki kısa bekleme süreleridir. Molalar için tanımlanmış en büyük ve en küçük zamanlar mevcuttur. En küçük mola zamanı, ancak ekip personelinin birbirini takip eden iki uçuşta uçak değiştirmesine izin verilmemesi durumunda ihlal edilebilir [17].

Dinlenme Süresi (*rest time*): Bir uçucu ekibin, bir önceki uçuş görev süresinin bittiği andan itibaren başlayan ve yeni bir uçuş görev süresinin başlama saatine kadar süren, her türlü görevden muaf tutulduğu süredir [16].

Ekip eşlemesi (*pairing*): Görevlerden ve dinlenme sürelerinden oluşan genellikle 2 ya da 5 gün süren uçuş görevleri dizisidir.

Pas Uçuşu (*deadhead*): Görevde olan ekip personeli dışında uçakta bulunan, ana üsse dönmek ya da ekip eşlemesine devam etmek amacıyla bir başka üsse yolcu olarak taşınan ekip personelidir.

Şekil 2.3, dinlenme süresi, mola ve uçuş ayakları ile iki uçuş görev süresinden oluşan bir ekip eşlemesini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi ekip eşlemesi iki uçuş görevinden oluşmaktadır, yani eşleme 2 günlük olarak planlanmıştır. Uçuş görev süreleri dinlenme süresi ile ayrılmakta iken, uçuşlar molalar ile ayrılmaktadır. Uçuşların kalkış yerleri bir önceki uçuşun varış yeri ile aynıdır ve kalkış saati bir önceki uçuşun varış saatinden büyüktür. Ayrıca, ekip eşlemesi İstanbul ana üssünde başlamakta ve 2. günün sonunda İstanbul ana üssünde sona ermektedir.



Şekil 2.3 Ekip eşlemesi örneği

2.1.1 Ekip eşlemelerinin oluşturulması

Ekip eşlemesi, uçuş görevleri kümesidir. Birbirini takip eden görevler dinlenme süreleri ile ayrılmalıdır. Ekip eşlemeleri, ana üs adı verilen belirli noktalardan başlamalı ve başladığı ana üste sona ermelidir. Ekip eşlemeleri, FAA kurallarının yanı sıra, havayolu şirketi ve sendika tarafından belirlenmiş olan kurallara uygun olarak oluşturulmalıdır [18].

Bu kısıtlar genel olarak şu şekilde sınıflandırılabilir [13]:

Geçici Kısıtlar: Birbirini takip eden iki uçuş ayağı arasında yeterli mola zamanı olmalıdır. Her uçuş kendinden bir önceki uçuş bittikten sonra başlamalıdır.

Yerel Kısıtlar: Bir uçuş ayağının varış üssü, kendini takip eden bir sonraki uçuş ayağının kalkış üssü olmalıdır.

Süre Kısıtları: Uçuş süresi, uçuş görev süresi, dinlenme süresi ve boş süreler ile ilgili kısıtlar ülkemizde "SHT6A-50 Uçuş Görev Süreleri ve Dinlenme Süreleri Sınırlama Tabloları" ile belirlenmiştir. Bu talimat Ek 1'de verilmektedir.

Uçuş Görevi ve Eşleme Başına İzin Verilen Uçuş Ayağı Sayısı: Bu faktörler için üst sınırlar mevcuttur.

Ekip eşlemesi genelde bir yada bir kaç günlük olarak planlanır. Bu problemde uyulması gereken bir kısıt da üslerde belirlenen iş yükünü yerine getirebilecek sayıda ekip bulunmasıdır [19].

Ekip eşleme problemi genel olarak iki alt probleme ayrılarak çözülmektedir. İlk olarak yasal eşlemeler oluşturulur ve daha sonra oluşturulan ekip eşlemeleri arasından, uçuş çizelgesindeki tüm uçuş ayaklarını içeren en düşük maliyete sahip ekip eşlemeleri kümesi seçilir [20].

Aşağıda ekip eşlemesinin oluşturulmasına dair küçük bir örnek verilmektedir. Çizelge 2.1'de, 2 tip uçak için uçuş çizelgesi, yani uçuş ayaklarının kalkış saati, kalkış üssü, varış saati, varış üssü, uçuş süresi, uçuş numarası bilgileri verilmektedir.

Çizelge 2.1 Uçuş çizelgesi örneği [20]

Uçuş Numarası	Kalkış Üssü	Varış Üssü	Kalkış Saati	Varış Saati	Uçuş Süresi	Uçak Tipi
242	ath	mic	08:15	09:15	60	1
245	mic	ath	10:15	11:15	60	1
214	ath	her	12:15	13:00	45	1
217	her	ath	13:45	15:15	90	1
160	ath	kav	15:35	17:05	90	1
169	kav	ath	17:55	19:20	85	1
58	ath	rod	07:25	08:15	50	2
66	rod	ath	10:00	10:45	45	2
120	ath	tri	12:05	12:50	45	2
174	tri	ath	13:40	14:25	45	2

Çizelge 2.2, Çizelge 2.1'de verilen uçuş çizelgesi girdisi ile oluşturulabilecek ekip eşlemeleri arasından olası bir çözümü göstermektedir. Çözüm iki adet ekip eşlemesinden oluşmaktadır ve bu eşlemeler uçuş çizelgesindeki tüm uçuş ayaklarını kapsamaktadır. İlk eşleme, 4 günlük bir eşleme olarak planlanmış iken, ikinci eşleme tek günlük planlanmıştır. Bu örnekte her uçuşun her gün uçulduğu varsayımı yapılmaktadır. Eşlemeler belirlenen kısıtlara uygun olarak

oluşturulmuştur. Örnek olarak bir uçuş ayağı bir önceki uçuş ayağının bittiği yerden ve bittiği saatten sonra başlamıştır. Uçuş ayakları arasında mola zamanı ve görevler arasında dinlenme süreleri verilmiştir. Eşlemeler başladıkları ana üste bitmiştir ve eşleme başına izin verilen uçuş ayağı sayısı en fazla 4'tür.

Çizelge 2.2 Ekip eşlemeler örneği [20]

Eşleme	Gün	Uçuş						
1	1		160			169		
		ath	15:35	17:05	kav	17:55	19:20	ath
	2		214			217		
		ath	12:15	13:00	her	13:45	15:15	ath
	3		120			174		
		ath	12:05	12:50	tri	13:40	14:25	ath
	4		242			245		
		ath	08:15	09:15	mic	10:15	11:15	ath
2	1		58			66		
		ath	07:25	08:15	rod	10:00	10:45	ath

2.1.2 Ekip eşleme ile ilgili karakteristikler

Ekip eşleme problemi havayolu şirketlerine göre değişkenlik göstermektedir. Açıkça görülmektedir ki, küçük ölçekli havayolu şirketlerinin problemleri büyük ölçekli hava yolu şirketlerine göre daha basittir. Ancak Avrupa ve Kuzey Amerika büyük hava yolu şirketlerinin problemleri arasında bile temel ve büyük farklar vardır. Ekip eşleme probleminde fark yaratan karakteristik özellikler şu şekilde sınıflandırılabilir [4]:

Ekip kategorisi: Bir uçuş ayağında, farklı ekip kategorilerinden belli sayıda ekibe ihtiyaç duyulmaktadır (pilot, kaptan pilot, hostes...). Bir kategoride yer alan ekip, diğer bir kategorideki ekibin yerini tutamaz. Her kategori için farklı kurallar mevcuttur, hatta aynı kategoride yer alan farklı ekip üyeleri için farklı kurallar bile uygulanabilir. Dolayısıyla, ekip eşleme problemi ekip kategorileri için ayrı ayrı çözülür.

Filo: Kokpit ekibinin (pilot), genellikle tek tip uçakta uçmaya yetkisi bulunmaktadır. Bu nedenle problem filo tipine göre ayrı ayrı çözülmektedir. Kabin personeli ise birden fazla uçak ile uçuş yetkisine sahiptir. Her uçuş ayağı için bir kaptan ve bir

yardımcı kapata ihtiyaç duyulurken, birçok hostese ihtiyaç duyulacağı düşünülürse kabin ekibi için ekip eşleme problemi, kokpit ekibi için ekip eşleme problemine göre oldukça büyüktür. Ancak, problem kokpit ekibinin yüksek ücret alması sebebiyle ekip eşleme probleminde en önemli yere sahiptir.

Şebeke Yapısı: Büyük Kuzey Amerika havayolu şirketleri problemi merkez ve taşra denilen (hub and spoke) şebeke yapısı ile tanımlamaktadır. Birkaç havaalanı (merkez) birbiri ile ve diğer havaalanları (taşra) ile bağlantılıdır. Yani, kısa bir zaman aralığında birçok uçuş, merkez adı verilen havaalanlarına varmaktadır ve kısa bir süre sonra merkezlerden çıkış yapan birçok uçuş bulunmaktadır. Böylece bekleme zamanı en küçüklenerek, merkezlerle taşralar arasında ulaşım sağlanmasına olanak verilmiş olur. Bu tarz şebeke yapıları çok sayıda olası ekip eşlemesi oluşmasına sebebiyet verir. Avrupa'da bu şebeke yapıları çok yaygın değildir. Havaalanına varan ekip belirli sayıda uçuşa devam edebilir. Bu nedenle, ekip eşleme problemleri tipik Avrupa havayolu şirketlerinde, tipik Kuzey Amerika havayolu şirketlerine göre daha küçüktür.

Kurallar ve Yönetmelikler: Bir ekip eşlemesinin yasal olabilmesi için devlet tarafından belirlenmiş kurallara ve toplu iş sözleşmelerine uyması gerekmektedir. Kurallar havayolu şirketlerine göre de değişiklik göstermektedir.

Uçuş Çizelgesi Düzeni: Kuzey Amerika Havayolları tipik olarak Pazartesi gününden Cuma gününe kadar aynı uçuşları yapmaktadır. Hafta sonları ise hafta içinde uçulan uçuşların bir alt kümesi uçulmaktadır. Avrupa' da ise uçuşlar günden güne değişmektedir. Örneğin, bir uçuş bir hafta içinde 2 ya da 3 kere uçulmaktadır.

Maliyet Yapısı: Kuzey Amerika havayolları şirketlerinde ekiplere yapılan ödemeler kredi saati adı verilen sisteme dayanmaktadır. Bir ekip eşlemesinin maliyeti; bir eşlemedeki uçuş görevlerinin toplam maliyeti, uçuş görev süresi ve garanti edilen en az ödeme miktarı (bir görev süresi başına en az 5 saat) bileşenlerinin en büyüğü olarak belirlenmektedir. Avrupa'da ise ekiplere sabit bir ücret ödenmektedir [21].

Kuzey Amerika ve Avrupa havayolları şirketlerinde ekip eşleme problemi ile ilgili karşılaşılan benzerlikler ve farklılıklar Çizelge 2.3' de gösterilmektedir.

Çizelge 2.3 Avrupa ve Kuzey Amerika için benzerlikler ve farklılıklar [4]

	Kuzey Amerika	Avrupa
Ekip Kategorisi	Bir kategoride yer alan ekip başka bir kategorideki ekibin yerin tutamayacağı için, problem ekip kategorisine göre ayrılır.	
Filo	Kokpit personeli için problem filo tipine göre ayrılır. Kabin personeli birden fazla uçağı kullanma yetkisi olduğu için, kabin ekibi için problemi filo tipine göre ayırma zorunluluğı yoktur.	
Şebeke Yapısı	Merkez ve taşra şebeke yapısı Birçok bağlantıyı mümkün kılan uçuş çizelgesi yapısı	Daha az yapısaldir
Kurallar ve Düzenlemeler	FAA kuralları önemlidir.	Sık sık değişen karmaşık toplu sözleşme kuralları önemlidir.
Uçuş Çizelgesi Düzeni	Pazartesi'nden Cuma'ya kadar aynı uçuş çizelgesi, hafta sonları ise indirgenmiş uçuş çizelgesi kullanılır.	Günden güne farklılık vardır.
Maliyet Yapısı	Ödemeler kredili saat başına yapılır.	Sabit ücret ödenir.

2.1.3 Ekip eşleme problemi için günlük, haftalık ve tam zamanlı problemler

Ekip eşleme problemi, günlük, haftalık ve tam zamanlı problemler olmak üzere 3 farklı Şekilde incelenmektedir [4]:

Günlük Problem: Günlük problem, uçuş planının her gün aynı olduğu varsayımına dayanır ve literatürde yapılan hemen hemen bütün araŐtırmalar bu problem üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu noktada yapılan en kesin varsayım, iyi bir günlük czm elde etmenin problemin en zor safhası olmasıdır.

Günlük problemin czm, bir ya da daha fazla günde her uçuş ayağını kapsayan belli sayıda ekip eşlemesinden meydana gelmektedir. Bu czm kendini her gün tekrar eder ve tüm günlerdeki bütün uçuş ayaklarını kapsayan tam zamanlı czmler üretilir.

Haftalık Problem: Haftalık problem, uçuş planının her hafta kendini tekrarladığı varsayımına dayanmaktadır. Burada ekip eşlemeleri, bir haftadaki tüm uçuş ayakları bir ekip eşlemesi tarafından kapsanacak Şekilde oluşturulmalıdır.

Tam zamanlı Problem: Tam zamanlı bir czm oluşturmak için haftalar arasındaki farklılıklar göz önünde bulundurulmalıdır. Bu deĐiŐkenliĐin sebebi uçuş czelgesinin deĐiŐmesi ve tatillerdir.

Değişen taleplere bağlı olarak havayolu Şirketleri uçuş czelgelerini yıl içerisinde birçok kez deĐiŐtirmektedirler. Czelgeye yeni uçuşlar eklenebilir ya da çıkartılabilir. Bu durum da haftalık czmn uygunluğunu bozmaktadır. Havayolu Şirketleri arasındaki büyük rekabet ve hızlı bir Şekilde yeniden czelgeleme yeteneğine sahip bilgisayar tabanlı sistemlerin geliŐmesi sayesinde gelecekte uçuş planlarının sürekli deĐiŐmesi olasıdır. Bu da tam zamanlı problemleri kullanıŐsız olduğunu ortaya çıkarmaktadır.

2.1.4 Ekip eşleme probleminin çözümünün zor ve karmaşık olmasının nedenleri

a) Bir ekip eşlemesinin uygun olup olmadığını belirtilen kurallar karmaşık yapıdadır. Bu kurallar genellikle FAA kuralları ve toplu iş sözleşmeleri kurallarıdır.

Örnek olarak, büyük bir Amerikan havayolu şirketi için uçuş görevi kuralları şu şekildedir: Seyahat süresi en fazla 4 gündür, uçuş görev süresi en fazla 8 saattir, birbirini takip eden iki uçuş arasında 40 dakika olmalıdır.

Daha karmaşık olan bazı kurallar ise şu şekilde özetlenebilir: 24 saatlik bir ekip eşlemesi içinde 8 saat uçan bir uçucu ekibin her bir üyesine bir sonraki uçuş görev süresi başlamadan önce ayrı ayrı en az 540 dakika dinlenme süresi verilir. Gereken durumlarda ise bu süre 510 dakikaya azaltılabilir, ancak bu durumda bir sonraki dinlenme süresi en az 630 dakika olmalıdır.

b) Bir ekip eşlemesinin maliyet hesabı karmaşıktır ve doğrusal yapıda olmayan birçok bileşenden oluşur. Maliyetin büyük bir bölümü ekibe yapılan ödemedir. Bu ödeme uçuş süresine bağlı olduğu kadar, uçuş görev süresine ve ekip eşlemesinin kaç günlük planlandığına da bağlıdır. Aynı zamanda maliyet, otel masrafları ve günlük giderleri de içermektedir.

c) Uygun olabilecek ekip eşlemesi sayısı çok fazla olduğundan, tüm uygun ekip eşlemelerinin oluşturulması pratik bir yöntem değildir.

Çizelge 2.4, farklı filo tipleri için en fazla 3 ya da 4 günden oluşan olası uygun ekip eşlemeleri sayısını göstermektedir. Aşağıdaki çizelgeden görülebileceği gibi, 1152 uçuş ayağı olan AAS80 tipi filo ve 12 havaalanı bulunan bir problemde tek günlük planlanan ekip eşlemelerinin, yani uçuş görevlerinin sayısı 690.000 iken, 3 günlük planlanan ekip eşlemelerinin sayısı 48,400 milyona kadar çıkmaktadır. Bu örnekten problemin zorluğu açıkça görülmektedir [22].

Çizelge 2.4 Problem büyüklüğü [22]

Filo Tipi	Gün sayısı	Uçuş ayağı sayısı	Üs Sayısı	Uçuş Görevi Sayısı	Ekip eşlemesi Sayısı (milyon)
AAS80	3	1152	12	690,000	48,400
AA757	3	251	15	7,000	1
AA727	3	375	11	31,000	36
AAF10	4	307	3	55,000	63,200
UA737	4	773	7	568,000	100,000,000
USDC9	4	478	4	562,000	105,000,000

2.2 En İyi Ekip Eşlemesi Kümesinin Seçilmesi

Ekip eşlemesi kümesinin seçilmesi problemi literatürde, küme kapsama ya da küme ayrıştırma problemi olarak modellenmektedir. Küme ayrıştırma probleminde amaç, bir uçuş sadece bir eşleme tarafından kapsanacak şekilde en düşük maliyete sahip ve tüm uçuşları içeren eşlemeleri bulmaktır [23]. Küme ayrıştırma tabanlı yaklaşımlar, değişken tanımlarına karmaşık kısıtların eklenebilmesine imkan vermeleri nedeni ile tercih edilmektedir.

En iyi ekip eşlemesi kümesinin belirlenmesi problemi için oluşturulan en iyileme modeli, uygun ekip eşlemeleri kümesinin ve maliyetlerinin bilindiği varsayımı ile kurulmaktadır [4].

En iyi ekip eşlemesi kümesinin belirlenmesi problemi için Küme Ayrıştırma Modeli aşağıdaki gibidir:

Kısıtlar:

$$\sum_{p \in P} \delta_{fp} x_p = 1 \quad \forall f \in F \quad (2.2)$$

$$x_p \in \{0, 1\} \quad \forall p \in P \quad (2.3)$$

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{enk} \sum_{p \in P} c_p x_p \quad (2.4)$$

Yukarıdaki formülasyonda x_p karar değişkenidir ve aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$x_p = \begin{cases} 1 & \text{eğer eşleme } p \text{ seçilmişse} \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

Parametreler:

c_p = p eşlemesinin maliyeti

$$\delta_{fp} = \begin{cases} 1 & \text{eğer uçuş } f \text{ eşleme } p \text{ tarafından kapsanıyorsa} \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

Amaç seçilen ekip eşlemesi kümesinin maliyetini en küçüklemektir. Kısıtlar (2.2) ve (2.3) ise her f uçuşu için, o uçuşu içeren sadece bir eşleme seçilmesini sağlar.

Küme ayrıştırma tipi modelin çözümünde karşılaşılan en büyük sorun, küçük boyutlu problemler için bile oluşturulabilen uygun ekip eşlemesi sayısının çok fazla olmasıdır. 71 uçuş ayağı olan bir problem için 250.000 ekip eşlemesi oluşturulabilmektedir. Yüzlerce uçuş ayağı olan günlük büyük ölçekli problemlerde oluşturulan ekip eşlemesinin sayısı milyarları bulmaktadır. Bu problem, ancak ekip eşlemeleri kümesinin bir alt kümesini $P' \subset P$ ele almakla aşılabilir. Ekip eşlemelerinin yaratılması ve küme ayrıştırma problemi tekrarlı yapı ile çözülür. Küme ayrıştırma probleminin her tekrarında P' ekip eşlemesi kümesinin en iyi çözümü seçilir. Her yeni nesil yaratımı tekrarında ise yeni ekip eşlemeleri oluşturulur ve P' kümesine dahil edilir. P' kümesindeki bazı eski eşlemeler silinir, ancak küme ayrıştırma probleminin son çözümünde kullanılan eşlemeler korunur [4]. Dolayısıyla tekrarlar sırasında çözümün kötüleşmesi engellenmiş olur. Bazı durumlarda kısıt (2.2)

$$\sum_{p \in P} \delta_{fp} x_p \geq 1 \quad \forall f \in F \quad (2.5)$$

olarak değiştirilir. Böylece problem “küme kapsama problemine” dönüşmüş olur. Kısıt (2.5) bir uçuşun birden fazla kez kapsanmasına izin verir.

Problemi “küme ayrıştırma problemi” yerine “küme kapsama problemi” olarak modellemek ekiplerin bazı uçuşlarda yolcu olarak seyahat etmesine izin vermek anlamına gelmektedir. Bu kabul edilebilir bir durumdur ve hatta problemi uçuş başına bir ekip kullanmaya zorlamaktan daha iyi sonuçlara götürebilir. Bunun ötesinde, her uçuş sadece bir kez kapsanmalıdır kısıtına uyan uygun çözümler bulunmaması da olasıdır [14].

2.3 Ekip Eşleme Problemi İçin Kullanılan Çözüm Yöntemleri ve Kaynak Taraması

Havayolu ekip planlama konusunda ilk kapsamlı literatür araştırmaları Arabeyre et al., [24], Etschmaier and Mathaisel, [25], Gershkoff, [26] tarafından yapılmıştır. Ekip eşleme probleminin çözümü için literatürde kullanılan yaklaşımlar aşağıda açıklanmaktadır [1].

2.3.1 Ekip eşlemesi oluşturma yaklaşımları

2.3.1.1 Satır yaklaşımı

Ekip eşlemelerinin oluşturulması probleminin başlangıç uygun çözümünü oluşturmak için yapılan ilk uygulamalardan bir tanesi yerel eniyileme metodudur. Bu tip çözüm yöntemlerinde, genellikle benzer problemlerin önceki çözümlerinden elde edilen sonuçlar başlangıç çözümü olarak kullanılır. Eğer böyle bir çözüm mevcut değil ise, başlangıç uygun çözümü bulmak için etkin sezgisel yöntemler kullanılabilir. Burada belirtmelidir ki, maliyeti yüksek olan bir başlangıç çözümde her uçuş ayağı başına bir ekip kullanılacaktır. Bu yaklaşımda, mevcut ekip eşlemesi çözümlerinin arasından rassal olarak az sayıda ekip eşlemesi seçilir. Seçilen ekip eşlemelerinin kapsadığı uçuş ayaklarından üretilebilecek tüm olası uygun ekip eşlemeleri alt problemi oluşturur ve küme ayrıştırma problemi ile alt problem için bir tam sayılı en iyi çözüm hesaplanır. Alt problemin tam sayılı en iyi çözümü, alt problemin bir önceki çözümünden daha kötü olamayacağı için bu çözüm bir sonraki tekrara taşınır. Çünkü, alt problemin en iyi sütunları (ekip eşlemeleri), yine kendisinden üretilmiş olan sütun kümesi ile yer değiştirilir. Yeni tekrarda eniyileycinin çözeceği yeni bir alt problem yaratmak için sütunların rassal

seçimi bir sonraki tekrarda başlar. Bu süreç, önceden belirlenmiş bir süre geçene kadar ya da birçok tekrar sonunda amaç fonksiyonun değerinde bir iyileşme sağlanamayana kadar devam eder. Yerel arama metodunun dezavantajı yerel en küçük noktalara takılabilesidir. Çözümü yerel en küçük noktalardan kurtarmak için bazı sezgisel yöntemler kullanılmaktadır. Anbil et al., [27], 5 milyondan fazla sütun ile çalışabilen ve yerel arama yaklaşımına büyük katkıları olan bir metod önermiştir. Houses and Elmroth [28], da tekrarlı yapıda bir algoritma önermiştir. Ancak bu tekrarlı yaklaşımların genel yakınsamayı sağlayıp sağlamadığı çok net değildir.

Ekip eşleme konusunda satır yaklaşımına dayalı çalışmalar yapan araştırmacılar, Anbil et al., [7], Baker et al.,[29], Ball and Roberts [30], Etschmaier and Mathaisel, [25], Gershkoff [26], Graves et al., [9] ve Rubin [31] 'dir. United Airlines da dahil olmak üzere bir çok büyük havayolu şirketi tarafından kullanılan TPACS system (Rubin [29]), American Airlines ve Continental Airlines tarafından kullanılan TRIP system (Anbil et all, [7]) ve ALLPS (Gerbract [32]) sistemleri de ekip eşlemesi oluşturma problemini, bu prosedürü kullanarak çözmektedir.

2.3.1.2 Sütun üretme yaklaşımı

Problem ana problem ve alt problem olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. En iyi çözüme ulaşılanaya kadar ana problem ve alt problem tekrar tekrar çözülür.

Süreç, ana problemin oluşturulması ile başlar ve daha sonra ekip eşlemelerine karşılık gelen başlangıç sütunları ile ana problem çözülür. Ana problemin çözümünün uygun olması için, başlangıç sütunları yeterli sayıda olmalıdır. Ekip eşleme probleminde sütun yaklaşımı uygulanırken, ana problem küme kapsama ya da küme ayrıştırma problemi olarak modellenir.

İlk problem çözüldükten sonra, eldeki mevcut çözüme ait ikil değişkenler alt probleme gönderilir. Ekip eşleme probleminde, alt problem "en kısa yol problemi" olarak çözülür. Ana problemin ikil değişkenleri, alt problemin amaç fonksiyonunda ayrıtların maliyet hesabında kullanılır. Bu amaç fonksiyonu kullanılarak çözülen alt problemin çözümü, yeni üretilen sütun olarak ana probleme gönderilir.

Yeni sütun ana probleme eklenir ve problem eldeki yeni sütunlarla tekrar çözülür. Yeni ikil değişkenler hesaplanır.

Bu süreç bir durma koşulu sağlanıncaya ya da yeni bir çözüm bulunamayana kadar devam eder.

Sütun yaklaşımı literatürde, havayolu planlama probleminin filo atama, uçak rotalama, ekip eşleme, ekip atama problemlerinin çözümünde kullanılmıştır. Yan ve Chang [20], gerçek hayat verileri kullanarak, kokpit personeli için uygun ekip eşlemeleri oluşturan ve kokpit ekip maliyetlerini en küçükmeye çalışan bir model ve iki ekip çizelgeleme şebekesi geliştirmiştir. Bu problemleri çözmek için sütun yaklaşımı tabanlı algoritmalar kullanmıştır. Desaulniers et al., [33], yeni tip kısıtların eklenmesiyle, ekip eşleme ve filo atama problemlerini birlikte çözebilen sütun tabanlı bir algoritma geliştirmiştir. Stojkovic et al., [34], ekip planlama problemini küme ayrıştırma problemi olarak modellemiş ve dal-sınır arama ağacı içinde sütun yaklaşımı kullanmıştır. Vance et al., [35], ekip eşleme problemi için en iyi çözüme yakın çözümler üreten bir yöntem bilim geliştirmiştir. Bu yöntem bilim, özel bir dal-sınır prosedürü ile dinamik sütun yaklaşımını birlikte kullanmakta ve arama ağacının her düğümünde sütun üretimi algoritmasını çalıştırmaktadır.

2.3.1.3 Şebeke yaklaşımı

Son zamanlarda birçok ekip eşleme sistemi, uygun ekip eşlemesi oluşturmak için şebeke yaklaşımı kullanmaya başlamıştır. Şebeke yaklaşımı, uçuş ayakları ya da uçuş görev şebekelerinden sütunların üretildiği bir sütun yaklaşımıdır. Bu yaklaşım ilk olarak Lavoie et al., [36], tarafından kullanılmıştır.

Şebeke yapısında, ayrıtlar uçuş çizelgesindeki uçuş ayaklarını göstermektedir. Dinlenme süreleri ve molalar da yine ayrıtlar ile temsil edilir. Ayrıtların maliyeti, ayrıtta harcanan süre ile ilişkili ve doğrusaldır. Böyle bir şebekede, ana üstte başlayıp ana üstte biten yollar oluşturularak tüm uygun ekip eşlemeleri üretilebilir. Bu yol üzerindeki herhangi iki uçuş ayağı için, ikinci uçuşun kalkış saati ilk uçuşun varış saatinden sonra olmalıdır kısıtı sağlanmalıdır. Ayrıca ekip eşlemesinin uygun olması için gerekli tüm kısıtlara uyulmalıdır.

Uygun ekip eşlemeleri Dantzig-Wolfe sütun üretme tekniği ile de üretilebilir [37]. Az sayıda ekip eşlemesinden oluşan alt problem çözülürken, ekip eşlemelerinin uçuş ayaklarına karşılık gelen ikil değişkenler kullanılır. Diğer tekrarlarda ilave (ek) sütunlar seçilir. Yukarıda açıklanan şebekede, en kısa yol problemi çözülerek uygun ekip eşlemeleri oluşturulur. Eğer en kısa yola karşılık gelen ve ekip üssünden başlayıp ekip üssünde sonlanan uygun bir ekip eşlemesi, negatif indirgenmiş maliyete sahip ise bir sonraki alt probleme dahil edilmek üzere seçilir. Yeni doğrusal programlamanın maliyeti bir öncekine göre daha iyidir. En kısa yolda, negatif indirgenmiş maliyetli hiçbir ekip eşlemesi yoksa prosedür sonlanır. Bu noktada, doğrusal programın mevcut çözümü eniyidir.

Barnhart et al., [38], uzun mesafeli ekip eşleme problemleri (long-haul crew pairing problem) için şebeke yapısını etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Desaulniers et al., [12], Air France havayolu ekip eşleme sistemi için şebeke yaklaşımını kullanmıştır. Kısa mesafeli ekip eşleme problemlerinde (short-haul crew pairing problem), uçuş ayaklarından oluşan şebeke yapısı yerine uçuş görevlerinden oluşan şebeke yapısı kullanılabilir (Anbil et al., [22], Chu et al., [39], Desrosiers et al., [40], Lavoie et al., [36], Vance et al., [41]).

2.3.2 En iyi ekip eşlemesi kümesi seçme yaklaşımları

2.3.2.1 TPACS / TRIP yaklaşımı

Havayolu Ekip Planlama için ekip eşleme (Trip Pairing for Airline Crew Scheduling (TPACS)), Rubin [42, 31] tarafından geliştirilmiş etkin bir çözüm yöntemidir. TPACS, birçok büyük ölçekli havayolu şirketi tarafından kullanılmaktadır. Bu yöntem ile daha önceden geliştirilmiş olan çizelgeleme metotlarında ilerleme sağlanmış ve havayollarının operasyonel maliyetlerinde önemli ölçüde tasarruf sağlanmıştır. Ekip eşlemesi yeniden değerlendirme ve geliştirme programı (Trip Re-evaluation and Improvement Program(TRIP)), TPACS tabanlı bir programdır. TRIP prosedürü, başlangıç ekip eşlemesi kümesi ile başlar, satır yaklaşımı kullanarak alt problem üretir ve çözümü tekrarlı olarak geliştirir. Her tekrarda, 5 uçuş turu seçilir ve seçilen uçuş turlarının içerdiği tüm uçuş ayaklarını kapsayan

bütün uygun ekip eşlemeleri üretilir. Böylece küme ayrıştırma problemi için bir alt problem üretilir. Daha sonra küme ayrıştırma problemi çözülür.

Yıllar içerisinde, ekip eşleme probleminin çözümünde kullanılan en başarılı yöntemlerden biri olması amacıyla TRIP yöntemine birçok katkı yapılmıştır Anbil et al., [27]. Bugün kullanılan TRIP çözümleri daha önceki uyarlamalarına göre çok daha hızlı sonuç vermektedir.

Günümüzde TRIP bir saniye içerisinde 5000'den fazla ekip eşlemesi üretebilmekte ve 10000'den fazla sütun içeren alt problemleri sütun perdeleme tekniği (column screening techniques) kullanarak kolaylıkla çözebilmektedir. Bu yaklaşımın arkasındaki temel fikir, belirli bir eşik değerinin altında indirgenmiş maliyeti olan ekip eşlemelerini dikkate almaktır. İndirgenmiş maliyetler, sezgisel bir yöntem olan Lagrange gevşetme ile etkin şekilde hesaplanır. TRIP, American Airlines şirketi tarafından, küçük çaptaki filolar için global en iyi çözümü bulmakta, daha büyük çaptakiler içinse en iyi çözüme yakın çözümler bulmakta kullanılmıştır.

ALLPS sistemi de (Gebracht [32]), Northwest Airlines şirketi tarafından kullanılmış TRIP'e benzer bir yaklaşımdır.

2.3.2.2 Doğrusal programlama algoritmaları

2.3.2.2.1 SPRINT

Büyük boyutlu ekip eşleme problemlerinin doğrusal programlama gevşetmesi ile çözümü zaman alıcıdır. Bu nedenle, büyük ölçekli doğrusal programlama problemlerinin hızlı çözümü için SPRINT adı verilen metot geliştirilmiştir (Forrest [43]). SPRINT metot kullanılarak, yaklaşık 850 uçuş ayağı ve 5.5 milyon uygun ekip eşlemesinin doğrusal programlama gevşetmesi geleneksel yöntemlere göre çok daha hızlı çözülebilmektedir.

Bu algoritma, büyük ölçekli doğrusal programın en iyi çözümünü bulmak için, bir dizi daha küçük doğrusal programı çözme esasına dayanmaktadır. SPRINT metotta, problemin sütunlarının küçük bir alt kümesi seçilir ve doğrusal

programlama bu alt problem için çözümlür. Orijinal problemin bütün sütunlarının maliyetleri en iyi ikil çözüm kullanılarak hesaplanır. Mevcut çözüm orijinal problemin en iyi çözümü değil ise, bu durum negatif indirgenmiş maliyetli sütunlar bulunduğuna işaretler. Temeldeki sütunlar korunarak yeni bir problem elde edilir ve indirgenmiş maliyeti sıfır olan sütunların küçük bir alt kümesi eklenir. Bu işlem için “bucket” veri yapısı kullanılır. Yeni sütunlar, indirgenmiş maliyetlerine bakılarak en iyi “bucket” lardan seçilerek eklenir. Orijinal problemde en iyi çözüme ulaşılan kadar bu süreç devam ettirilir.

2.3.3.2.2. Volume algoritması

Barahona and Anbil [44] tarafından geliştirilen bu algoritma “Subgradient” algoritmasının bir uzantısıdır. Bu algoritma, ikil çözümlerin yanı sıra asıl çözümleri de üretir. Subgradient algoritması büyük ölçekli doğrusal programların alt sınırlanmalarını başarıyla ürettiği bilinen bir algoritmadır (Held and Karp [45], Held et al., [46]). En iyi ikil çözüme hızlı yakınsayan çözümler üretmede kullanılabilir. Asıl çözüm, aylıklığın tamamlayıcı koşulları ya da tümeleşik metotlar kullanılarak elde edilebilir. Subgradient metodu kullanarak asıl çözüm için sonuç elde eden bazı araştırmacılar Larzon et al., [47] ’dur.

Volume algoritması, asıl ve ikil çözümlere yakınsayan çözümler üretir. Bu çözümler, asıl ve ikil çözümleri elde etmede kullanıldığı gibi kesin sonuç veren çözümler elde eden metotlar için de kullanılır. Algoritmanın tekrar başına düşen hesaplama maliyeti de düşüktür. Büyük ölçekli küme ayrıştırma ve küme kapsama gibi doğrusal programlama problemlerinin çözümünde başarılı olduğu bilinmektedir.

Yapılan çalışmalar, ikil simpleks metotla birlikte kullanılan volume algoritmasının, büyük ölçekli küme ayrıştırma problemlerinin doğrusal programlama gevşetmesi ile çözümünde başarılı olduğunu göstermiştir. Bu iki algoritma birlikte kullanıldığında Barahona and Anbil [44], 2504 satır ve 50722 sütuna sahip bir hava yolu ekip planlama probleminin küme ayrıştırma problemini, ikil simpleks algoritmasına göre 20 kat daha hızlı çözdüğü görülmüştür. Volume algoritmasının bir uygulaması, US Airways ve Southwest Airlines havayolları için IBM tarafından

geliştirilen ekip eşleme sisteminin çözümünde, doğrusal programları çözen bir alt modül olarak başarı ile kullanılmıştır (Anbil et al., [22]).

2.3.2.3 Tamsayılı programlama yöntemleri

2.3.2.3.1 Dallandır - Kes (Branch-and-Cut)

Bu tür metotlar, çok çeşitli tamsayı programlama problemlerinin çözümünde başarılı olmakla birlikte, en iyi çözüme ulaşmayı da garanti etmektedirler. Kesin çözüm bulan algoritmalar ve Dal-Sınır algoritması ile kesen düzlem metodunun bir birleşimidir.

Bu yaklaşımın, en iyi ekip eşlemesi kümesinin bulunması problemi gibi büyük boyutlu küme ayrıştırma problemlerinde en iyi çözümü bulduğu kanıtlanmıştır (Hoffmann and Padberg [48]). Hoffmann ve Padberg tarafından geliştirilen bu yaklaşım, 1000 satır ve 1.05 milyon değişkene kadar olan ekip eşleme probleminin en iyi çözümünü bulmak için kullanılmıştır. Ekip eşleme problemini çözen çoğu yaklaşım, problemin modelinde yer kısıtlarını dikkate almazken, bu yöntem yer kısıtlarını da dikkate alarak en iyi çözümü elde edebilmektedir.

Hoffmann ve Padberg tarafından geliştirilen Dallandır-Kes çözücüsü, 5 bileşenden oluşmaktadır: Kullanıcı destekli gösterimi işletip daraltan bir Dallandır-Kes en iyileycisi, doğrusal programlama çözücüsü, tamsayılı uygun çözümlere ulaşmayı sağlayan bir sezgisel ve doğrusal programlama gevşetmesini daraltan bir kesme üretim prosedürü ve arama ağacını belirleyen bir dallandırma stratejisidir.

2.3.2.3.2 Dal - Fiyat (Branch-and-Price)

Dal-Fiyat yöntemi, Dallandır-Kes tekniğinde olduğu gibi satır ve kısıt üretmek yerine dinamik olarak sütun üretmek üzerine odaklanmıştır. Barnhart et al., [49], bu metotları özetleyen bir çalışma yapmıştır ve Desrochers et al., [50], Dal-Fiyat metodunun ekip eşleme ve çizelgeleme uygulamalarında nasıl kullanılacağını göstermiştir.

Bu teknikte, sütun kümeleri doğrusal programlama gevşetmesinin dışında bırakılmıştır, çünkü sütun sayısı çok fazladır ve en iyi çözümde sütunların birçoğuna karşılık gelen değişkenlerin değerleri sıfırdır. Alt problem, temele girecek olan sütunları belirlemeye yarayan, ikil doğrusal programlama için bir ayırma problemidir. Temele girmeye aday sütun varsa, tekrar doğrusal programlama ile eniyileme yapılır, aksi takdirde eldeki çözümün en iyidir. Doğrusal programlama sonucunda elde edilen çözüm integral (tümlev) değilse, dallandırma meydana gelir.

Bu teknik, ekip eşleme probleminde en iyiye yakın tamsayılı çözüm bulmak için sezgisel bir yöntemle birlikte kullanılmıştır Vance et al., [35]. Ekip eşlemeleri, uçuş görev şebekesi kullanılarak üretilmiştir. Şebekede her olası uçuş görevi için bir ayır vardır ve ayrıtlar uçuş görevleri arasındaki olası dinlenme sürelerini göstermektedir. Ekip eşlemeleri, şebeke üzerinde çok etiketli en kısa yol yaklaşımı (multi-label shortest path) kullanılarak üretilmektedir. Dal-Sınır ağacındaki düğümlerde, küme ayrıştırma problemleri için dallandırma kuralı kullanılır.

Eğer değişkenler ve kesme düzlemi, Dal-Sınıra dayalı doğrusal programlama süresince dinamik olarak üretiliyorsa, bu teknik Dallandır-Kes-Fiyatla (branch-and-cut-and-price(BCP)) şeklinde adlandırılır (Ralps et al., [51]). Bu teknik, IBM tarafından geliştirilen ekip eşleme çözücüsü tarafından kullanılmaktadır (Anbil et al., [22]).

2.3.2.3.3 Paralleleştirme

Ticari amaçlı ekip eşleme çözücülerinin büyük birçoğu, Dallandır-Kes ve Dal-Fiyat tekniklerini paralel olarak kullanmaktadır (Ralps et al., [51]). Bu teknikler, değişkenleri ve kısıtları dinamik olarak üretmesinden dolayı etkili bir yöntemdir ve yeni alt problemlerin üretiminde yapılan dallandırma işlemlerinin ayrıştırılması nedeni ile de paralelleştirme yapısına uygundur.

Panayiotis et al., [52]; Fisher [53] ve Wedelin [54] tarafından ekip planlama problemi için geliştirilmiş Lagrange gevşetmesine dayalı bir paralelleştirme algoritması geliştirmiştir. Bu yöntem, bugün birçok Avrupa havayolu şirketi

tarafından kullanılan Carmen ekip planlama çözücüsünde (Carmen Systems [55]) uygulanmaktadır.

2.3.2.4 Diğer yöntemler

Büyük ölçekli 0-1 tamsayılı problemleri çözmek için Wedelin [54] tarafından geliştirilen yakınsama algoritması, en iyi ekip eşlemesi kümesi seçilmesi problemini etkin şekilde çözmek için kullanılmıştır. Bu algoritma, bir dizi doğrusal programlama problemini çözmek yerine 0-1 tamsayılı küme ayrıştırma problemini çözmektedir.

Desaulniers et al., [12] tarafından, en iyi ekip eşlemesi kümesi seçilmesi problemini çözmek için tam sayılı doğrusal olmayan çoklu-ürün şebekesi akış modeli kullanılmıştır. Bu model, doğrusal olmayan maliyetleri ve çok sayıda kısıtı içermektedir. Dantzig-Wolfe ayrıştırma prensibine (Dantzig ve Wolfe [37]) dayanan bir Dal-Sınır algoritmasıdır.

Dayanıklı ekip eşleme problemi ise Ehrgott and Ryan [56] tarafından gecikmelerin en küçüklenmesini sağlayacak bir model ile etkin şekilde çözülmüştür. Model, gecikme meydana gelmesi durumunda hazırlık için ekip personeline yeterli süre kalmıyorsa, ekibin uçak değiştirmemesi esasına dayanır. En iyi ekip eşlemesinin belirlenmesi için kurulan küme ayrıştırma modeli, maliyeti en küçükleme ve dayanıklı olmayan eşlemelerin cezalandırılmasına dayanan çok amaçlı bir fonksiyon kullanmaktadır.

Literatürde, havayolu planlama probleminin birbiriyle ilişkili aşamalarını birlikte çözen çalışmalar vardır. Klabjan et al., [57], filo atama, uçak rotalama ve ekip eşleme problemlerini kısmi olarak birleştiren ve bu üç probleme aynı anda çözüm üreten bir model geliştirmiştir. Model çözümü için iki ayrı yöntem kullanılmıştır. Bunlardan ilki, Lagrange gevşetme ve sütun üretme tekniğine dayanırken, diğeri Benders ayrıştırma tekniğine dayanmaktadır [21].

Barnhart et al., [58], filo atama ve ekip eşleme problemlerini kısmi olarak birlikte çözen bir model geliştirmiştir. Geliştirilen modelin dezavantajı, kısıt sayısına bağlı

olarak çözümün zor olması ve ekip eşlemelerinin uçuş görevlerine yakınsamasıdır. Barnhart et al., [59], filo atama ve uçak rotalama problemlerini birlikte çözmüştür. Desaulniers et al., [12], filo atama ve zaman penceresi problemlerini birlikte ele alan bir model geliştirmiştir. Bu model yer kısıtlarını içeren bir küme ayrıştırma modelidir.

Cordeau et al., [60] ve Mercier et al., [61], ekip eşleme ve uçak rotalama problemlerini tam olarak birlikte çözen bir model geliştirmiş ve modeli, Dal-Fiyat algoritması ve Benders ayrıştırma tekniği ile çözmüştür. Cohn and Barnhart et al., [62], uçak rotalama ve ekip eşleme problemlerini birlikte çözerken, her uygun ekip eşlemesini bir sütun olarak modellemiştir [21].

2.3.3 Sezgisel yöntemler

Literatürde, ekip planlama probleminin çözümü için geliştirilen sezgisel algoritma sayısı çok azdır. Geliştirilen algoritmalar ise ekip planlama probleminin en iyi ekip eşlemelerinin bulunması için küme kapsama ya da küme ayrıştırma probleminin çözümü üzerine odaklanmıştır. Bu problemlerin çözümü için ise sezgisel bir yöntem olan Genetik Algoritma (GA) tekniği kullanılmıştır.

Genetik algoritmalar, Darwin'in "en iyi olan yaşar (survival of the fittest)" prensibine dayalı olarak biyolojik sistemlerin gelişim sürecini simüle eder. İlk defa Holland [63] tarafından önerilmiştir [64]. GA, sezgisel bir metod olduğundan dolayı verilen bir problem için en iyi sonucu bulamayabilir. Ancak, bilinen metotlarla çözülemeyen ya da çözüm zamanı problemin büyüklüğü ile üstel artan problemlerde en iyi sonuca çok yakın çözümler vermektedir.

Chu ve Beasley [65], küme ayrıştırma problemini çözmek için denge durumu (steady-state) genetik algoritma tabanlı sezgisel bir yöntem geliştirmiştir. Algoritmanın performansı, havayolu endüstrisinden elde edilen 55 adet gerçek hayat problemi üzerinde sınanmıştır. Kromozomlar, 0-1 kodlama yapısı ile gösterilmektedir ve kromozomun uzunluğu küme ayrıştırma probleminin sütun (ekip eşlemesi) sayısına karşılık gelmektedir. i . genin 1 olması, i . sütunun çözümde yer alması anlamına gelmektedir. Kromozomun uygunluk değeri, iki ayrı

kısmı ayrılarak hesaplanmaktadır. Uniform çaprazlama operatörü kullanılmış ve dinamik ve statik olmak üzere iki tip mutasyon yapılmıştır. Çaprazlama ve mutasyon sonucu meydana gelen uygun olmayan çözümleri uygun hale getirmek için sezgisel bir uygunluk operatörü geliştirilmiştir. En iyi uygunluk adı verilen seçim mekanizması kullanılarak, çözüm kalitesi ve uygunluğu dikkate alınmıştır. Chu and Beasley (1998), farklı yapıda ceza fonksiyonu ve genetik algoritma operatörleri kullanarak daha önce önermiş oldukları GA algoritmasını geliştirmiştir.

Levine [66], küme ayrıştırma problemini çözmek için karma bir genetik algoritma önermiştir. Algoritmanın performansı, havayolu endüstrisinden elde edilen 40 adet gerçek hayat problemi üzerinde sınanmıştır. Kromozomlar, 0-1 kodlama yapısı ile gösterilmektedir ve kromozomun uzunluğu, küme ayrıştırma probleminin sütun (ekip eşlemesi) sayısına karşılık gelmektedir. i . genin 1 olması, i . sütunun çözümde bulunduğu anlamına gelmektedir. Kromozomun uygunluk değeri doğrusal ceza fonksiyonu kullanılarak hesaplanmıştır. Turnuva seçim mekanizması kullanılmıştır. İki noktalı çaprazlama operatörü kullanılmıştır. n dizi uzunluğunu temsil etmekte iken $1/n$ olasılıkla bir gene mutasyon uygulanmaktadır. Denge durumu (steady-state) genetik algoritma kullanılmaktadır. Ancak bu yapı, en iyi çözümleri, özellikle de en iyi uygun çözümleri bulmayı garanti etmediği için, genetik algoritma, ROW adı verilen bir yerel arama metodu ile birlikte kullanılarak en iyi ya da en iyiye yakın sonuçlar elde edilmesi sağlanmıştır.

Kornilakis and Stamatopoulos [14], ekip eşlemelerinin oluşturulması problemini iki aşamada çözmüştür. Öncelikle uçuş çizelgesi girdi olarak alınarak, derinliğine arama algoritması ile uçuş görevleri oluşturulmuştur. İkinci aşamada ise, birinci aşamada elde edilen yasal kısıtları sağlayan en iyi belli sayıda uçuş görevinden, yine derinliğine arama algoritması kullanılarak ekip eşlemeleri oluşturulmaktadır. Elde edilen ekip eşlemeleri arasından en iyi ekip eşlemesi kümesini seçme problemi ise küme kapsama problemi için geliştirilen genetik algoritma ile çözülmektedir.

Özdemir and Mohan [67], düğümler uçuşları, ayrıtlar ise uçuşlar arasındaki bağlantı kısıtlarını gösterecek şekilde oluşturulan bir şebeke yapısı tabanlı denge durumu (steady-state) genetik algoritma geliştirmiştir. Her dizi, bir ekip için olası

yasal bir çizelgeyi temsil etmektedir. Kromozomlar uçuş numaralarını ifade eden gerçel sayı kodlaması ile gösterilmektedir. Üç tip yeniden üretim operatörü kullanılmıştır. Mutasyon ve yeniden üretimden sonra yerel arama yöntemi kullanılmaktadır. M en fazla tekrar sayısını göstermekte iken, her M/10 tekrarda rassal olarak üretilmiş yeni kromozomları popülasyona eklemek için bir yeniden başlatma prosedürü uygulanmıştır. Geliştirilen algoritmanın, literatürdeki diğer küme kapsama problemi çözüm yöntemleri ile karşılaştırmasını yapabilmek için, internette birçok havayolu şirketinin uçuş çizelgesi elde edilerek, filo tipine göre sınıflandırılmış ve bu veriden 3 gün ve daha az süreyle planlanabilecek tüm ekip eşmeleri oluşturulmuştur.

3. GENETİK ALGORİTMA VE SÜTUN ÜRETME YAKLAŞIMI

Bu bölümde, ekip eşleme probleminin çözümü için tezde kullanılan genetik algoritma ve sütun üretme yaklaşımı ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

3.1 Genetik Algoritmalar

Genetik algoritmalar, Darwin'in "en iyi olan yaşar (survival of the fittest)" prensibine dayalı olarak biyolojik sistemlerin gelişim sürecini simüle eder. İlk defa Holland [61] tarafından önerilmiştir [64]. GA, sezgisel bir metod olduğundan dolayı verilen bir problem için en iyi sonucu bulamayabilir. Ancak, bilinen metodlara çözülemeyen ya da çözüm zamanı problemin büyüklüğü ile üstel artan problemlerde en iyi sonuca çok yakın çözümler vermektedir. Başlangıçta doğrusal olmayan eniyileme problemlerine uygulanan GA, sonraları gezgin satıcı, karesel atama, yerleşim, atölye çizelgeleme, ders/sınav programı hazırlanması, topoloji tasarımı gibi kombinatoryel eniyileme problemlerinde de başarıyla uygulanmıştır [68].

3.1.1 Temel yapısı ve işleyişi

Bir GA, yığın olarak adlandırılan mümkün çözümlerin kodlandığı dizilerin bir kümesi ile biyolojik özelliği taklit eden operatörlerin bir kümesinden oluşur. Herhangi bir problemin çözümünde kullanılan basit bir GA'nın yapısı Şekil 3.1'deki algoritma ile açıklanabilir.

Begin

t=0;

P_t başlangıç yığını oluştur;

P_t 'yi değerlendir;

while not {bitiş koşulu} do

begin

t=t+1;

P_{t-1}'den P_t'yi seç; {yeniden üretim operatörü}

P_t'yi değişime uğrat; {çaprazlama ve mutasyon operatörü}

```
        Pt'yi değerlendir;  
    end  
end
```

Şekil 3.1 Genetik algoritmaların genel yapısı

Genel yapısından görüldüğü gibi basit bir GA'nın ilk aşamasında, tüm mümkün çözümlerin alt kümesinden oluşan bir başlangıç yığını elde edilir. Yığının her elemanı (bireyi) bir dizi olarak kodlanır. Her dizi biyolojik olarak bir kromozoma eş değerdir. GA'nın herhangi bir adımındaki yığın, nesil (generation) olarak adlandırılır. Yığındaki her dizi bir uygunluk değerine (fitness value) sahiptir.

Uygunluk değeri, hangi bireyin bir sonraki yığına taşınacağını belirler. Bir dizinin uygunluk değeri, problemin amaç fonksiyonu değerine eşittir. Bir dizinin gücü, uygunluk değerine bağlı olup iyi bir dizi, problemin yapısına göre en büyükleme problemi ise yüksek, en küçükleme problemi ise düşük uygunluk değerine sahiptir [69].

GA'nın her tekrarı, yeniden üretim işlemi, genetik operatörler ve uygunluk değerlerinin hesaplanması olmak üzere 3 adımdan oluşur.

Yeniden Üretim İşlemi: Mevcut yığından gelecek yığına taşınacak dizilerin seçilmesi işlemidir. Taşınan diziler, genetik olarak mevcut yığında en uygun yapıya sahip dizilerdir. Bu işlem ile, özel genetik yapıların bir sonraki yığına taşınması sağlanır.

Genetik Operatörler: Seçim işlemi ile oluşturulan yığındaki dizilerin bir kısmına uygulanan genetik operatörler, çaprazlama ve mutasyon operatörleridir. Bu operatörler, genetik bilgileri kullanarak yeni yığının yeni dizilerini (mümkün yeni çözümleri) elde ederler. Çaprazlama operatörü, farklı diziler arasında bilgi değişimini sağlayarak yeni çözümler elde ederken, mutasyon operatörü, mevcut dizilerin bir kısmında rassal değişimi sağlayarak çözüm uzayında yeni noktalar elde etmektedir.

Uygunluk Değeri: Uygunluk değeri, yeni yığına taşınacak dizilerin belirlenmesinde kullanılan bir araçtır. Bu nedenle, algoritmanın her tekrarında yığındaki dizilerin uygunluk değeri (amaç fonksiyonu değeri) hesaplanır [70].

Bu açıklamalar doğrultusunda, herhangi bir problemin çözümünde kullanılan bir GA'nın aşağıdaki bileşenlerden oluştuğu görülmektedir:

- Yığını oluşturacak bireylerin (mümkün çözümlerin) dizi olarak gösterimi
- Başlangıç yığınının oluşturulması
- Dizilerin uygunluğunun belirlenmesi için değerlendirme fonksiyonu
- Yeniden üretim için bir seçim mekanizması
- Yeni çözümlerin elde edilmesi için genetik operatörler
- Kontrol parametreleri (çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin olasılıkları ve yığın genişliği)

3.1.2 Dizi gösterimi (kodlama)

GA' yı diğer arama metotlarından ayıran en önemli özellik, parametrenin kendisi yerine parametreleri temsil eden dizilerin kullanılmasıdır. Bu nedenle, herhangi bir probleme GA'nın uygulanmasında ilk adım, problem için arama uzayını en iyi temsil eden uygun bir kodlama yapısının seçimidir. Literatürde en yaygın kullanılan kodlama ikili düzende kodlamadır. Bu kodlamada, her dizi 0 ve 1 değerlerinden oluşmaktadır. Dizinin uzunluğu, parametre ya da parametrelerin alt ve üst sınırları arasındaki tüm noktaları temsil edecek şekilde belirlenmektedir. Alt ve üst sınırı U_{\min} ve U_{\max} olarak verilen bir parametre için dizi uzunluğu L 'dir. Bir parametredeki virgülden sonra istenen basamak sayısına hassasiyet adı verilir ve aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$\Pi = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2^L - 1} \quad (3.1)$$

Birden fazla parametreye sahip bir fonksiyon için dizi uzunluğu ise, her parametre için belirlenen dizi uzunluklarının toplamına eşittir [64]. İkili düzende kodlama çok sık kullanılan bir kodlama olmasına rağmen bazı sakıncaları vardır. Örneğin, çok değişkenli bir fonksiyonun en iyilenmesi için, değişkenlerin alt ve üst sınırlarına bağlı olarak elde edilen dizi uzunluğu çok büyük olabilmektedir. Aynı zamanda,

gezgin satıcı, çizelgeleme, karesel atama gibi kombinatoriyal en iyileme problemlerinde, ikili düzende kodlama, arama uzayını tam olarak temsil edememektedir. Bu nedenle literatürde, gerçel sayı kodlama, permütasyon ve ağaç gösterimi kodlama türleri de çok sık kullanılmaktadır [69].

3.1.3 Başlangıç yığınının oluşturulması

GA'yı diğer sezgisel arama algoritmalarından ayıran diğer önemli bir özellik ise noktadan noktaya değil, noktaların oluşturduğu bir yığın içinde aramayı gerçekleştirmesidir [64]. Bu nedenle, GA'nın ilk adımı başlangıç yığının oluşturulmasıdır. Literatürde, başlangıç yığını en basit şekilde rassal olarak oluşturulmaktadır. Ancak, özellikle kısıtlı en iyileme problemlerinde başlangıç yığının rassal oluşturulması sonucunda uygun olmayan (kısıtları sağlamayan) çözümler ortaya çıkabilmektedir. Bu durumu ortadan kaldırmak için bir yol, problem için geliştirilmiş olan sezgisel metotlardan faydalanmaktır. Literatürde, başlangıç yığının oluşturulmasında sezgisel metotlardan yararlanan çeşitli çalışmalar vardır. Örneğin, Grefenstette [71] gezgin satıcı problemi için açgözlü sezgisellerden yararlanırken, Kapsalis et al., [72] Steiner ağaç probleminde en küçük ağaç yaklaşımını, Thiel and Vass (1994), 0-1 sırt çantası probleminde ekleme-çıkarma sezgiselini, Chen et al., [73] ise çizelgeleme problemi için Campbell-Dudek-Smith ve Dannenbrig sezgisellerinden yararlanarak başlangıç yığınını oluşturmuşlardır.

3.1.4 Değerlendirme fonksiyonu

Her tekrarda, yığındaki dizilerin bir değerlendirme fonksiyonu yardımıyla uygunluk değerleri hesaplanır. Uygunluk değeri, bir sonraki yığını oluşturacak yeni aday çözümlerin elde edilmesi için mevcut yığından hangi aday çözümlerin kullanılacağıнын belirlenmesinde rol oynamaktadır. GA'da kullanılan değerlendirme fonksiyonu problemin amaç fonksiyonudur. Ancak, en küçükleme problemleri için orantılı seçim mekanizmaları kullanıldığında, uygunluk değerinin hesaplanması için amaç fonksiyonunun doğrudan kullanılması mümkün değildir. Çünkü, bu seçim mekanizmalarında uygunluğun en büyükleme ile ilgilenilmektedir.

En küçükleme problemini, en büyükleme problemine dönüştürmek için kullanılan bir yöntem; en küçükleme probleminin amaç fonksiyonunun -1 ile çarpılmasıdır. Ancak, GA' da uygunluk değerlerinin pozitif olma koşulundan dolayı bu yöntem kullanılamamaktadır. GA ile çözülen en küçükleme problemi, başlangıçta belirlenen büyük bir değerden problemin amaç fonksiyonu değeri çıkarılarak en büyükleme problemine dönüştürülür [64].

3.1.5 Yeniden üretim operatörü

Başlangıç yığını oluşturulduktan sonra algoritmanın her tekrarında, yeni yığının dizileri bir olasılıklı seçim süreci ile mevcut yığının dizileri arasından seçilir. Yüksek uygunluk değerine sahip diziler, yeni dizilerin (yeni çözümlerin) elde edilmesinde yüksek olasılığa sahiptir [74]. Bu operatör, doğal seçimi yapay olarak gerçekleştirmektedir. Doğal yığınların uygunluğu, bireyin büyümesi ve çoğalmasında engellere karşı koyma yeteneği ile belirlenir. Amaç fonksiyonunun, bir dizinin yaşaması ya da elenmesinde son karar verici olarak kullanımı ile, "Doğal Seçim" yapay olarak gerçekleştirilir.

Literatürde, yeniden üretim operatöründe kullanılan çeşitli seçim mekanizmaları vardır. Bunlardan en çok kullanılanlar Rulet Çemberi Yöntemi, Sıralama (Rank) Yöntemi, Turnuva Yöntemi, Denge Durumu Yöntemi ve Elitizm'dir. Bu yöntemler, 3.1.5.1' de detaylı olarak incelenmektedir.

3.1.5.1 Seçim Mekanizmaları

GA'da kullanılan en basit seçim mekanizması rulet çemberi (roulette wheel) metodudur. Bu metotta çember, Y eşit aralığa bölünür. Çemberdeki i. aralık yığındaki i. diziyi temsil etmektedir ve bu aralığın genişliği, bu dizinin seçilme olasılığına eşittir. Bu durumda, çemberdeki aralık genişliklerinin toplamı 1'e eşittir. Seçim aşamasında çember, Y defa çevrilir. Her çevirmede 0-1 aralığında bir sayı üretilir. Üretilen sayının düştüğü aralıktaki dizi, yeni yığına kopyalanır [64].

Rulet çemberi metodu, basit olmasına karşın bir stokastik hataya sahiptir. Bu hata, yeni yığında her dizinin beklenen kopya sayısı ile gerçekleşen kopya sayısı arasında büyük bir farkın olmasıdır. Algoritmanın her tekrarında bu örnekleme hatası artmakta ve teorik olarak tahmin edilenden çok daha farklı yönlerde aramaya devam edilmektedir. Bu olay, algoritmanın zamansız yakınsamasına sebep olabilmektedir [75].

Literatürde bu hatayı azaltmak için yapılmış çeşitli çalışmalar vardır. DeJong [76], elitist, beklenen değer, elitist beklenen değer ve “crowding metodu” gibi çeşitli seçim mekanizmaları önererek, bu mekanizmaların GA üzerindeki etkilerini incelemiştir. Brindle [77] ise çalışmasında literatürde mevcut olan ve önerdiği altı değişik seçim mekanizmasının performansını incelemiştir. Bu mekanizmalar, belirli (deterministik), örnekleme, rulet çemberi, beklenen değer modeli, stokastik artan örnekleme, stokastik turnuva metodudur.

Goldberg and Deb [78] ise literatürde mevcut ve çok sık kullanılan seçim mekanizmalarını, orantılı yeniden üretim (proportionate reproduction), sıralı (ranking), turnuva (tournament), denge durumu (steady-state) olmak üzere 4 ana sınıfta toplamıştır:

1. Orantılı yeniden üretim mekanizmaları: Bu isim, mevcut yığından, dizilerin uygunluk değerlerine göre seçildiği seçim mekanizmalarının bir grubunu tanımlamaktadır. Bu grup, rulet çemberi, stokastik artan ve stokastik universal seçim mekanizmalarından oluşmaktadır.

a) Stokastik artan seçim mekanizması: Bu mekanizmada, öncelikle yığındaki dizilerin beklenen kopya sayısı (m_i) hesaplanır. Her dizinin beklenen değerinin tam sayı kısmı kadar kopyası yeni yığına alınır. Yığın genişliğine ulaşılmadıysa, yığını doldurmak için beklenen değerlerin kesirli kısımları olasılıklı olarak kullanılır. Kesirli kısımların kullanılmasında iki yaklaşım söz konusudur. Birinci yaklaşım yerine koymadan seçimdir. Bu yaklaşımda, kesirli kısım olasılık değeri olarak dikkate alınır. Diğer kopyasının yığında olma olasılığı ise %50'dir. Diğer yaklaşım ise yerine koyarak seçimdir. Bu yaklaşımda ise rulet çemberi seçim mekanizması kullanılır. Kesirli kısımlar çemberdeki aralıkların belirlenmesinde kullanılır.

b) Stokastik üniversal seçim mekanizması: Bu mekanizma, rulet çemberi mekanizmasına benzemektedir. En önemli farkı, çemberin dış kısmının da eşit parçalara bölünmesidir. Bu parçaların sayısı, yığının genişliğine eşittir. Seçim aşamasında çember bir kere döndürülür. Bir dizinin kopya sayısı, çemberin dış kısmındaki parça sayısı ile belirlenir. Bu durumda, bir dizinin çemberdeki ağırlıklandırılmış aralığına düşen parça sayısı o dizinin kopya sayısını vermektedir [78].

Elitist Seçim Mekanizması da bu seçim mekanizmaları ile birlikte literatürde çok sık kullanılmaktadır. Bu mekanizmada, öncelikle orantılı seçim mekanizmalarından birisi kullanılarak yeni yığın elde edilir ve mevcut yığındaki en iyi uygunluk değerine sahip bir dizi (veya belirli bir yüzdeye giren birkaç dizi) yeni yığında da korunur. Amaç, elde edilen en iyi uygunluk değerine sahip dizinin örnekleme hatası veya genetik operatörler kullanımı sonucunda kaybolmasını önlemek ve GA'nın çalışma süresince her tekrarda yığının en iyisini veya iyilerini korumaktır.

2. Sıralı seçim mekanizması: Bu seçim mekanizması, Baker [79] tarafından önerilmiştir ([65, 78]). Bu mekanizmanın işleyişi kısaca özetlenirse; öncelikle yığındaki diziler uygunluk değerlerine göre en iyiden en kötüye doğru sıralanır. En iyi diziden başlamak üzere bir azalan fonksiyon yardımıyla dizilere kopya sayısı atanır. Kullanılan en genel atama fonksiyonu ise doğrusaldır. Bir fonksiyon yardımıyla atanan kopya sayıları yeni yığının oluşturulmasında kullanılır. Bu aşamada, orantılı seçim mekanizmalarından birisi kullanılarak yeni yığın elde edilir. Literatürde, bir yığında seçim baskısını kontrol edebilmek için en iyi dizinin kopya sayısının 1 ve 2 arasında olması gerektiği belirtilmektedir.

Sıralı seçim mekanizmasının iki büyük avantajı vardır. Birincisi, kullanılması gereken ölçeklendirme fonksiyonlarının bu seçim mekanizmasında kullanımına gerek olmayışıdır. İkincisi ise, en küçükleme problemlerinde de uygunluk değerlerinin amaç fonksiyonu değerlerine eşit olarak alınmasıdır. Bilindiği gibi bu durum, orantılı seçim mekanizmalarında geçerli değildir.

3. Turnuva Seçim Mekanizması: Sıralı seçim mekanizmasının sahip olduğu avantajlara sahip olan bu mekanizmada, yığından rassal olarak seçilen bir grup

dizi (yerine koyarak / yerine koymadan) seçilir. Bu grup içindeki en iyi uygunluk değerine sahip dizi yeni yığına kopyalanır. Yığın genişliğine ulaşıncaya kadar bu işleme devam edilir. Genellikle grup genişliği ikidir. Ancak bu sayının arttırılması da mümkündür ([64, 78]). Goldberg and Deb [78], grup genişliği iki olarak seçildiğinde turnuva seçim ile doğrusal sıralı seçim mekanizmalarının performanslarının eşit olduğunu göstermiştir.

4. Denge durumu seçim mekanizması (Genitor): Bu mekanizmanın işleyişi diğerlerinden biraz farklıdır. Anlatılan mekanizmalarda öncelikle mevcut yığından dizilerin seçimi ile yeni yığın oluşturulur. Oluşturulan bu yeni yığına genetik operatörler uygulanarak yeni diziler elde edilir. Elde edilen yeni diziler, kendilerini oluşturmakta kullanılan diziler ile yer değiştirerek yeni yığına alınır. Bu mekanizmada ise, öncelikle doğrusal sıralı seçim mekanizması kullanılarak seçilen bir ya da iki bireye genetik operatörler uygulanır. Elde edilen yeni diziler mevcut yığındaki uygunluk değeri en düşük diziler ile yer değiştirerek yeni yığın oluşturulur.

3.1.6 Genetik operatörler

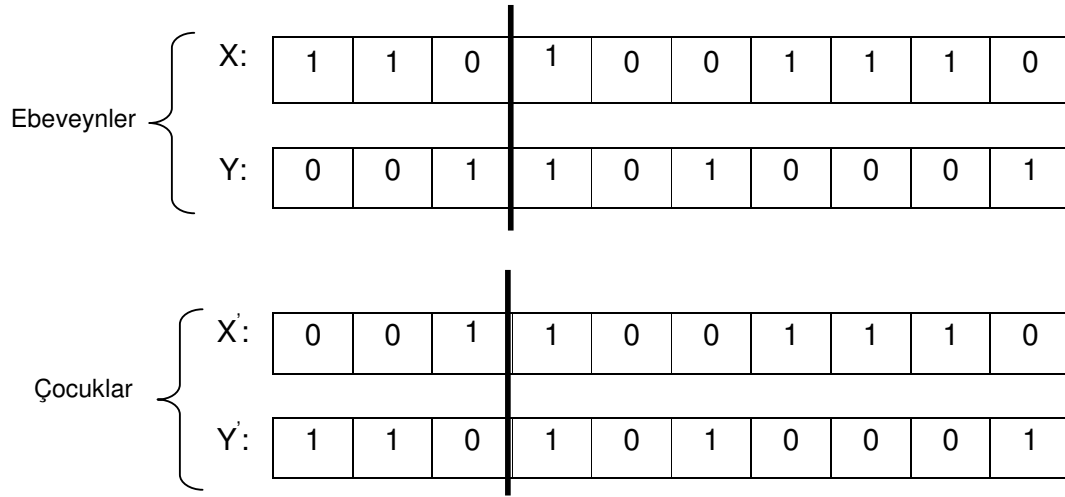
Yeni bireylerin üretilmesi çaprazlama ve mutasyon adı verilen genetik operatörler aracılığıyla gerçekleştirilir. Bu operatörler GA'nın en önemli parçalarıdır. Algoritmanın performansı bu operatörlerden büyük ölçüde etkilenir. Bu operatörleri kullanmadan önce çaprazlama ve mutasyon olasılıklarının belirlenmesi gerekir. Bu olasılık değeri çaprazlama operatörü için oldukça yüksek bir değer, mutasyon operatörü için ise düşük bir değerdir. Bunun nedeni, mutasyonun popülasyonda çeşitliliği yaratmak amacına hizmet etmesidir.

3.1.6.1 Çaprazlama Operatörü

Çaprazlama, iki kromozomun (çözümün) birbirleri arasında gen alışverişinde bulunup iki yeni dizi oluşturmasıdır. GA'daki en önemli parametrelerden bir tanesidir. Çaprazlama operatörü, yığından rassal olarak seçilen iki dizinin belirli bölümlerini karşılıklı değiştirerek, arama uzayında yeni noktaları verecek yeni iki farklı dizi elde eder [69].

İkili düzen kodlama için literatürde bilinen ve çok sık kullanılan çaprazlama operatörleri tek noktalı çaprazlama, iki noktalı çaprazlama ve uniform çaprazlamadır [80].

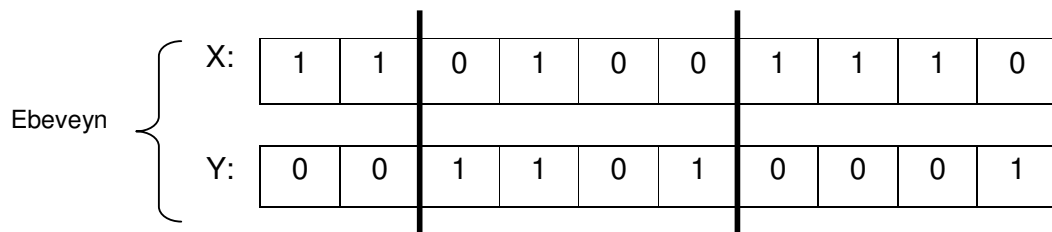
1. Tek noktalı Çaprazlama: Çaprazlama noktası, dizi uzunluğuna eşit ya da daha küçük rassal bir sayı üretilerek belirlenir. Kromozomda, üretilen rassal sayıdan önce gelen bölümler değiştirilmeden korunurken, bu noktadan sonraki bölümler yer değiştirilerek yeni iki dizi elde edilir. Şekil 3.2'de tek noktalı çaprazlamaya örnek verilmektedir.

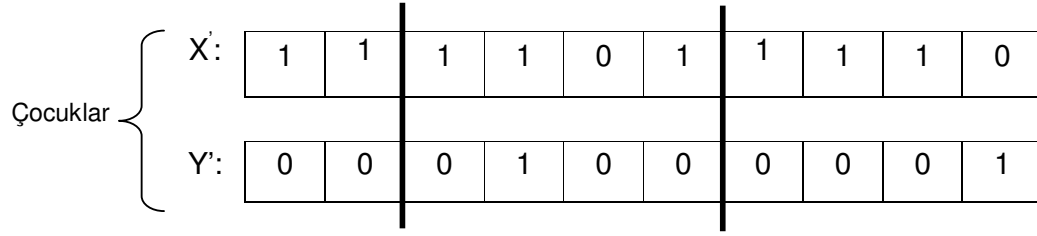


Şekil 3.2 Tek noktalı çaprazlama örneği

X ve Y dizileri, GA'nın herhangi bir neslinde yığın içerisinde yer alan ve 10 adet genden oluşan farklı iki dizi iken, çaprazlama noktası 3 olarak üretildiğinde, yeni çözümler X' ve Y' Şekil 3.2'de gösterildiği gibi elde edilmiştir.

2. İki noktalı çaprazlama: İki noktalı çaprazlama operatöründe, diziler arasındaki gen değişimi, dizilerin rassal olarak seçilen ve birbirini ile aynı olmayan iki noktası arasında kalan bölümleri arasında gerçekleşir. Şekil 3.3'de iki noktalı çaprazlamaya örnek verilmektedir.

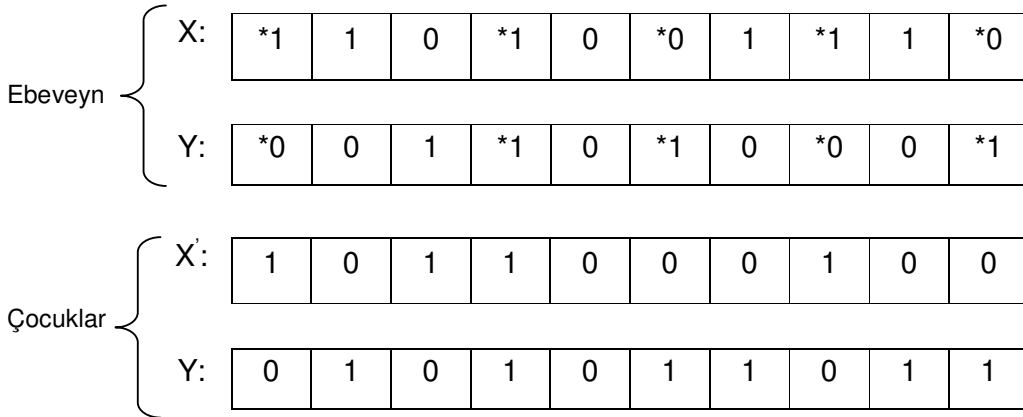




Şekil 3.3 İki noktalı çaprazlama örneği

X ve Y dizileri, GA'nın herhangi bir neslinde yığın içerisinde yer alan ve 10 adet genden oluşan farklı iki dizi iken, çaprazlama noktaları 2 ve 6 olarak üretildiğinde, yeni çözümler X' ve Y' Şekil 3.3 ' de gösterildiği gibi elde edilmiştir.

3. Uniform Çaprazlama: Uniform çaprazlama operatörü ilk olarak Syswerda [81] tarafından önerilmiştir. İlk ebeveynin her geni 0.5 olasılıkla, ikinci ebeveynin karşı gelen geni ile yer değiştirilir. Şekil 3.4 'de uniform çaprazlamaya örnek verilmiştir. Bu örnekte, her gen için 0 ile 1 arasında üretilen rassal sayılar 0.2, 0.7, 0.9, 0.4, 0.6, 0.1, 0.8, 0.3, 0.7, 0.1'dir. Bir gen için üretilen olasılık değeri, 0.5'den az ise birinci çocuk birinci ebeveynden kendisine karşılık gelen geni alırken, ikinci çocuk ise ikinci ebeveynden kendisine karşılık gelen geni alır. Üretilen olasılık değeri 0.5'den az olan genler örnekte * ile işaretlenmiştir [82].

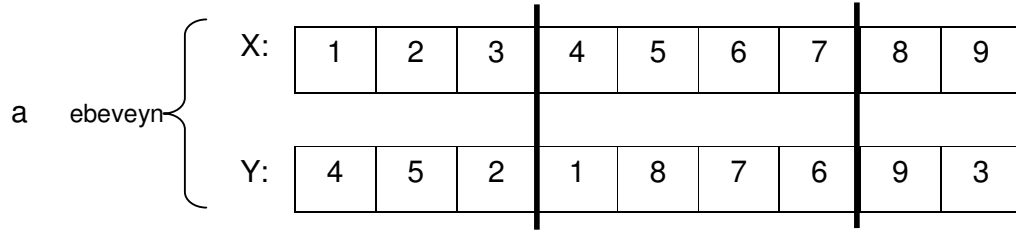


Şekil 3.4 Uniform çaprazlama örneği [82]

Literatürde, diğer gösterim tipleri için de çaprazlama operatörleri geliştirilmiştir. Örneğin, permütasyon kodlamanın kullanıldığı gezgin satıcı problemi için Goldberg and Lingle [83], PMX (partially mapped crossover) çaprazlama operatörünü; Davis [84], OX (order based crossover) çaprazlama operatörünü, Oliver et al., [85], CX

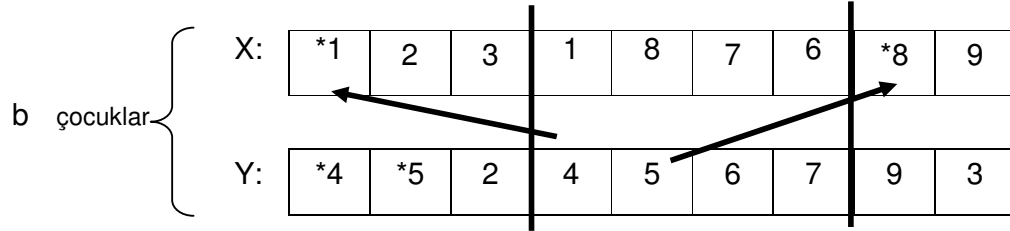
(cycle crossover) çaprazlama operatörünü geliştirmişlerdir. Bu operatörler, çizelgeleme gibi permütasyon kodlamanın kullanıldığı diğer problemler için de yaygın olarak kullanılmaktadır.

1. Kısmi eşlenmiş çaprazlama (PMX): Şekil 3.5' de kısmi eşlenmiş çaprazlanmaya örnek verilmiştir. Çaprazlama noktaları 3 ve 7 olarak seçilmiştir. İlk aşamada, birinci çocuğun (X), 3 ve 7 arasındaki genleri ikinci ebeveynden (Y); ikinci çocuğunkiler ise birinci ebeveynden alınır.



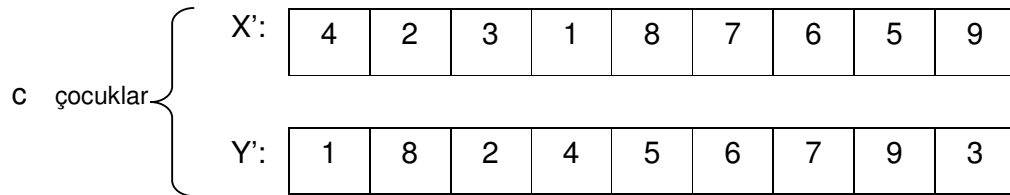
Şekil 3.5a Kısmi eşlenmiş çaprazlama örneği

Şekil 3.5b 'de, dizide kendisi ile aynı değere sahip olan, yani tekrarlayan genler * ile işaretlenmiştir. İşaretli genler dizinin ilk aşamada diğer ebeveynle değişmemiş olan genleridir.



Şekil 3.5b Kısmi eşlenmiş çaprazlama örneği

İkinci aşamada, işaretli genler çaprazlama noktaları arasında kalan ve kendileri ile aynı değere sahip genlerin diğer ebeveyndeki karşılıkları ile yer değiştirir. Şekil 3.5c' de üretilen yeni çocuklar gösterilmektedir.



Şekil 3.5c Kısmi eşlenmiş çaprazlama örneği

2. Sıralı çaprazlama (OX): Şekil 3.5a' da verilen örnek için kesme noktaları yine 3 ve 7 olarak belirlenmiştir. Birinci ebeveynin çaprazlama noktaları arasındaki genler birinci çocuğa (X'), ikinci ebeveynin çaprazlama noktaları arasındaki genler ikinci çocuğa (Y') taşınır.

a çocuklar	X:	-	-	-	4	5	6	7	-	-
	Y:	-	-	-	1	8	7	6	-	-

Şekil 3.6a Sıralı çaprazlama örneği

Daha sonra her ebeveyn için ikinci kesme noktasından başlayarak tüm genler arka arkaya sıralanır. Dizinin son genine ulaşıncaya, başa dönülerek devam edilir. İkinci ebeveyn (Y) için bu sıralama aşağıdaki gibi olacaktır.

$$9 - 3 - 4 - 5 - 2 - 1 - 8 - 7 - 6$$

Bu diziden, birinci ebeveynin kapsadığı numaralar silinirse;

$$9 - 3 - 2 - 1 - 8$$

dizisi elde edilir. Bu dizi, yine ikinci çaprazlama noktasından başlayarak Şekil 3.6a'da birinci çocukta (X' 'da) - ile gösterilen yerlere yerleştirilir. Aynı işlemler Y' için de yapıldığında oluşan çocuklar Şekil 3.6b' de gösterilmektedir.

b çocuklar	X:	2	1	8	4	5	6	7	9	3
	Y:	3	4	5	1	8	7	6	9	2

Şekil 3.6b Sıralı çaprazlama örneği

3. Çevrimsel çaprazlama (CX): Çevrimsel çaprazlama aşağıdaki örnek yardımıyla açıklanmaktadır.

a ebeveyn	X:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Y:	4	1	2	8	7	6	9	3	5

Şekil 3.7a Çevrimsel çaprazlama

İlk ebeveynin ilk geni alınarak çevrime başlanır.

$$X \rightarrow 1 \ x \ x \ x \ x \ x \ x \ x$$

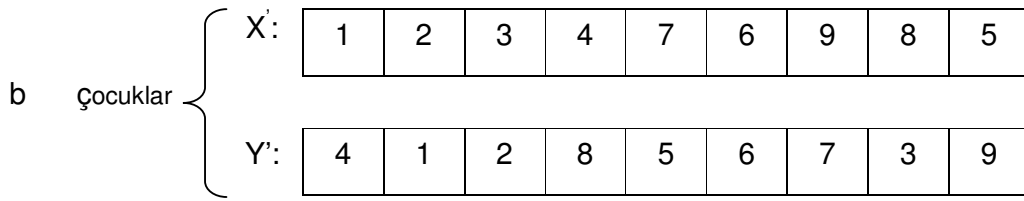
Bir sonraki gen ikinci ebeveynin aynı sıradaki genidir. Y'deki bu değer 4'tür ve 4 değeri X ebeveyninde 4. pozisyonda bulunmaktadır.

$$X \rightarrow 1 \ x \ x \ 4 \ x \ x \ x \ x \ x$$

Bir sonraki çevrimde, X ebeveyninin üçüncü pozisyonundaki 3 değerine 8. pozisyonunda raslanmaktadır.

$$X \rightarrow 1 \ x \ x \ 4 \ x \ x \ x \ 8 \ x$$

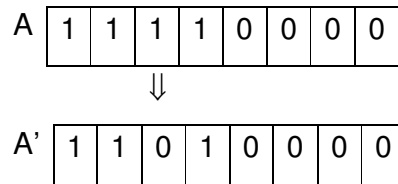
Elde edilen çocuklar Şekil 3.7b 'de gösterilmektedir.



Şekil 3.7b Çevrimsel çaprazlama

3.1.6.2 Mutasyon operatörü

Mutasyon ise çaprazlamadan sonra üretilen her bir çocuğa uygulanan genetik operatördür. Rassal olarak seçilen bir gen, 0.001 gibi küçük bir olasılıkla değiştirilir. Mutasyon operatörü, arama uzayında taranmamış hiçbir noktanın kalmaması olasılığının gerçekleşmesine yardımcı olmak ve küçük oranda rassal arama sağlamak görevini üstlenmektedir. Şekil 3.8' de verilen örnekte, A dizisinin 3. geni mutasyona uğratılarak A' dizisi elde edilmiştir [68].



Şekil 3.8 Mutasyon örneği

3.1.7 Kontrol Parametreleri

Bir GA'da yığın genişliği, çaprazlama oranı, mutasyon oranı, nesil ayrılığı, seçim stratejisi ve ölçeklendirme fonksiyonu olmak üzere 6 farklı kontrol parametresi vardır. Bir GA'nın performansı bu parametrelerin değerlerine çok bağlıdır. Bu nedenle, bir probleme GA uygulanmadan önce bu parametrelerin en iyi kombinasyonunun belirlenmesi gerekir. Bu kısımda, kontrol parametreleri ve parametre değerlerinin algoritmanın performansındaki etkileri incelenecektir [68].

1. Yığın genişliği (N): Yığın genişliği algoritmanın yakınsaması ile ilgilidir. Yığın genişliği küçük olduğunda GA'nın performansı azalır. Çünkü, küçük yığınlar arama uzayını örneklemede yetersiz kalmaktadır ve zamansız yakınsamaya sebep olmaktadır. Yığın genişliğinin büyük olması ise, çözüm uzayının çok iyi örneklenmesini sağladığı için aramanın etkinliğini artırır ve zamansız yakınsamayı önler. Ancak yığın genişliği büyük olduğunda, her tekrarda dizilerin değerlendirilmesi çalışma zamanını arttırmakta ve yakınsama çok yavaş gerçekleştirilmektedir.

2. Çaprazlama oranı (p_c): Çaprazlama oranı, çaprazlama operatörünün kullanım sıklığını kontrol eder. Her yeni yığında, $p_c \times N$ adet diziyeye çaprazlama uygulanır. Yüksek çaprazlama oranı, yığın değişkenliğini hızlı bir şekilde gerçekleştirir. Düşük çaprazlama oranı, aramanın çok yavaş gerçekleşmesine sebep olur.

3. Mutasyon oranı (p_m): Seçim işlemi ile elde edilen yeni yığındaki her dizinin her elemanı, p_m mutasyon oranına eşit bir olasılıkla rassal değişime uğrar. Sonuçta yaklaşık olarak, her tekrarda, $p_m \times N \times L$ adet mutasyon gerçekleşir. Yüksek mutasyon oranı GA'daki aramanın bir rassal aramaya eşdeğer olmasına neden olduğundan, seçilen mutasyon oranının düşük olması tercih edilir.

4. Nesil ayrılığı: Nesil ayrılığı, her tekrarda yığında meydana gelecek değişimin yüzdesini kontrol eder. Bu durumda, t. tekrardaki yığının $N \times (1-G)$ adet dizisi, (t+1). tekrarda da yaşayacaktır. $G=1.0$, tüm yığının her tekrarda değişeceğini göstermektedir. $G=0.5$, tüm yığındaki dizilerin yarısının bir sonraki tekrarda da bulunacağını göstermektedir.

5. Seçim Stratejileri: GA'da kullanılan seçim stratejileri 3.1.5.1'de detaylı olarak incelenmiştir.

6. Ölçeklendirme Faktörü: Özellikle orantılı seçim mekanizmalarında aramanın etkin bir şekilde yürütülmesi büyük bir problem olmaktadır. Algoritmanın ilk birkaç tekrarı sonucu elde edilen yığında, uygunluk değeri yüksek birkaç dizi bulunabilmektedir. Bu dizilerin seçim olasılıkları yüksek olduğundan, arama bu diziler etrafında yoğunlaşmaktadır. Bu olay, algoritmanın zamansız yakınsamasına sebep olmaktadır. Diğer taraftan, algoritmanın son tekrarlarında, yığındaki dizilerin uygunluk değerleri birbirlerine çok yakın olmaktadır. Dizilerin seçim olasılıkları da birbirine çok yakın olduğu için yığınlarda iyi dizilerin korunması zorlaşmaktadır. Bu durum ise aramanın etkinliğini azaltmaktadır. Orantılı seçim mekanizmalarında bu iki sorunu ortadan kaldırmak için uygunluk değerlerinde yeni bir düzenlemenin yapılması gerekmektedir. Literatürde, bunu gerçekleştirebilmek amacıyla doğrusal ölçeklendirme, standart sapma kadar azaltma ve üs yaklaşımı olmak üzere 3 farklı ölçeklendirme fonksiyonu kullanılmaktadır.

3.2 Sütun Üretme Yaklaşımı

Sütun üretme yaklaşımı, ekip planlama probleminde olduğu gibi çok fazla sayıda sütun içeren problemlerde etkin şekilde kullanılmaktadır. Sütun üretme yaklaşımı, ilk olarak Gilmore and Gomory [86], tarafından kesme problemi (cutting stock problem) gibi büyük ölçekli doğrusal problemlerin çözümünde kullanılmıştır.

Bu yaklaşım 2 aşamadan oluşur:

- Ana problem
- Alt problem

Sütun üretme yaklaşımı aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

Adım 1: Yeterli sayıda başlangıç sütunu üret.

Adım 2: Başlangıç sütunlarını kullanarak ana problemi çöz.

Adım 3: Ana problemin çözümü ile elde edilen mevcut çözümün ikil değişkenlerini alt probleme gönder.

Adım 4: Ana problemin ikil değişkenleri, alt problemin amaç fonksiyonunun hesaplanmasında kullanılmaktadır. Hesaplanan amaç fonksiyonu ile alt problemi çözü. Alt problemin çözümleri olarak üretilen yeni sütunu, ana probleme gönder.

Adım 5: Alt problemin çözümlerinin ana probleme gönderilmesi ile ana probleme yeni bir sütun eklenmiş olur ve ana problem eklenen yeni sütun ile birlikte tekrar çözümler ve yeni ikil değişkenler hesaplanır.

Adım 6: Bu süreç durdurma koşulu sağlanana kadar devam eder.

3.2.1 Ekip Eşleme Problemi İçin Sütun Üretme Yaklaşımı

Ekip eşleme probleminin çözümünün zor olmasının 3 temel nedeni vardır. Bunlardan birincisi, çok sayıda kurallar ve yasal düzenlemeler olması nedeniyle, üretilen çözümlerin uygunluğunun belirlenmesinin zor olmasıdır. İkinci olarak, bu problemler binlerce milyona kadar varan sayıda değişken içermektedir. Üçüncü olarak, problemdeki tüm değişkenler tamsayıdır, dolayısıyla çözüme ulaşmak için tamamlayıcı çözüm yöntemleri kullanılmalıdır [62].

Sütun üretme tekniği ile ekip eşleme probleminin çözümünde, ana problem, küme kapsama ya da küme ayrıştırma problemidir ve verilen ekip eşlemelerinin arasından en düşük maliyete sahip eşlemelerini seçer. Alt problem ise ana problem için yeni ekip eşlemelerini oluşturur ve literatürde çoğunlukla alt problem olarak en kısa yol problemi kullanılmaktadır. Ana problem ve alt problem, en iyi çözüme ulaşılanaya kadar tekrar tekrar çözümler.

Yukarıda anlatılan sütun üretme yaklaşımının, ekip eşleme problemine uygulanması aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

3.2.1.1 Ana Problem

Ekip eşleme probleminin ana problemi küme ayrıştırma ya da küme kapsama problemidir.

Kısıtlar:

$$\sum a_{ij}x_j \geq (=) 1 \quad i = 1, \dots, m \quad (3.2)$$

$$x_j \text{ binary} \quad j = 1, \dots, n \quad (3.3)$$

Amaç fonksiyonu:

$$\text{enk} \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (3.4)$$

Her kısıt (sıra), bir uçuşa karşılık gelirken, her değişken (sütun), yasal bir ekip eşlemesine karşılık gelmektedir.

c_j = j. ekip eşlemesinin maliyeti

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{i. uçuş j. ekip eşlemesi tarafından kapsanıyorsa} \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{ekip eşlemesi j çözümde varsa} \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

3.2.1.2 Alt Problem

Ana probleme eklenecek olan ekip eşlemelerinin seçilmesi, alt problem, diğer adıyla maliyetlendirme problemi olarak isimlendirilmektedir. Bu aşamada, hangi kritere göre ekip eşlemesinin seçileceği ve kritere uygun ekip eşlemelerinin nasıl belirleneceğine dair iki soru ortaya çıkmaktadır [62].

Geleneksel olarak, ekip eşlemeleri negatif indirgenmiş maliyet kriterine göre seçilir. Anbil et al., [27] indirgenmiş maliyet kriterini ve en kısa yol ile sütun üretme tekniğini birlikte kullanmıştır. Uçuş görevleri ağacında, ayrıtların maliyetlerini düşürmek için kısıtlı ana problemin ikil değişkenlerini kullanmaktadır. Ayrıca negatif indirgenmiş maliyetli ekip eşlemelerini bulmak için ağaçta derinliğine arama algoritması kullanılmaktadır [87].

Son zamanlarda alternatif stratejiler de geliştirilmiştir. Bixby et al., [88], seçim kriteri olarak, ekip eşlemesinin maliyetinin, ekip eşlemesindeki uçuşların ikil değişkenleri toplamına bölünmesi ile elde edilen değeri kullanmaktadır. Bu

yaklaşım ile tekrar sayısında önemli ölçüde azalma sağlamıştır. Hu and Johnson [89], her tekrarda güncellenen ikil uygun vektör tabanlı en düşük indirgenmiş maliyetli sütunları seçmek için asıl-ikil algoritmasını önermiştir. Bu yaklaşım ile de tekrar sayısında önemli ölçüde azalma olduğu belirtilmiştir [62].

Seçim kriterine en çok uyan ekip eşlemelerinin seçilmesi için üç farklı yaklaşım bulunmaktadır. Bunlardan ilki en kısa yol algoritması, ikincisi birerleme, üçüncüsü ise sezgisel yöntemdir.

1. En kısa yol problemi: Yapılan birçok çalışmada, alt problemin çözümü için özel yapılandırılmış şebekelerde çok etiketli ya da kısıtlı en kısa yol problemi kullanılmaktadır [90]. Uçuş ya da uçuş görev şebekelerinde yalnızca bazı temel kısıtlar yapılandırılabilir. Şebeke yapısında etiketleme kullanılarak tüm kısıtların yapılandırılması mümkün değildir.

Çok etiketli en kısa yol yaklaşımları, tek etiketli yaklaşımlardan, şebekedeki her ara düğüme olan yolun saklamasının gerekliliği nedeniyle farklılaşır [62]. Bu yaklaşımda, uçuş şebekesinde her ekip eşlemesi bir yola karşılık gelmektedir. Bir yolun maliyeti, kendisine karşılık gelen ekip eşlemesinin maliyetinden, ekip eşlemesinin içerdiği uçuşlarla ilişkilendirilmiş olan ikil değerlerin toplamının çıkarılması ile bulunur. Etiketler, yolların maliyetlerinin hesaplanmasında ve uygunluk kriterinin sağlanmasında kullanılır. Baskınlık ise, en iyi yolun bulunmasının mümkün olmadığı durumlarda, ağacın önceden araştırılmış olan dallarında daha fazla birerleme yapılmasını engellemek için kullanılır [91].

Çok etiketli en kısa yol yaklaşımının kullanımı, özellikle çok fazla uçuşa sahip problemler için zordur. Şebekenin her düğümünde birçok etiket saklandığı için, uçuş sayısı arttıkça algoritmanın performansı etkilenmektedir. Çok sayıda etiket olması ağacın budanmasına engel olmaktadır, çünkü verilen düğümün tüm etiketlerinde baskınlık olmalıdır [62].

2. Birerleme: Birerleme yöntemi ile tüm ekip eşlemeleri oluşturulur. Ekip eşlemelerinin uygunluk kısıtları ve maliyet yapısının karmaşık olmasından dolayı, geleneksel yöntemlerde tipik olarak çoklu etiketli en kısa yol yaklaşımı kullanılır.

Ancak, etiketler ile tüm uygunluk kısıtlarını sağlamak mümkün değildir ve kısıtlarda yapılması gerekli bir değişiklik en kısa yol probleminde büyük değişiklikler olmasına neden olacaktır. Bu nedenle ticari ekip planlama programlarında, her müşterinin de kendine ait farklı kısıtları olması sebebiyle, alt problemin çözümü için birerleme yaklaşımı kullanılmaktadır [62].

Bu yaklaşım problemin büyüklüğüne bağlıdır ve çok sayıda uçuş içeren ekip eşleme problemlerinde başarılı değildir [91]. Bu nedenle alt problemde negatif indirgenmiş maliyet kriteri kullanılarak kısmi birerleme uygulanmaktadır [22].

3. Sezgisel Yöntemler: Rassallaştırılmış sezgiseller uygun ekip eşlemeleri üretmek için kullanılır. Bu tip yöntemler, alt problemin en iyi çözümünü bulmayı garanti etmez, dolayısıyla kısıtlı ana problemin en iyi çözümünün bulunması da garanti edilemez. Buna rağmen, bu yöntemler iyi sütunların üretilmesinde kullanışlıdır ve etkin karma bir algoritma oluşturmak için en iyi çözümü bulan tekniklerle birlikte başarılı bir şekilde kullanımları mümkündür. Küme ayrıştırma probleminin ekip eşlemesi probleminde kullanılan diğer bir sezgisel yöntem ise kısıtlı programlama kullanılması ve alt problemin çözülmesidir. Bu yaklaşımlarda, en negatif indirgenmiş maliyete sahip değişken değil, sadece negatif indirgenmiş maliyeti olan bir değişken bulmak yeterli olduğu için, daha önce de belirtildiği gibi sezgisel yöntemler kesin sonuç veren yaklaşımlar ile birlikte kullanılabilir [91].

3.2.1.3. Şebeke Yapısı

3.2.1.2'de açıklandığı gibi, yapılandırılmış bir şebekede kısıtlı en kısa yol problemi çözülerek küme ayrıştırma ana problemi için ekip eşlemeleri oluşturulur. Literatürde iki farklı şebeke yapısı kullanılmaktadır. Bunlardan ilki uçuş şebekesidir. Uçuş şebekesinde, uçuş çizelgesinde yer alan her bir uçuşa karşılık gelen bir ayrıt vardır ve ayrıtlar uçuşlar arasındaki mümkün bağlantıları temsil etmektedir. İkinci tip şebekeler ise uçuş görev şebekeleri olarak adlandırılır ve şebekede, her uçuş görevine karşılık gelen bir ayrıt bulunmaktadır. Ayrıtlar, uçuş görevleri arasındaki mümkün dinlenme sürelerini temsil eden bağlantılardır.

3.2.1.4 Doğrusal Gevşetme

Literatürde, küme ayrıştırma problemlerinin doğrusal gevşetmesini yaklaşık olarak çözen çalışmalar, çok sayıda ekip eşlemesini dikkate almaktadır ve doğrusal gevşetmeyi bu ekip eşlemeleri için çözmektedir. Anbil et al., [27], 800 uçuşa sahip U.S Havayolları iç hat uçuşları günlük problemi için, küme ayrıştırma probleminin doğrusal gevşetmesinin en iyi çözümüne ulaşmıştır. 5.5 milyon uygun ekip eşlemesi birleştirilerek üretilmiş ve SPRINT adı verilen yaklaşım kullanılarak, bu ekip eşlemesi kümesinin en iyi çözümüne ulaşılmıştır. SPRINT yaklaşımında, binlerce sütun üretilerek doğrusal programlama çözücüsüne yüklenmekte ve üretilen sütunlar için doğrusal program çözülerek en iyileme yapılmaktadır. Daha sonra, temelde olmayan sütunların birçoğu göz ardı edilerek, binlerce yeni sütun eklenmektedir. Bu süreç, tüm sütunlar dikkate alınınca sona erer. En iyi çözüme ulaşıldığını garanti etmek için temel dışı tüm sütunların maliyetlerinin hesaplanması gerekir [62].

Son zamanlarda, en iyileme çözücülerinin ve hesaplayıcılarının ön plana çıkmasıyla, doğrusal gevşetmenin çözümü için tüm olası ekip eşlemelerini dikkate alan dinamik sütun üretme tekniğine geçiş olmuştur (Barnhart et al., [38], Desaulniers et al., [33]). Sütun üretme yaklaşımında, tüm olası ekip eşlemelerini dikkate alan küme ayrıştırma ya da küme kapsama problemi ana problem olarak adlandırılmaktadır. Olası ekip eşlemesi sütunlarının bir alt kümesinden oluşan probleme ise kısıtlı ana problem adı verilir. Ekip eşlemesi probleminin doğrusal gevşetmesini çözmek için uygulanan sütun üretme yaklaşımının algoritması aşağıdaki adımlardan oluşur:

Adım 1: Kısıtlı Ana problemi çöz: Sütunların bir alt kümesinden oluşan mevcut kısıtlı ana problemin en iyi çözümünü bul

Adım 2: Alt problemi çöz: Çözümü iyileştiren bir ya da daha fazla sütun üret. Eğer böyle bir sütun yoksa dur. Doğrusal gevşetmenin çözümü bulunmuştur.

Adım 3: Yeni bir kısıtlı ana problem oluştur: Kısıtlı ana probleme, alt problemin çözülmesi ile elde edilen sütunları ekle ve Adım 1'e dön.

3.2.1.5 Tamsayılı Çözümler Elde Etme

Literatürde bugüne kadar yapılmış çalışmaların birçoğunda, küme ayrıştırma probleminin doğrusal gevşetmesini çözmek için kullanılan sütun üretme tekniği, tamsayılı iyi çözümler elde etmek için Dal-Sınır algoritması ile birlikte kullanılmıştır. Olası ekip eşlemelerinin sayısının çok fazla olmasından dolayı bu yaklaşımlar sezgisel tabanlıdır ve 3 sınıfa ayrılır [62].

İlk sınıfta yer alan algoritmalarda sütun üretme yaklaşımı “offline” olarak kullanılmaktadır. Yani, ekip eşlemelerinin bir alt kümesi için birerleme yapılır ve bu alt küme en iyi çözümü verecek şekilde tamsayılı olarak çözülür. Bu tip yaklaşıma örnek, Hoffman and Padberg [48], çalışmasıdır. Ancak, problem milyon sayıda değişken içermesinden dolayı, bu yaklaşım ancak çok küçük sayıda alt kümeler için kullanılabilir.

İkinci sınıfta yer alan yaklaşımlar ise küme ayrıştırma probleminin doğrusal gevşetmesini çözmek için dinamik sütun üretme tekniği kullanılmaktadır. Bu yaklaşım en iyi ya da en iyiye yakın sonuç vermektedir. Daha sonra, doğrusal gevşetmeyi çözmek için üretilen sütun alt kümelerine, tam sayılı en iyi çözümü bulmak için Dal-Sınır algoritması uygulanır. Bu yaklaşımlar da Barnhart [38], tarafından ekip eşleme probleminde ve Ryan [92], tarafından ekip atama problemlerinin çözümünde kullanılmıştır. Klabjan et al., [17], küme ayrıştırma probleminin doğrusal gevşetmesini çözen bir algoritma önermiştir ve daha sonra tam sayılı çözüm bulmak için düşük maliyetli indirgenmiş maliyete sahip birkaç milyon ekip eşlemesi seçmektedir.

Üçüncü sınıfta yer alan yaklaşımlar ise Dal-Sınır ağacı ile dinamik sütun üretme yaklaşımını birlikte kullanılmaktadır. Bu algoritmalar Dal-Fiyat yaklaşımı olarak bilinmektedir. Dal-Fiyat süreci, Dal-Sınır algoritmaları gibi bir birerleme stratejisidir ve Dal-Sınır ağacının her düğümünde doğrusal gevşetme çözülür.

Dal-Fiyat yöntemi; ulaştırma, çizelgeleme ve kombinatoriyal en iyileme problemleri gibi birçok problemde uygulanmaktadır. Ekip eşleme probleminde sütun üretme tekniği ile Dal-Fiyat algoritması, Desaulniers et al., [31], Desrosiers

et al., [40], Gamache and Soumis [93], Gamache et al., [94], Ryan [92], Vance et al., [35] ve Anbil et al., [22] tarafından kullanılmıştır.

Marsten [95], tamsayılı çözümler elde edebilmek için dinamik ekip eşlemesi problemini değişken sabitleme tekniği ile birlikte kullanmıştır. Tamsayılı çözümler bulmak için, küsüratlı ekip eşlemelerine karşılık gelen ve değeri bire yakın olan değişkenlerin değerleri bir olarak sabitlenmiştir. Üretilecek sütun sayısı, doğrusal gevşetmenin sınırı önceden belirlenmiş olan hedeften yüksek ise yeni ekip eşlemesi oluşturulmasına izin verilerek belirlenmiştir.

Andersson et al., [96], ise ekip eşlemesi ve en iyileme problemlerini ayrıştırarak çözmektedir. Algoritma, birçok kez çalışarak ekip eşlemleri üretmektedir ve daha sonra küme ayrıştırma problemi üretilen sütunlar için çözülmektedir. Tamsayılı programı çözmek için ise Wedelin [54], 1995'te önerilen Lagrange algoritmasını kullanmaktadır [62].

4. EKİP EŞLEME PROBLEMİ İÇİN GELİŞTİRİLEN ALGORİTMALAR

Ekip eşleme probleminin çözümü için üç farklı yaklaşım geliştirilmiştir. İlk yaklaşım, rassal üretimli eniyileme olarak adlandırılmaktadır. Bu algoritma ile belirli bir populasyon genişliğine ulaşılan kadar, kısıtlara uygun olası ekip eşlemeleri rassal, ancak bilgiye dayalı olarak oluşturulmaktadır. İkinci yaklaşımda ise ekip eşlemeleri GA tabanlı bir algoritma kullanılarak oluşturulmaktadır. Her iki yaklaşımda da, oluşturulan ekip eşlemeleri arasından en iyi ekip eşlemesi kümesinin seçilmesi tamsayı programlama (küme kapsama problemi) ile gerçekleştirilmektedir. Böylece, geliştirilen her iki algoritmada da sezgisel ve analitik yaklaşım birlikte kullanılarak karma bir çözüm yöntemi oluşturulmuştur. Üçüncü yaklaşımda ise, gerçekte az sayıda ekip eşlemeleri alt kümesi üreterek, dolaylı olarak olası tüm ekip eşlemelerini dikkate alan sütun üretme yaklaşımı kullanılmıştır. Tezde, sütun üretme yaklaşımının başlangıç çözümü olarak, GA tabanlı algoritma sonucu elde edilen bir çözüm seçilmiş ve böylece GA tabanlı algoritma ve sütun üretme yaklaşımının birlikte kullanıldığı karma bir çözüm yöntemi elde edilmiştir. Başlangıç çözümünün rassal olarak elde edildiği sütun üretme yaklaşımı ise geliştirilen diğer algoritmalarla karşılaştırma yapabilmek amacıyla kullanılmıştır. Bu yaklaşımda da ekip eşlemelerinin oluşturulması ve en iyi ekip eşlemesi kümesinin seçilmesi ayrı aşamalardır. Ancak, ekip eşlemelerinin üretilmesi aşamasında, en iyileme aşamasından gelen geri besleme kullanıldığı ve çözüme ulaşılan kadar iki problem tekrarlı olarak çözüldüğü için problemler bütünlük olarak düşünülmektedir. Aşağıdaki bölümlerde sırasıyla bu yaklaşımlar anlatılmaktadır.

4.1 Problemin Tanımı ve Varsayımlar

Bu tezde, iki farklı uçuş çizelgesi girdi olarak kullanılmıştır. Bunlardan ilki, Türk Hava Yolları'nın Ocak 2008 TK iç seferler çizelgesinin, A320 filo tipi için uçuş çizelgesidir. Çizelge 172 adet uçuş içermektedir. İkincisi ise, Zeybekcan [97] tezinde kullanılan 150 uçuşlu THY iç sefer çizelgesidir. Çalışmada kullanılan uçuş çizelgeleri sırasıyla Ek 2 ve Ek 3'te verilmektedir.

Problemin çözümü için dikkate alınan kısıtlar ve varsayımlar aşağıdaki gibidir:

- Uçuş çizelgesindeki her uçuşun haftanın her günü uçulduğu varsayılmaktadır (günlük problem).
- Her iki problemde de ana üsler İstanbul ve Ankara olmak üzere iki tanedir.
- Her ekip, ekip eşlemesine başladığı ana üs neresi ise eşleme sonunda o ana üsse dönmek zorundadır.
- Birbirini takip eden iki uçuş ayağında önceki uçuşun varış yeri sonraki uçuşun kalkış yeri olmalıdır.
- Birbirini takip eden iki uçuş ayağı arasında izin verilen mola süresi (en az bekleme süresi) 20 dakikadır.
- Ekip eşlemeleri birer günlük olarak planlanmıştır.
- Bir ekip eşlemesi en az 2, en fazla 4 uçuş ayağından oluşabilir.
- Uçuş görev süresi en fazla 14 saat olabilir.
- Bir uçuş görev süresi içinde izin verilen en fazla uçuş süresi 8 saattir.
- En iyi ekip eşlemesi kümesi çizelgedeki tüm uçuşları kapsamalıdır.
- Problem, küme kapsama problemi olarak çözülmektedir. Yani, ekibin uçakta yolcu olarak seyahat etmesine izin verilmektedir.

4.2 Rassal Üretimli Eniyileme

Rassal üretimli eniyileme algoritması, ekip eşleme problemini, ekip eşlemelerinin oluşturulması ve en iyi ekip eşlemesi kümesinin belirlenmesi olmak üzere iki aşamada çözmektedir. İlk aşamada, aşağıda adımları verilen algoritma ile kısıtlara uygun ekip eşlemeleri oluşturulmaktadır. Algoritma ile oluşturulacak ekip eşlemesi sayısı 1000 olarak belirlenmiştir. Bir ekip eşlemesi oluşturulurken, eşlemeyi oluşturacak birbirini takip eden uçuşlar; kalkış yeri, varış yeri, kalkış saati, varış saati, uçuş görev süresi gibi bilgiler göz önünde bulundurularak, bu kısıtları sağlayan uygun uçuşların arasından rassal olarak seçilir. Bu nedenle rassal üretimli en iyileme bilgiye dayalı rassal bir algoritmadır.

Rassal üretimli en iyilemenin ikinci aşamasında ise küme kapsama modeli kullanılarak, üretilen 1000 adet ekip eşlemesinin arasından en düşük maliyetli ve tüm uçuşları kapsayan ekip eşlemesi kümesi seçilir.

Rassal üretimli eniyileme yaklaşımına ilişkin algoritma aşağıda açıklanmaktadır, algoritmaya ait akış şeması ise Ek 4'te verilmektedir.

Adım1: pop büyüklüğüne ulaşılan kadar Adım1 ve Adım 6 arasını çalıştır.

uçuş ayağı sayısı=1

uçuş süresi = 0

uçuş görev süresi= 0

Adım 2: Rassal olarak bir ana üs seç. Uçuş çizelgesinde seçilen ana üsten başlayan uçuşların arasından rassal bir uçuş seç ($k=1$).

uçuş ayağı sayısı= k

uçuş süresi= k . uçuşun uçuş süresi

uçuş görev süresi= k . uçuşun varış saati – k . uçuşun kalkış saati

Adım 3: k . uçuşun çizelge bilgilerini al (kalkış yeri ve saati, varış yeri ve saati).

k .uçuşu uçuş çizelgesinden sil.

Adım 4: ($k+1$). uçuşun en erken ve en geç başlayabileceği saatleri belirle. Bu saatlere uyan ve kalkış yeri k . uçuşun varış yerine eşit olan uçuşları listele.

Adım 5: i. liste boş değilse

ii. listedeki uçuşlar arasından rassal bir uçuş seç ve ($k+1$). uçuş olarak ekle.

uçuş süresi= uçuş süresi + ($k+1$). uçuşun uçuş süresini hesapla.

uçuş görev süresi= uçuş görev süresi + k . uçuş ile ($k+1$). uçuş arasındaki mola + ($k+1$). uçuşun uçuş süresini hesapla.

uçuş ayağı sayısı= uçuş ayağı sayısı+1

iii. uçuş ayağı sayısı ≤ 4 ve uçuş süresi ≤ 480 ve uçuş görev süresi ≤ 840

iv. uçuş ayağı sayısı $\neq 4$

yeni uçuşu ekle.

Adım 3'e dön.

uçuş ayağı sayısı =4 ise

v. eklenmeye aday olan uçuşun varış yeri ilk uçuşun ana üssüne eşit ise ekle ve Adım 1'e dön.

pop=pop+1

değilse

Adım 6 'ya git

değilse

Adım 6' ya git

liste boşsa

Adım 6' ya git

Adım 6: pop. eşleme tek uçuştan oluşuyorsa o uçuşu sil ve Adım1'e dön.

değilse

eşleşmeyi kısıtlara uyacak şekilde ilk uçuşun ana üssüne döndüren bir uçuş ekle Adım1'e dön.

pop=pop+1

böyle bir uçuş yoksa

k. uçuşu sil ve eşleşmeyi kısıtlara uyacak şekilde ilk uçuşun ana üssüne döndüren bir uçuş ekle Adım 1'e dön.

Adım 7: Eşlemelerin maliyetlerini hesapla.

4.3 GA Tabanlı Algoritma

4.3.1 Dizi gösterimi

Bu çalışmada, diziler gerçel sayı kodlaması ile gösterilmektedir. Dizideki i. gen uçuş çizelgesindeki herhangi bir uçuş ayağının numarasını temsil etmektedir.

Bu gösterim Şekil 4.1'de örneklenmektedir. Dizi, 5 -104 -22 ve 69 numara ile çizelgede yer alan uçuş ayaklarından oluşmaktadır. Dizi uzunluğu, ekip eşlemesi tarafından izin verilen uçuş ayağı sayısı kadar, yani 2 ile 4 arasında olabilmektedir

X:

5	104	22	69
---	-----	----	----

Şekil 4.1 Dizi gösterimi

GA tabanlı algoritmada, her dizi yasal kısıtları sağlayan olası bir eşleşmeyi temsil etmektedir. Dolayısıyla, GA sonunda elde edilen çözüm, en iyi ekip eşlemesi kümesini oluşturmaya aday olan yasal ekip eşlemelerini temsil eden dizilerdir. GA tabanlı algoritma ile sadece olası ekip eşlemeleri üretilmektedir. Aday çözümlerin arasından en iyi ekip eşlemesi kümesinin seçimi problemi, küme kapsama problemi olarak modellenmekte ve bir sonraki aşamada çözülmektedir.

4.3.2 Amaç fonksiyonu ve uygunluk fonksiyonu

Çalışmada amaç, yasal kısıtları sağlayan olası ekip eşlemelerinin oluşturulmasıdır. Uygunluk fonksiyonu olarak doğrudan amaç fonksiyonunun değeri kullanılmaktadır. Bir dizinin amaç fonksiyonu değeri, o dizinin yani ekip eşlemesinin maliyetine eşittir. Ekip eşlemesinin maliyeti ise aşağıdaki gibi hesaplanır [41]:

$$\text{En büyük} = \{0.5 \cdot \text{uçuş görev süresi}, \text{uçuş süresi}, \text{garanti edilen en az ödeme miktarı}\} \quad (4.1)$$

Garanti edilen en az ödeme miktarı bileşeni 120 olarak alınmaktadır. Bu değer, uçuş görevi ne olursa olsun göreve çıkan ekibe 120 para birimi ödeme yapılacağını ifade etmektedir.

4.3.3 Başlangıç yığının oluşturulması

Başlangıç yığını, Bölüm 4.2’de verilen rassal üretimli eniyileme algoritması kullanılarak oluşturulmuştur. Ancak, GA tabanlı algoritmanın başlangıç yığını genişliği 50 olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla, elde edilen ekip eşlemeleri uçuş çizelgesindeki tüm uçuşları içermeyi garanti etmez. Yalnızca, GA tabanlı algoritma için yeterli sayıda başlangıç ekip eşlemesi oluşturur.

4.3.4 Seçim mekanizması

Bu çalışmada geliştirilen algoritmada, turnuva seçim mekanizması kullanılmıştır. İlk aşamada, mevcut yığından, rassal olarak iki dizi seçilmekte, seçilen bireylerin amaç fonksiyonu değerleri karşılaştırılmakta ve düşük maliyete sahip olan birey belirlenmektedir. Daha sonra, aynı işlem rassal seçilen ve en az biri ilk aşamada seçilen bireylerden farklı iki dizi için tekrarlanmakta, yani yeni seçilen bireylerin arasından düşük maliyet değerine sahip olanı belirlenmektedir. Genetik operatörler de ilk ve ikinci aşamada belirlenen iki bireye uygulanmaktadır.

Geliştirilen GA tabanlı algoritmanın, GA' dan en farklı özelliği mevcut yığındaki tüm bireylerin yanısıra genetik operatörler ile yeni üretilen bireylerin (çocukların) bir sonraki yığına aynen taşınmasıdır. Yani, yığın genişliği her tekrarda artmaktadır. Bunun nedeni, geliştirilen GA tabanlı algoritma sonucu elde edilen yığının (çözümün) bir sonraki aşamanın, yani küme kapsama modelinin girdisi olarak kullanılmasıdır. Küme kapsama problemi ile uçuş çizelgesindeki tüm uçuşları içeren en düşük maliyetli ekip eşlemeleri kümesi seçilir. Dolayısıyla, GA tabanlı algoritma ile elde edilen son yığında, çizelgedeki tüm uçuşları içeren ekip eşlemeleri bulunmalıdır. Mevcut yığın, her tekrarda bir sonraki yığına aynen taşınmazsa, uçuş çizelgesinde kapsanmayan uçuşlar olacaktır.

4.3.5 Genetik operatörler

4.3.5.1 Çaprazlama operatörü

Çalışmada, problem yapısına özgü çaprazlama operatörü geliştirilmiştir. Her tekrarda 20 kere çaprazlama yapılmaktadır ve çaprazlama olasılığı 1'dir. Çaprazlama yapılırken takip edilen yöntem şu şekildedir: Seçilen iki ebeveynin, aynı kalkış ve varış yerine sahip uçuşları ortak uçuşlar olarak belirlenmektedir. Bir çocuk, kısıtları sağlayan mümkün ortak uçuşların yanı sıra, diğer ebeveyninden de kendi ebeveyninde bulunmayan, yani farklı olan mümkün uçuşları içermelidir.

Çaprazlama için uygulanan algoritma aşağıdadır, çaprazlama algoritmasına ait akış şeması ise Ek 5'te verilmektedir.

Adım 1: 20 çocuk üretilene kadar Adım 1 ve Adım 8 arasını tekrarla.

çocuk sayısı=0

4.2.4'de açıklanan seçim mekanizmasına göre T_1 ve T_2 olmak üzere 2 ebeveyn seç.

Adım 2: T_1 ve T_2 'nin aynı kalkış ve varış yerine sahip uçuşlarını ortak uçuş olarak belirle= $T_1 \cap T_2$

Diğer uçuşlar= $\bar{T}_1 = T_1 - (T_1 \cap T_2)$, $\bar{T}_2 = T_2 - (T_1 \cap T_2)$

Adım 3: T_2 ' çocuğunu üretmek için, $T_1 \cap T_2$ ve \bar{T}_1 ' de T_1 'in ana üssünden başlayan uçuşları belirle (T_{2j} 'nin i. uçuşu ve $i=1,2,3,4$). Belirlenen her uçuş aday bir T_2 'dir.

Adım 4: $(i+1)$. uçuş < 5 olana kadar tekrarla.

T'_{2j} için $T_1 \cap T_2$ ve \bar{T}_1 'de, $(i+1)$. uçuşun varış yerinden başlayan uçuşları belirle.

Uyan uçuş yoksa,

T'_{2j} 'yi ana üsse gönderecek şekilde uçuş çizelgesinden uçuş ekle.

Uygun uçuş varsa,

bulunan uçuşlar arasından kalkış zamanı i. uçuşun varış zamanına en yakın olanı $(i+1)$. uçuş olarak seç.

$(i+1)$. uçuş $T_1 \cap T_2$ 'ye T_1 'den gelmişse

$T_1 \cap T_2$ 'de T_1 'den gelen $(i+1)$. uçuş ile aynı varış ve kalkış yerine sahip

başka uçuş yoksa

bulunan diğer uçuş alternatiflerini dene.

başka alternatif yoksa

T'_{2j} 'yi ana üsse gönderecek şekilde uçuş çizelgesinden uçuş ekle.

$T_1 \cap T_2$ 'de T_1 'den gelen $(i+1)$. uçuş ile aynı varış ve kalkış yerine sahip

başka uçuş varsa

Yasal kısıtlara uygun ise uçuşu $(i+1)$. uçuş olarak ekle.

değilse

T'_{2j} 'yi ana üsse gönderecek şekilde uçuş çizelgesinden uçuş ekle.

$(i+1)$. uçuş $T_1 \cap T_2$ 'ye T_1 'den gelmiyorsa

Yasal kısıtlara uygun ise uçuşu $(i+1)$. uçuş olarak ekle.

değilse

T'_{2j} 'yi ana üsse gönderecek şekilde uçuş çizelgesinden uçuş ekle.

Adım 5: T'_{2j} çocuklarının arasından en fazla uçuş ayağı sayısına sahip olanı seç.
ve $T_1 \cap T_2$, \bar{T}_1 ve \bar{T}_2 'den seçilen j. çözümdeki uçuşları sil.

Adım 6: T'_1 çocuğunu üretmek için, $T_1 \cap T_2$ ve \bar{T}_2 'de T_2 'nin ana üssünden başlayan uçuşları belirle (T'_{1j} 'nin, i. uçuşu ve $i=1,2,3,4$). Belirlenen her uçuş aday bir T'_1 'dür.

Adım 7: (i+1). uçuş < 5 olana kadar tekrarla

T'_{1j} için $T_1 \cap T_2$ ve \bar{T}_2 'de, (i+1). uçuşun varış yerinden başlayan uçuşları belirle.

Uyan uçuş yoksa,

T'_{1j} 'yi ana üsse gönderecek şekilde uçuş çizelgesinden uçuş ekle.

Uygun uçuş varsa,

bulunan uçuşlar arasından kalkış zamanı i. uçuşun varış zamanına en yakın olanı (i+1). uçuş olarak seç.

(i+1). uçuş $T_1 \cap T_2$ 'ye T_2 'den gelmişse

$T_1 \cap T_2$ 'de T_2 'den gelen (i+1). uçuş ile aynı varış ve kalkış yerine sahip başka uçuş yoksa

bulunan diğer uçuş alternatiflerini dene.

başka alternatif yoksa

T'_{1j} 'yi ana üsse gönderecek şekilde uçuş çizelgesinden uçuş ekle.

$T_1 \cap T_2$ 'de T_2 'den gelen (i+1). uçuş ile aynı varış ve kalkış yerine sahip başka uçuş varsa

Yasal kısıtlara uygun ise uçuşu (i+1). uçuş olarak ekle.

değilse

T'_{1j} 'yi ana üsse gönderecek şekilde uçuş çizelgesinden uçuş ekle.

(i+1). uçuş $T_1 \cap T_2$ 'ye T_2 'den gelmiyorsa

Yasal kısıtlara uygun ise uçuşu (i+1). uçuş olarak ekle.

değilse

T'_{1j} 'yi ana üsse gönderecek şekilde uçuş çizelgesinden uçuş ekle.

Adım 8: T'_{2j} çocuklarının arasından en fazla uçuş ayağı sayısına sahip olanı seç.

T'_1 ve T'_2 'yi mevcut yığına ekle.

çocuk sayısı= çocuk sayısı+2

Çaprazlama operatörü bir örnek için aşağıda açıklanmaktadır:

T_1 ve T_2 mevcut yığından seçilen kısıtlara uygun 2 ekip eşlemesidir ve kalkış yeri ve saati, varış yeri ve saati bilgileri her iki ebeveyn için sırasıyla Çizelge 4.2 ve 4.3' de gösterilmektedir.

Çizelge 4.2 Birinci ebeveyn için kalkış ve varış yerleri

Kalkış	IST	AYT	IST	ADB
	05:05	07:05	09:00	10:30
$T_1 \rightarrow$	1	89	21	106
Varış	AYT	IST	ADB	IST
	06:20	08:20	10:00	11:30

Çizelge 4.3 İkinci ebeveyn için kalkış ve varış yerleri

Kalkış	IST	AYT
	17:20	21:00
$T_2 \rightarrow$	40	94
Varış	AYT	IST
	18:35	22:15

Bu iki ekip eşlemesi için $T_1 \cap T_2$, \bar{T}_1 ve \bar{T}_2 kümeleri Çizelge 4.4' te gösterilmektedir.

Çizelge 4.4 Çaprazlama tablosu

$T_1 \cap T_2$					
T ₁ 'den gelen			T ₂ 'den gelen		
1	IST	AYT	40	IST	AYT
89	AYT	IST	94	AYT	IST
21	IST	ADB	\bar{T}_2		
106	ADB	IST			
\bar{T}_1					

Aşağıda, T_2 çocuğunun üretilmesi ayrıntılı olarak incelenmektedir. T_2 , IST ana üssünden başlayan 3 farklı alternatif uçuş ile başlayabilir. Bunlar;

$$T'_{21} \rightarrow 1$$

$$T'_{22} \rightarrow 40$$

$$T'_{23} \rightarrow 21$$

T'_{21} 'in (i+1). uçuşu, $T_1 \cap T_2$ ve \bar{T}_1 'de aranmakta ve sırasıyla 89, 94 numaralı uçuşlar olduğu görülmektedir. Ancak 89 numaralı uçuş T_1 dizisinden geldiği ve $T_1 \cap T_2$ 'de T_1 'den gelen AYT kalkışlı, İST varışlı başka bir uçuş olmadığı için, 94 numaralı uçuş ekip eşlemesine eklenmeye çalışılır. Burada, 89 numaralı uçuşun eklenmemesinin sebebi, üretilecek olan T'_1 çocuğu için $T_1 \cap T_2$ ortak uçuşlarından, kendisinden gelen en az bir uçuşun listede kalması ve T'_1 çocuğunun ortak uçuşlardan birini kapsamasını sağlamaktır. 94 numaralı uçuş da kısıtları sağlamaması nedeniyle eklenememekte ve T'_{21} alternatifi üretilememektedir.

T'_{22} 'in (i+1). uçuşu, sırasıyla 94, 89 olabilir. 94 kısıtlara uygundur ve T_1 'den gelmemektedir. T'_{22} çocuğu 94 numaralı uçuşun eklenmesiyle $T'_{22} \rightarrow 40$ 94 olmaktadır. 94 numaralı uçuştan sonra sırasıyla 1 ve 21 numaralı uçuşlar seçilebilir. Ancak bu uçuşlar da yukarıda açıklanan kısıtlara uymadıkları için eklenememektedir.

T'_{23} 'in (i+1). uçuşu, 106 olabilmektedir ($T'_{23} \rightarrow 21$ 106). 106 numaralı uçuştan sonra 40 ve 1 numaralı seçenekler arasından 40 eklenir. 40 numaralı uçuşun seçenekleri ise 94 ve 89'dur. Bu iki seçenekten uygun olan 94 uçuşunun eklenmesiyle, $T'_{23} \rightarrow 21$ 106 40 94 olacaktır.

Sonuç olarak;

$$T'_{21} \rightarrow \text{ekip eşlemesi yapılamadı.}$$

$$T'_{22} \rightarrow 40$$

$$T'_{23} \rightarrow 21$$
 106 40 94 alternatifleri arasından $T'_2 = T'_{23}$ 'dir.

T'_1 ise T'_2 'de seçilen uçuşlar Çizelge 4.4'ten silindikten sonra çözülür.

$$T'_1 \rightarrow 1$$
 89 olarak üretilmiştir.

Burada amaç, ebeveyn olarak seçilen ekip eşlemelerinden daha düşük maliyetli yeni ekip eşlemeleri oluşturmaktan ziyade, GA'dan bir sonraki adımda çözülecek olan küme kapsama probleminin çözümü için alternatif ekip eşlemeleri üretebilmektir.

4.3.5.2 Mutasyon operatörü

Çaprazlama aşamasında üretilen aday çocuk, $T_1 \cap T_2$ \bar{T}_1, \bar{T}_2 arasında arama yaptığı bölgelerde var olan uçuşlar arasından kısıtları sağlayan uygun bir uçuş bulamıyorsa, uçuş çizelgesinden, çocuğun başladığı ana üsse varmasını sağlayacak şekilde kısıtları sağlayan uygun uçuş seçilerek ana üsse dönmesi sağlanır. Böylece ebeveynlerde bulunmayan yeni bir uçuş ekip eşlemesine eklenmiş olur.

Ayrıca, Adım 5 ve Adım 8'de görüldüğü gibi bir çocuğu üretmek için birden fazla olasılık var ise, bu alternatiflerin arasından en fazla uçuş sayısına sahip olan seçilir. Böylece, en iyi çocuğun seçiminin gizli mutasyon ile elde edildiği söylenebilir.

4.3.6 Algoritmanın adımları

GA tabanlı algoritmaya ait akış şeması Ek 6'da verilmektedir. Geliştirilen GA tabanlı yaklaşıma ait algoritma aşağıdadır:

Adım 1: Başlangıç yığınına rassal olarak üret ve dizilerin amaç fonksiyonu değerlerini (4.1) numaralı eşitliği kullanarak hesapla.

iter=0: pop=50

Adım 2: Yeni üretilen dizi sayısı 20 olana kadar, turnuva seçim mekanizmasını kullanarak mevcut yığından seçilen dizilere çaprazlama ve 4.3.5.2'de belirtilen durumlarda mutasyon uygula.

Adım 3: Yeni üretilen dizilerin amaç fonksiyonu değerlerini (4.1) numaralı eşitliği kullanarak hesapla.

Adım 4: Yeni üretilen dizileri mevcut yığına ekle.

pop=pop+20

Adım 5: Uçuş çizelgesindeki mevcut yığın tarafından kapsanmamış olan uçuşları belirle.

Adım 6: Kapsanmayan uçuş sayısı 15'den fazla ise

- i. Mevcut yığın tarafından kapsanmayan uçuşları içerecek şekilde, kapsanmayan uçuş sayısı/2 kadar yeni diziyi 4.2'de anlatılan algoritmayı kullanarak rassal olarak üret.
- ii. Yeni üretilen rassal dizilerin amaç fonksiyonu değerlerini (4.1) numaralı eşitliği kullanarak hesapla.
- iii. Yeni üretilen dizileri mevcut yığına ekle.

pop=pop+ (kapsanmayan uçuş sayısı/2)

değilse Adım 7'e git.

Adım 7: Mevcut yığının içerisinde birbirini ile aynı olan diziler varsa sil.

pop=pop - silinen dizi sayısı

iter=iter+1

Adım 8: iter ≤ DK ise Adım 2'e git.

iter= iterasyon sayısı

DK=Durdurma koşulu olarak belirlenen iterasyon sayısı

pop= yığın genişliği

4.3.7 En iyi ekip eşlemesinin belirlenmesi için küme kapsama problemi

GA tabanlı yaklaşım ile kısıtlara uyan, kaliteli ve düşük maliyete sahip belirli sayıda ekip eşlemesi oluşturulur, ancak mümkün tüm ekip eşlemeleri oluşturulmaz. Bu yaklaşım ile elde edilen çözümlerin uçuş çizelgesindeki tüm uçuşları kapsayacağı garanti edilir.

En iyi ekip eşlemesinin belirlenmesi aşamasında, ise GA tabanlı yaklaşım ile oluşturulan ekip eşlemeleri arasından en düşük maliyete sahip ve uçuş çizelgesinde bulunan tüm uçuşları içeren en az sayıda ekip eşlemesi, küme kapsama problemi ile çözülür. Bu problem, GA tabanlı yaklaşım ile elde edilen çözümleri girdi olarak alır ve yalnızca bir kez çalışır. Problemin, küme kapsama problemi olarak modellenmesi, çözümde bir uçuşun birden fazla kez kapsanmasına, yani ekip personelinin üsse dönmek ya da ekip eşlemesine devam

etmek amacıyla bir başka üsse yolcu olarak taşınmasına izin verilmesidir. Problemin küme ayrıştırma problemi yerine küme kapsama problemi olarak ele alınması, her uçuşun bir ekip, ekip eşlemesi tarafından kapsanmaya zorlanması durumundan daha iyi sonuçlara götürebilir. Ayrıca, her uçuşun sadece bir kez kapsanması kısıtını sağlayan yasal uygun çözümler bulunmayabilir. Küme kapsama problemi NP- complete problemler grubunda yer almaktadır ve büyük boyutlu veri setleri için, bu problemin en iyi çözümünü veren etkin bir algoritma yoktur. Kesin çözüm veren en iyileme metotlarından Dallandır-Kes tabanlı algoritmalar, 400 uçuş ayağı ve 4000 ekip eşlemesine kadar olan büyüklükteki problemleri çözmektedir [14].

GA tabanlı yaklaşımda bir uçuştan oluşturulan ekip eşlemesi alternatiflerinin sayısının fazla olması, bir sonraki aşamada, yani küme kapsama probleminde, o uçuşu içeren, seçilebilecek ekip eşlemesi alternatifinin sayısının fazla olmasıdır. Bu da en iyileme aşamasında arama uzayının çeşitliliğini artırır ve yüksek kalitede çözümler elde etmesini kolaylaştırır. Ancak, oluşturulan ekip eşlemelerinin sayısının çok fazla olması da en iyileme aşamasının performansını büyük ölçüde düşürebilmektedir.

4.4 Sütun Üretme Yaklaşımı

Sütun üretme yaklaşımı, 4.1’de özellikleri verilen iki ayrı veri seti (uçuş çizelgesi) için belirtilen kısıtlar altında çözülmüştür. Ana problem olarak küme kapsama problemi, alt problem olarak ise en kısa yol problemi kullanılmıştır.

4.4.1 Ana problem

Kısıtlar:

$$\sum a_{ij}x_j \geq 1 \quad i = 1, \dots, n \quad (4.2)$$

$$x_j \in (0,1) \quad j = 1, \dots, m \quad (4.3)$$

Amaç fonksiyonu:

$$\text{enk} \sum_{j=1}^m c_j x_j \quad (4.4)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{i. uçuş j. ekip eşlemesi tarafından kapsanıyorsa} \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{ekip eşlemesi j çözümde varsa} \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

(4.2) ve (4.3) numaralı kısıtlar, her i. uçuşunun en az bir ekip eşlemesi tarafından kapsanmasını sağlar. Problem, Türk Hava Yolları'nın Ocak 2008 TK iç sefer uçuş çizelgesi için çözülecek olursa i indisinin alabileceği en büyük değer, yani n uçuş sayısı olan 172'ye eşit olacaktır. İkinci uçuş çizelgesi için ise bu değer yine uçuş sayısı olan 150'ye eşit olacaktır. m ise sütun, yani ekip eşlemesi sayısına karşılık gelmektedir. Başlangıçta bu değer, tüm uçuşları içerecek şekilde rassal olarak üretilen başlangıç sütunlarının sayısına eşittir, ancak algoritmanın ilerleyen tekrarlarında bu sayı değişmektedir. Problemden m değeri için üst sınır 1000 olarak belirlenmiştir. c_j , j. ekip eşlemesinin maliyetidir, yani küme kapsama probleminin maliyeti çözümde yer alan ekip eşlemelerinin maliyetleri toplamı olarak ifade edilir ve aşağıdaki şekilde hesaplanır:

En büyük = {0.5 * uçuş görev süresi, uçuş süresi, garanti edilen en az ödeme miktarı}

Garanti edilen en az ödeme miktarı 120 olarak belirlenmiştir. En az iki uçuş ayağının bir ekip eşlemesi oluşturabileceği bilinmektedir. Ek 2 ve Ek 3'teki uçuş çizelgeleri incelendiğinde en kısa uçuşun uçuş süresinin 60 dakika olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, bir ekip eşlemesine atanan ekip personeli en az 120 dakikalık uçuş görevini yerine getirmeyi garanti etmektedir. Bu da maliyet parametrelerinden biri olan, garanti edilen en az ödeme miktarını temsil etmektedir. Uçuş süresi bir ekip personeli tarafından uçularak geçirilen toplam süredir. Uçuş görev süresi ise bir ekip personeli için, ilk uçuşun başlangıcında

uçağının motorunun çalışması ile son uçuşta uçağın motorunun durması arasında geçen toplam süredir.

Küme kapsama modeli verilen uygun ekip eşlemeleri arasından ekip için en iyi çizelgeyi seçmektedir. Bu problemin çözümünden elde edilen ikil değişkenler düğümlerin maliyet hesabında kullanılmak üzere alt probleme gönderilmektedir. Yukarıda gösterildiği gibi küme kapsama problemi tamsayılı olarak modellenmektedir. Ancak, yapılan çalışmada ikil değişkenlerin değerlerinin elde edilmesi amacıyla küme kapsama modeli doğrusal olarak gevşetilerek çözülmektedir. Yani x_j karar değişkeninin $0 \leq x_j \leq 1$ arasında değer almasına izin verilmektedir. Ancak, son çözümde karar değişkeninin tamsayı olması gerekmektedir. Bunun için sütun üretme algoritması durdurma koşulu sağlanana kadar çalıştıktan sonra, küme kapsama problemi tamsayılı olarak, yani doğrusal gevşetme olmaksızın tekrar çözülmekte ve tamsayılı sonuçlar elde edilmektedir.

4.4.2 Şebeke yapısı

Yeni ekip eşlemeleri, aşağıda açıklanan şebekede en kısa yol probleminin çözülmesiyle elde edilmektedir. 3.2.1.3' de literatürde kullanılan şebeke tipleri açıklanmaktadır. Bu çalışmada kullanılan şebeke de uçuş şebekesidir. Ancak literatürde daha önce yapılmış çalışmalarda uygulanan şebeke yapısında, düğümler uçuş çizelgesindeki uçuşların kalkış ve varış yerlerini temsil etmekte iken, uçuş çizelgesindeki her uçuşu temsil eden de bir ayrıt bulunmaktadır. Bu çalışmada kullanılan şebekede ise düğümler uçuş çizelgesindeki her uçuşa karşılık gelmekte iken, düğümler arasındaki ayrıtlar uçuşlar arasındaki mümkün bağlantıları göstermektedir. Uçuşların düğümlerle gösterilmesi ile problemdeki karar değişkeni sayısının azalması sağlanır ayrıca, şebeke yapısının karmaşıklığı da azaltılmış olur.

Bölüm 4.1'de yapılan problem tanımında da görüldüğü gibi her iki problem de Ankara ve İstanbul olmak üzere iki ana üsse sahiptir. Dolayısıyla problemin çözümünde Ankara ve İstanbul ana üsleri için iki ayrı şebeke oluşturulmuştur. Şebeke oluşturulurken iki yapay düğüm kullanılmaktadır. Kaynak yapay düğümü ile ana üssü bağlayan ayrıtlar, ana üsten çıkarak son yapay düğüme bağlanan

ayrıntlar ile bir ekip eşmesinin başladığı ana üste sonlanması kısıtı sağlanmış olur. Ayrıca şebeke oluşturulurken i düğümün varış yeri, j. düğümün kalkış yerine eşit ise ve i. düğümün varış saati ile j. düğümün kalkış saati arasındaki süre 20 dakikadan fazla ise iki düğüm arasında bağlantı olduğu söylenir. Böylece birbirini takip eden iki uçuş ayağı arasında izin verilen mola süresi (en az bekleme süresi) 20 dakika olmalıdır kısıtı da sağlanmış olur.

4.4.3 Alt problem

Ekip eşlemelerinin üretilmesi için geliştirilen en kısa yol problemine, Bölüm 4.1'de verilen probleme özgü kuralları sağlamak amacıyla yeni kısıtlar eklenmiştir.

Kısıtlar:

$$\sum_{i,j \in N} x_{ij} - \sum_{i,j \in N} x_{ji} = 0 \quad \forall i \in N \quad (4.5)$$

$$\sum_{j \in N} x_{oj} = 1 \quad (4.6)$$

$$\sum_{i \in N} x_{id} = 1 \quad (4.7)$$

$$\sum_{i,j \in N} l_i x_{ij} \leq 480 \quad (4.8)$$

$$\sum_{i,j \in N} l_i x_{ij} + \sum_{i,j \in R} r_{ij} x_{ij} \leq 840 \quad (4.9)$$

$$2 \leq \sum_{i,j \in N} x_{ij} \leq 4 \quad (4.10)$$

$$x_{ij} \in (0, 1) \quad (4.11)$$

$$v \geq 0 \quad (4.12)$$

N düğümler kümesini, R ayrıntlar kümesini göstermektedir. İlk kısıt, i. düğüme giren toplam ayrınt akışı ile i. düğümden çıkan toplam ayrınt akışının birbirine eşit olmasını sağlar. İkinci kısıt, kaynak yapay düğümden çıkan toplam ayrınt akışının 1'e eşit olmasını sağlarken, üçüncü kısıt ise varış yapay düğüme olan girişlerin 1'e eşit olmasını sağlar.

(4.8), (4.9) ve (4.10) numaralı kısıtlar probleme özgü, havayolu şirketi tarafından belirlenmiş olan kurallara uymak amacıyla modele eklenmiştir. (4.8) numaralı kısıt (l_i) toplam uçuş süresinin 8 saatten az olmasını sağlamakta iken, (4.9) numaralı kısıt ise (l_i+r_{ij}) ise toplam uçuş görev süresinin 14 saatten az olmasını sağlamaktadır. (4.10) numaralı kısıt ile bir uçuş görev süresinde izin verilen iniş sayısının, yani uçuş ayağı sayısının 2 ile 4 arasında olmasını sağlamaktadır. x_{ij} ise i . uçuş ile j . uçuş arasında bağlantı olup olmadığını gösteren karar değişkenidir, bağlantı varsa 1 değerini alır. v alt problemin amaç fonksiyonunda kullanılan karar değişkenidir ve aşağıda açıklanmaktadır.

Alt problemin amaç fonksiyonu:

$$Enk \quad Enb \left(0.5 \times \left(\sum_{i,j \in N} l_i x_{ij} + \sum_{i,j \in R} r_{ij} x_{ij} \right); \sum_{i,j \in N} l_i x_{ij}; 120 \right) - \sum_{i,j \in N} \alpha_i x_{ij} \quad (4.13)$$

Alt problemde ekip eşlemesinin seçilmesi, negatif indirgenmiş maliyet kriterine göre belirlenir. Doğrusal gevşetilmiş ana problemin en iyi çözümünden elde edilen ikil değişkenler alt problemin amaç fonksiyonunun belirlenmesinde kullanılır. Çizelgedeki her uçuş için, doğrusal gevşetilmiş ana problemin ikil değişkeni mevcuttur. α_i ikil değişkeni göstermektedir. Alt problemin amacı, negatif indirgenmiş maliyete sahip bir ekip eşlemesi belirlemektir. (4.13) numara ile gösterilen alt problemin amaç fonksiyonu (negatif indirgenmiş maliyet) doğrusal değildir, doğrusal hale getirmek için aşağıda belirtilen (4.14), (4.15) ve (4.16) numaralı kısıtlar probleme eklenmektedir. (4.14) numaralı kısıt ile v ile belirtilen karar değişkeninin (uçuş görev süresi \times 0.5)'den büyük olması, (4.15) numaralı kısıt ile uçuş süresinden büyük olması ve (4.16) numaralı kısıt ile de garanti edilen en az ödeme miktarından büyük olması sağlanır.

$$v \geq \left(\sum_{i,j \in N} l_i x_{ij} + \sum_{i,j \in R} r_{ij} x_{ij} \right) \times 0.5 \quad (4.14)$$

$$v \geq 120 \quad (4.15)$$

$$v \geq \sum_{i,j \in N} l_i x_{ij} \quad (4.16)$$

Bu durumda alt problemin yeni amaç fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$Enk \quad v - \sum_{i \in N} \alpha_i x_{ij} \quad (4.17)$$

Daha önce 4.4.2'de belirtildiği üzere problemde, her iki ana üs için iki ayrı şebeke oluşturulmaktadır. Dolayısıyla, alt problem de her iki ayrı şebeke için ayrı ayrı çözülmektedir. Ana probleme hangi şebekeden gelen ekip eşlemesinin ekleneceği kararı ise, bu iki şebeke için elde edilen amaç fonksiyonu değeri, yani negatif indirgenmiş maliyeti en düşük olanının seçilmesi ile verilir.

4.4.4 Sütun üretme algoritması

Sütun üretme yaklaşımına ait akış şeması Ek 7'de verilmektedir, algoritmaya ait akış şeması ise aşağıdadır:

Adım 1: Ankara ve İstanbul ana üsleri için uçuş çizelgesini girdi olarak alarak iki ayrı şebeke oluştur.

Adım 2: Yeterli sayıda başlangıç sütunu üret (Rassal olarak ya da GA tabanlı algoritma ile).

Adım 3: Başlangıç sütunlarını kullanarak ana problemi doğrusal olarak çöz.

Adım 4: Ana problemin çözümü ile elde edilen mevcut çözümün ikil değişkenlerini alt probleme gönder.

Adım 5: Ana problemin ikil değişkenleri, alt problemin amaç fonksiyonunun hesaplanmasında kullanılmaktadır. Her iki şebeke için alt problemi çöz.

Adım 6: Alt problemlerden, amaç fonksiyonu değeri düşük olanı alt problemin çözümü olarak belirle ve alt problemin çözümü olarak üretilen yeni sütunu ana probleme gönder.

Adım 7: Alt problemin çözümünün ana probleme gönderilmesi ile ana probleme yeni bir sütun eklenmiş olur ve ana problem eklenen yeni sütun ile birlikte tekrar çözülür ve yeni ikil değişkenler hesaplanır.

Adım 8: Bu süreç, alt problemin amaç fonksiyonu değeri - 0.01'den küçük olduğu sürece devam eder. Ayrıca, ana problemin çözümünde 20 tekrar boyunca bir iyileşme olmazsa da durur.

Adım 9: Durdurma koşulu sağlandıktan sonra ana problemi tamsayılı olarak çöz.

5. UYGULAMA

Yapılan çalışmada, rassal üretimli en iyileme algoritması, GA tabanlı algoritma, sütun üretme yaklaşımı ve karma sütun üretme yaklaşımı, Ek 2 ve Ek 3' te verilen 2 ayrı veri seti için çözülmüş ve sonuçlar elde edilmiştir.

İlk olarak, rassal üretimli eniyileme adı verilen, bilgiye dayalı rassal bir algoritma geliştirilmiştir. İkinci olarak ise, başlangıç çözümü rassal olarak oluşturulan GA tabanlı algoritma kullanılmıştır. GA tabanlı ve rassal üretimli eniyileme algoritmasında ekip eşlemeleri, Microsoft Excel ve VBA (Visual Basic for Application) kullanılarak oluşturulmuş, en iyi ekip eşlemelerinin seçilmesi problemi ise Lingo 8.0 ile küme kapsama problemi ile modellenerek çözülmüştür.

172 uçuşlu THY verisi için, rassal üretimli en iyileme algoritması+küme kapsama problemi (A1) ve GA tabanlı algoritma+küme kapsama problemi (A2), 10 kez çalıştırılmış ve her çalıştırmada elde edilen en iyi çözümün maliyeti, 10 tekrarın maliyet ortalaması, çalışma süresi ortalaması ve değişim katsayısı Çizelge 5.1' de verilmektedir.

Çizelge 5.1 172 uçuşlu THY uçuş çizelgesi için sonuçlar

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	Süre (sn.)	en iyi	Ort.	D.K. (%)
A1	17500	17236	19118	18582	16879	18411	17887	16494	16739	18758	2208	16494	17760,4	5,215
A2	16989	16734	17588	17537	16210	18018	17167	16119	16546	18097	1307	16119	17100,5	4,125

Değişim katsayısı, standart sapmanın ortalamaya göre yüzde kaç değişim gösterdiğini belirtir. Çizelge 5.1' de görüldüğü gibi 10 tekrarda elde edilen çözümlerin maliyetlerinin değişim katsayısı, ilk algoritma için %5,215 iken, ikinci algoritma için %4,125 olarak hesaplanmıştır. Değişim katsayısı değerlerinin küçük olması, varyansın küçük olduğunu ve verilerin dar bir alana yayıldıklarını göstermektedir. Ayrıca, geliştirilen algoritmanın etkin olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.1'de görüldüğü gibi iki algoritmanın çalıştırılması sonucu elde edilen en düşük maliyete (16119) sahip çözüm, GA tabanlı algoritma+küme kapsama modeli ile elde edilmiştir. Ayrıca, 10 çalıştırma için, ikinci algoritmanın maliyet ortalaması

birinci algoritmaya göre %3, 72 daha az iken ve ikinci algoritma %40,80 daha kısa sürede sonuca ulaşmaktadır.

EK 8' de iki algoritmanın çalıştırılması sonucu elde edilen en düşük maliyete (16119) sahip çözüm için oluşturulan ekip eşlemeleri, eşlemelerin kalkış / varış yeri ve saatleri ile her eşleşmenin maliyeti gösterilmektedir. Ek 8'de görüldüğü gibi problemin çözümü sonucunda, 23 tane Ankara ve 48 tane İstanbul ana üssünden başlayan toplamda 71 tane ekip eşlemesi oluşturulmuştur. Seçilen ekip eşlemelerinin sayısı, aynı zamanda atama yapılacak olan ekip personeli sayısıdır. 98, 127, 149, 152 ve 154 numaralı uçuş ayaklarının çizelgede iki kez kapsandığı görülmektedir. Bunun nedeni pas uçuşlarına izin verilmesi, yani en iyileme probleminin küme kapsama problemi olarak modellenmesidir.

İkinci veri seti olan 150 uçuşlu THY verisi için de, rassal üretimli en iyileme algoritması+küme kapsama problemi (A1) ve GA tabanlı algoritma+küme kapsama problemi (A2) 10 kez çalıştırılmış ve her çalıştırmada elde edilen en iyi çözümün maliyeti, 10 tekrarın ortalaması, çalışma süresi ortalaması ve değişim katsayısı Çizelge 5.2' de verilmektedir.

Çizelge 5.2 150 uçuşlu THY uçuş çizelgesi için sonuçlar

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	Süre (sn.)	eniyi	Ort.	D.K (%)
A1	14059	16414	16678	15313	13959	14123	14268	13746	14906	13867	2012	13746	14733	7,275
A2	13234	15122	15795	14201	14190	14555	14167	14526	14496	14093	725	13234	14437	4,671

Çizelge 5.2'de görüldüğü gibi en iyi çözüm 13234 maliyet değeri ile GA tabanlı algoritma+ küme kapsama modeli ile elde edilmiştir. Çizelge 5.2' de görüldüğü gibi 10 tekrarda elde edilen çözümlerin maliyetlerinin değişim katsayısı ilk algoritma için %7, 275 iken, ikinci algoritma için %4,675 olarak hesaplanmıştır. Değişim katsayısının küçük olması varyansın küçük olduğunu ve verilerin dar bir alana yayıldıklarını göstermektedir. Ayrıca, geliştirilen algoritmanın etkin olduğunu göstermektedir. Bunun yanısıra, 10 çalıştırma için, ikinci algoritmanın maliyet ortalaması birinci algoritmaya göre %2,01 daha az iken ve ikinci algoritma %63,97 daha kısa sürede sonuca ulaşmaktadır.

Ek 9'de iki algoritmanın çalıştırılması sonucu elde edilen en düşük maliyete (13234) sahip çözüm için oluşturulan ekip eşlemeleri, ekip eşlemelerinin kalkış / varış yeri ve saatleri ile her eşleşmenin maliyeti gösterilmektedir. Ek 9'de görüldüğü gibi problemin çözümü sonucunda, 12 tane Ankara ve 47 tane İstanbul ana üssünden başlayan, toplamda 59 tane ekip eşlemesi oluşturulmuştur ve çizelgenin toplam maliyeti 13234'tür. Bu çizelgede de birden fazla kez kapsanan uçuşlar bulunmaktadır, yani bir uçuşa birden fazla ekip personeli atanmıştır. Bu durum ekip çizelgesinin maliyetini arttırmaktadır. Maliyeti azaltıcı yönde uygulanabilecek bir yöntem; fazladan atanan ekipleri, ilave ekip olarak kullanmaktır. SHT 6A-50 Uygulama Esasları Talimatı'nda ilave ekip, bir hava aracının uçuş hareketi için gerekli olan asgari sayıdaki kokpit ekibinden fazla sayıda olan ve gerektiğinde her hangi bir kokpit ekibinin görevini devralabilecek ehliyetle, her iki pilot sandalyesinde görev yapabilecek ve sağ koltuk eğitimi almış kaptan pilotu ihtiva eden diğer bir kokpit ekibi, kabin ekibi için ise standart sayıdan bir fazla kabin memuru olarak tanımlanmıştır. Maliyeti azaltıcı yönde uygulanabilecek diğer bir yöntem ise, birden fazla kez kapsanan uçuşları çizelgeden silmektir. Ek 10'da, genetik tabanlı algoritmanın (A2) 4. çalıştırılması sonucu elde edilen çözüm verilmektedir. Koyu renk ile işaretlenen uçuşlar, çizelgede birden fazla ekip eşlemesi tarafından kapsanan ve silinmeye aday olan uçuşları göstermektedir.

Çizelge 5.3a'da görüldüğü gibi 27 ve 126 numaralı uçuşlar 1 ve 6 numaralı ekip eşlemeleri tarafından kapsamaktadır.

Çizelge 5.3a Tekrarlı uçuş içeren ekip eşlemeleri

1	21 106 27 126	360	ist	adb	adb	ist	ist	erz	erz	ist
			09:00	10:00	10:30	11:30	12:30	14:30	15:25	17:25
6	11 144 27 126	450	ist	tzk	tzk	ist	ist	erz	erz	ist
			07:30	09:15	10:00	11:45	12:30	14:30	15:25	17:25

1 numaralı ekip eşlemesinden 27 ve 126 numaralı uçuşlar silinirse, yeni ekip eşlemesinin maliyeti 120 olacaktır. 1 numaralı ekip eşlemesinin maliyetinin, 360'dan 120'ye düşmesi ile 240 birimlik bir kazanç sağlanmış olur. Eğer bu uçuşlar 6 numaralı ekip eşlemesinden silinirse 450 olan maliyet 210'a düşer ve yine 240

birimlik bir kazanç sağlanır. Dolayısıyla 27 ve 126 numaralı uçuşlar 1 ya da 6 numaralı ekip eşlemelerinin birinden silinir.

Çizelge 5.3b'de görüldüğü gibi 58 ve 116 numaralı uçuşlar da 27 ve 52 numaralı ekip eşlemeleri tarafından kapsamaktadır.

Çizelge 5.3b Tekrarlı uçuş içeren ekip eşlemeleri

27	40 93 58 116	270	ist	ayt	ayt	ist	ist	adb	adb	ist
			17:20	18:35	19:30	20:45	21:30	22:30	23:00	00:00
52	38 100 58 116	300	ist	ada	ada	ist	ist	adb	adb	ist
			17:15	18:45	19:30	21:00	21:30	22:30	23:00	00:00

58 ve 116 numaralı uçuşlar, 27 ve 52 numaralı ekip eşlemelerinden silinirse her iki ekip eşlemesinin de yeni maliyeti 150 olacaktır. Bu durumda 27 numaralı ekip eşlemesinden silinmeleri ile elde edilen kazanç 120 olurken, 52 numaralı ekip eşlemesinden silinmeleri ile elde edilen kazanç 150 olacaktır. Bu nedenle 58 ve 116 numaralı uçuşların 52 numaralı ekip eşlemesinden silinmesi toplam maliyetin daha fazla düşmesine neden olacaktır.

Çizelge 5.3c'de görüldüğü gibi 26 ve 91 numaralı uçuşlar 19 ve 21 numaralı ekip eşlemeleri tarafından kapsamaktadır.

Çizelge 5.3c Tekrarlı uçuş içeren ekip eşlemeleri

19	7 123 26 91	300	ist	dım	dım	ist	ist	ayt	ayt	ist
			07:05	08:20	09:10	10:25	12:15	13:30	14:05	15:20
21	9 120 26 91	380	ist	diy	diy	ist	ist	ayt	ayt	ist
			07:15	09:10	09:55	11:50	12:15	13:30	14:05	15:20

19 numaralı ekip eşlemesinden, 26 ve 91 numaralı uçuşların silinmesiyle eşlemenin maliyeti 150 olmakta iken, 21 numaralı eşlemenin maliyeti 230 birim olmaktadır. Her ikisinden de sağlanan kazanç 150 olacağı için iki eşlemenin birinden 26 ve 91 numaralı uçuşlar silinir.

Çizelge 5.3d'de görüldüğü gibi 58 ve 116 numaralı uçuşlar da 27 ve 52 numaralı ekip eşlemeleri tarafından kapsamaktadır.

Çizelge 5.3d Tekrarlı uçuş içeren ekip eşlemeleri

7	17 90 29 110	270	ist	ayt	ayt	ist	ist	adb	adb	ist
			08:25	09:40	10:30	11:45	13:00	14:00	15:00	16:00
16	15 140 29 110	285	ist	szf	szf	ist	ist	adb	adb	ist
			08:00	09:20	10:10	11:35	13:00	14:00	15:00	16:00

7 numaralı ekip eşmesinden 29 ve 110 numaralı uçuşların silinmesiyle 7 numaralı ekip eşlemesinin maliyeti 150 olmaktadır ve buradan sağlanan kazanç 120'dir. 16 numaralı ekip eşlemesinden bu uçuşların silinmesiyle eşlemenin maliyeti 165'e düşmektedir. Buradan sağlanan kazanç yine 120 olduğu için 7 ve 16 numaralı ekip eşlemelerinin birinden 29 ve 110 numaralı uçuşlar silinebilir.

Çizelge 5.3e ile gösterilen 9 numaralı ekip eşlemesinde yer alan 86 numaralı uçuş, aynı zamanda 10 numaralı ekip eşlemesi tarafından kapsanırken, 4 numaralı uçuş da 22 numaralı ekip eşlemesi tarafından kapsamaktadır. 10 ve 22 numaralı ekip eşlemelerinden bu uçuşları silmek, bu ekip eşlemelerinin kısıtlara uygunluğunu bozacaktır. 9 numaralı eşlemeden silindikleri takdirde Ankara ana üssünden başlayan ekip tekrar Ankara ana üssüne dönecektir ve maliyette de 230 birimlik kazanç sağlanacaktır.

Çizelge 5.3e Tekrarlı uçuş içeren ekip eşlemeleri

9	76 114 86 4	385	ank	adb	adb	ank	ank	ist	ist	ank
			17:40	19:00	19:50	21:05	22:45	23:45	05:30	06:30
10	35 92 57 86	290	ist	ayt	ayt	ist	ist	ank	ank	ist
			16:20	17:55	18:45	20:00	21:00	22:00	22:45	23:45
22	4 61 105	200	ist	ank	ank	adb	adb	ist		
			05:30	06:30	08:10	09:30	10:00	11:00		

Aynı şekilde 24 ve 69 numaralı uçuşlar da başka ekip eşlemeleri tarafından kapsamaktadır. Ancak, bu eşlemelerden silinmeleri kısıtları bozmaktadır. 11 numaralı ekip eşlemesinden silindikleri zaman eşlemenin yeni maliyeti 150 olmakta ve 120 birim kazanç sağlanmaktadır.

Çizelge 5.3f Tekrarlı uçuş içeren ekip eşlemeleri

11	5 104 24 69	240	ist	adb	adb	ist	ist	ank	ank	ist
			06:30	07:30	09:00	10:00	11:05	12:05	13:00	14:00

Böylece, yapılan işlemler sonucu toplam maliyette 1010 birimlik bir kazanç sağlanmıştır. Çizelgenin toplam maliyeti 13191'e düşürülmüştür. Elde edilen maliyet iki algoritmanın çalıştırılması sonucu elde edilen en küçük maliyet değerinden daha küçüktür ve çizelge 55 adet ekip eşlemesinden oluşmaktadır. Elde edilen yeni çözüm Ek 10'da verilmektedir.

Problem için uygulanan sütun üretme yaklaşımı, Gams 22.5 ile modellenerek çözülmüştür. Problemin çözümünde, başlangıç sütunları 2 farklı yaklaşımla elde edilmiştir. Bu yaklaşımlardan ilki (sütun üretme yaklaşımı), başlangıç çözümünü (sütunlarını) rassal olarak üretmekte iken, ikincisi (karma sütun üretme yaklaşımı) ise GA tabanlı algoritma ile elde edilen bir çözümü kullanmaktadır.

172 uçuşlu THY verisinde sütun üretme tekniği için uygulanan 1. ve 2. yaklaşımlar ile elde edilen en iyi değer, çalışma süreleri ve 1. yaklaşım ile elde edilen değer 2. yaklaşım ile elde edilen değerden yüzde sapma değeri Çizelge 5.4'de verilmektedir.

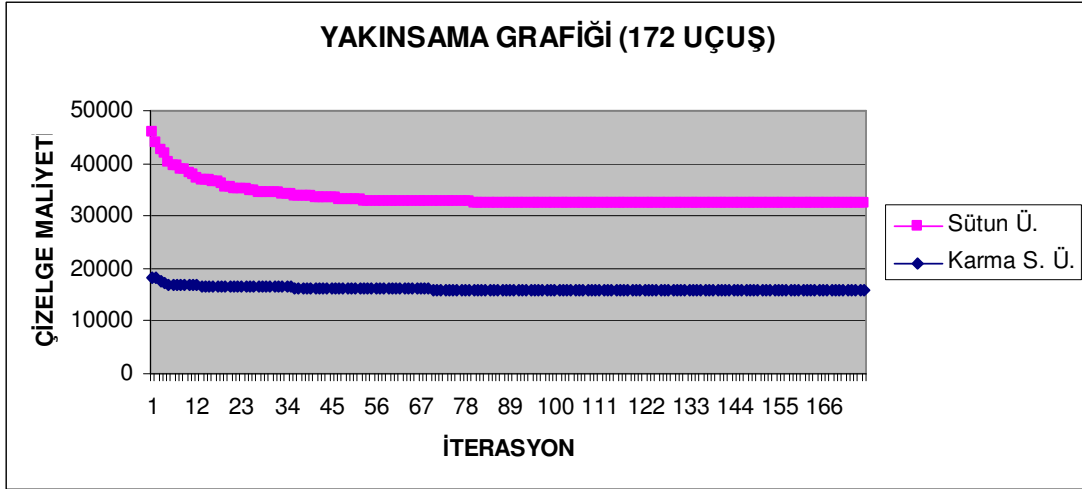
Çizelge 5.4 172 uçuşlu THY uçuş çizelgesi için Sütun Üretme yaklaşımı sonuçları

Sütun Üret. Y.		Karma Sütun Üret. Y.		sapma (%)
<i>en iyi ç.</i>	<i>süre (sn)</i>	<i>en iyi ç.</i>	<i>süre (sn)</i>	
16521	10322.359	15918	5224.703	3,7882

Başlangıç sütunlarının rassal olarak üretildiği 1. yaklaşımda 91 adet başlangıç sütunu bulunmakta iken, karma yaklaşımın başlangıç sütunu sayısı 66'dır. Sütun üretme yaklaşımının maliyet değerinin, karma sütun üretme yaklaşımı ile elde edilen çözümün maliyetinden sapma yüzdesi 3,78'dir. Buradan anlaşılacağı üzere karma sütun üretme yaklaşımı ile daha düşük maliyete sahip bir ekip çizelgesi elde edilmektedir. Ayrıca, karma yaklaşım, sütun üretme yaklaşımına göre yaklaşık %49,38 daha kısa zamanda çözüme ulaşmaktadır. Karma yaklaşım ile elde edilen çözüm Ek 11'de gösterilmektedir.

Ek 11'den görüldüğü gibi çizelgenin toplam maliyeti 15918 'dir ve 63 tane ekip eşlemesinden oluşmaktadır.

Sütun üretme ve karma sütun üretme yaklaşımlarının sonuçlarına ilişkin yakınsama grafiği Şekil 5.1’de verilmektedir.



Şekil 5.1 Sütun Üretme Yaklaşımları Yakınsama Grafiği (172 uçuş)

Şekil 5.1’de görüldüğü üzere, rassal başlangıç sütunlarına sahip sütun üretme yaklaşımı, en düşük maliyet değerine (16507), 134. iterasyonda (tekrarda) ulaşmakta iken karma sütun üretme yaklaşımı, en düşük maliyet değerine (15918), 157. iterasyonda (tekrarda) ulaşmaktadır. Ancak, Bölüm 4.3.1’de açıklandığı üzere, sütun üretme algoritması durdurma koşulu sağlanana kadar çalıştıktan sonra, küme kapsama problemi tamsayılı olarak, yani doğrusal gevşetme olmaksızın tekrar çözülmekte ve tamsayılı sonuçlar elde edilmektedir. Sütun üretme yaklaşımının tamsayılı çözümü sonucu elde edilen maliyet değeri 16521 olarak bulunmuştur. Şekil 5.1’de görüldüğü üzere tekrar sayısı arttıkça, her iki yaklaşımla da elde edilen çizelgenin maliyeti azalan bir eğilim göstermektedir.

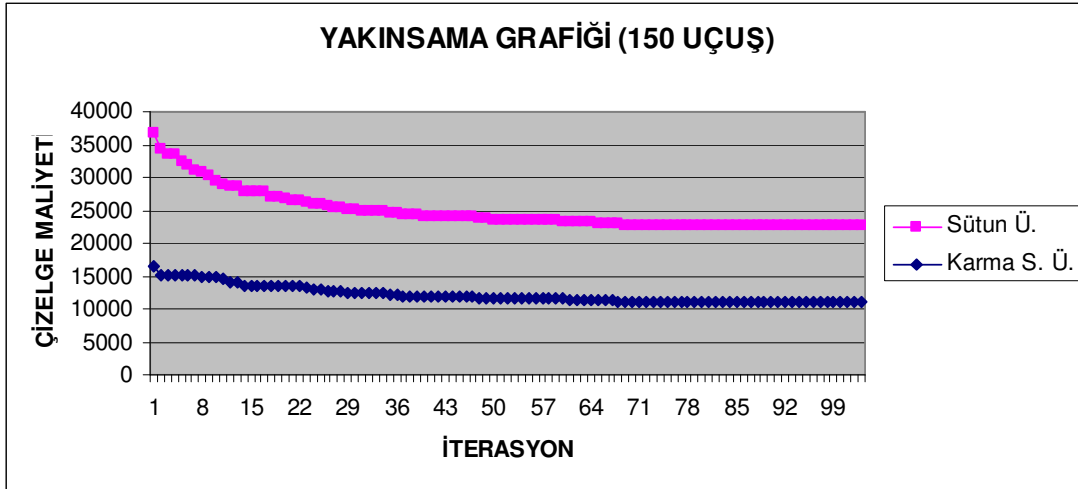
150 uçuşlu THY verisi için uygulanan sütun üretme yaklaşımlarının sonuçları ise Çizelge 5.5’de gösterilmektedir.

Çizelge 5.5 150 uçuşlu THY uçuş çizelgesi için Sütun Üretme yaklaşımı sonuçları

Sütun Üret. Y.		Karma Sütun Üret. Y.		sapma (%)
en iyi ç.	süre (sn)	en iyi ç.	süre (sn)	
11587	11372.828	11210	3809.312	3,3631

Başlangıç sütunlarının rassal olarak üretildiği 1. yaklaşımda 87 adet başlangıç sütunu bulunmakta iken, karma yaklaşımın başlangıç sütunu sayısı 64'tür. Sütun üretme yaklaşımı ile elde edilen çözümün maliyetinin, karma sütun üretme yaklaşımı ile elde edilen çözümün maliyetinden sapma yüzdesi 3,36'dır. Buradan anlaşılacağı üzere karma sütun üretme yaklaşımı ile daha düşük maliyete sahip bir ekip çizelgesi elde edilmektedir. Karma sütun üretme yaklaşımı, sütun üretme yaklaşımına göre %66,5 daha kısa sürede çözüme ulaşmaktadır. Karma yaklaşım ile elde edilen çözüm Ek 12'de gösterilmektedir. Çizelgenin toplam maliyeti 11210 iken, 62 adet ekip eşlemesinden meydana gelmektedir.

Sütun üretme ve karma sütun üretme yaklaşımlarının sonuçlarına ilişkin yakınsama grafiği Şekil 5.2'de verilmektedir.



Şekil 5.2 Sütun Üretme Yaklaşımları Yakınsama Grafiği (150 uçuş)

Şekil 5.2'de görüldüğü üzere, sütun üretme yaklaşımı, 11587 maliyet değerine 84. iterasyonda (tekrarda) ulaşmakta iken karma sütun üretme yaklaşımı, 11210 maliyet değerine 68. iterasyonda (tekrarda) ulaşmaktadır. Şekilde görüldüğü üzere tekrar sayısı arttıkça, her iki yaklaşımla da elde edilen çizelgenin maliyeti azalan bir eğilim göstermektedir.

172 uçuşlu THY uçuş çizelgesi için, rassal üretimli eniyileme algoritması, GA tabanlı algoritma ve sütun üretme yaklaşımlarına ait sonuçlar Çizelge 5.6'da gösterilmektedir.

Çizelge 5.6 172 uçuşlu THY verisi için geliştirilen 3 yaklaşımın karşılaştırılması

	çözüm	süre (sn)	% sapma			
			Rassal Üretimli Eniyileme	GA Tabanlı A.	Karma Sütun Üretme Y.	Sütun Üretme Y.
Rassal Üretimli Eniyileme	16494	2208	-		3,619	-0,163
GA Tabanlı A.	16119	1307	-2,274	-	1,263	-2,433
Karma Sütun Üretme Y.	15918	5224,703			-	
Sütun Üretme Y.	16521	10322,359			3,788	-

Çizelge 5.6'da görüldüğü üzere, geliştirilen yaklaşımlar arasından, 172 uçuşlu THY verisi için elde edilen en düşük maliyete (15918) sahip çizelgeye, karma sütun üretme yaklaşımı ile ulaşılmıştır. GA tabanlı algoritma ile elde edilen en iyi çizelgenin maliyeti; karma sütun üretme yaklaşımı ile elde edilen çizelgenin maliyetinden %1,263 oranında bir sapma gösterirken, rassal üretimli eniyileme algoritması ile elde edilen çizelgenin maliyetinden %-2,274, sütun üretme yaklaşımı ile elde edilen maliyetten ise %-2,433 oranında daha iyi bir çözüme ulaşılmıştır. GA tabanlı algoritma ile 1307 saniyede çözüme ulaşılmaktadır. Bu süre karma sütun üretme yaklaşımının çözüm süresine göre, %74,98 oranında daha kısadır. Karma sütun üretme yaklaşımı ile elde edilen çözüm, GA tabanlı algoritma ile elde edilen çözümden ihmal edilebilir oranda (%1,263) iyi olduğu ve GA tabanlı algoritma çözüme %74,98 oranında daha kısa sürede ulaştığı için, çözüm yöntemi olarak GA tabanlı algoritma önerilebilir.

150 uçuşlu THY uçuş çizelgesi için, rassal üretimli eniyileme algoritması, GA tabanlı algoritma ve sütun üretme yaklaşımlarına ait sonuçlar Çizelge 5.7'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.7 150 uçuşlu THY verisi için geliştirilen 3 yaklaşımın karşılaştırılması

	çözüm	süre (sn)	% sapma			
			Rassal Üretimli Eniyileme	GA Tabanlı A.	Karma Sütun Üretme Y.	Sütun Üretme Y.
Rassal Üretimli Eniyileme	13746	2012	-		22,623	18,633
GA Tabanlı A.	13234	725	-3,725	-	18,055	14,214
Karma Sütun Üretme Y.	11210	3809,312			-	
Sütun Üretme Y.	11587	11372,828			3,363	-

Çizelge 5.7'de görüldüğü üzere, geliştirilen algoritmalar arasından, 150 uçşulu THY verisi için elde edilen edilen en düşük maliyete (11210) sahip çizelgeye, yine karma sütun üretme yaklaşımı ile ulaşılmıştır. GA tabanlı algoritma ile elde edilen en iyi çizelgenin maliyeti, karma sütun üretme yaklaşımı ile elde edilen çizelgenin maliyetinden %18,055 oranında bir sapma gösterirken, sütun üretme yaklaşımı ile elde edilen maliyetten %14,214 oranında bir sapma göstermektedir. Ancak, çözüm zamanları karşılaştırıldığında GA tabanlı algoritma 725 saniyede çözüme ulaşırken, karma sütun üretme yaklaşımı için bu süre 3809.312 saniye, sütun üretme yaklaşımı için ise 11372.828 saniye olmaktadır. Bu durumda GA tabanlı algoritma, karma sütun üretme yaklaşımının çalışma süresinin % 80,96'sı kadar daha kısa sürede sonuç verirken, sütun üretme yaklaşımının % 93,62'si kadar daha kısa sürede sonuca ulaştığı için, çözüm yöntemi olarak GA tabanlı algoritma önerilebilir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde, ekip eşleme problemi ele alınmıştır. Ekip eşleme problemi, ekip planlama sürecinin ekip eşleme probleminden önceki aşamalarında oluşturulan uçuş çizelgesini girdi olarak alır. Problemde ilk amaç, yasal kısıtlara ve havayolu şirketi tarafından belirlenen özel kısıtlara uyan ekip eşlemelerini oluşturmaktır. İkinci amaç ise, oluşturulan ekip eşlemeleri arasından en düşük maliyete sahip ve uçuş çizelgesindeki tüm uçuşları kapsayan ekip eşlemelerini seçmektir. Seçilen ekip eşlemelerinin sayısı, aynı zamanda çizelgedeki tüm uçuşları gerçekleştirmek için gerekli olan ekip personeli sayısını ifade etmektedir.

Tezde, ekip eşleme problemini çözmek için 3 farklı yaklaşım geliştirilmiştir. Birinci yaklaşım olan rassal üretimli eniyileme algoritması ile ekip eşlemeleri oluşturulurken, uçuş görev süresi, uçuş süresi, anaüs, kalkış-varış yeri ve saati gibi bilgiler hafızada tutulmakta ve bu bilgiler doğrultusunda kısıtları sağlayan aday uçuşlar belirlenmektedir. Ekip eşlemesine eklenecek olan uçuş ise aday uçuşların arasından rassal olarak seçilmektedir.

İkinci yaklaşım olarak geliştirilen GA tabanlı algoritma, üretilen ekip eşlemelerinin uçuş çizelgesindeki tüm uçuşları kapsamalarını sağlamak amacı ile, mevcut yığındaki tüm bireylerin yanısıra genetik operatörler ile üretilen yeni bireyleri de, bir sonraki yığına aynen taşımaktadır. Yani, yığın genişliği her tekrarda artmaktadır. Bunun nedeni, geliştirilen GA tabanlı algoritma sonucu elde edilen yığının, yani ekip eşlemelerinin, bir sonraki aşamanın girdisi olarak kullanılmasıdır.

GA' nın kısıtlı en iyileme problemlerine uygulanmasındaki en önemli zorluk, klasik genetik operatörler ile uygun olmayan (kısıtları sağlamayan) çözümlerin elde edilmesidir. Bu tür problemlerde, uygun çözümlerin bulunduğu başlangıç yığını elde edilse bile, çaprazlama ve mutasyon operatörleri sonucu uygun yeni çözümlerin elde edilmesi çok kolay değildir. Bu nedenle, yapılan çalışmalarda genellikle, çaprazlama operatörünün kullanımı ile elde edilen çözümlerin uygun hale getirilebilmesi için tamir fonksiyonları geliştirilmektedir. Tezde, uygun olmayan çözümlerin ortaya çıkmasını engellemek amacıyla, ekip eşleme problemine özgü çaprazlama operatörü geliştirilmiştir. Bu operatör ile çaprazlama işlemi sırasında,

tüm kısıtları sağlayan yasal ekip eşlemelerinin üretilmesi sağlanmakta ve elde edilen çözümlerin ayrıca tamir edilmesine gerek kalmamaktadır.

Her iki yaklaşımda da ekip eşlemeleri üretildikten sonra, uygun ekip eşlemelerinin arasından, uçuş çizelgesindeki tüm uçuşları kapsayan en düşük maliyete sahip ekip eşlemeleri seçilir. Tezde, bu süreç Küme Kapsama problemi olarak modellenmiştir. En iyi ekip eşlemesi kümesinin seçilmesi probleminin Küme Kapsama modeli ile çözülmesi, bir uçuşun birden fazla ekip personeli tarafından kapsanmasına izin verildiğini, yani pas uçuşlar olduğunu göstermektedir. Pas uçuş, uçakta, görevde olan ekip personeli dışında, ana üsse dönmek ya da ekip eşlemesine devam etmek amacıyla bir başka üsse yolcu olarak taşınan ekip personeli bulunduğunu göstermektedir.

Üçüncü olarak geliştirilen yöntem ise Karma Sütun Üretme yaklaşımıdır. Bu yaklaşım, literatürde ekip eşleme probleminin çözümünde yaygın olarak kullanılan sütun üretme yaklaşımından üretilmiştir. Karma sütun üretme yaklaşımının başlangıç çözümü olarak GA tabanlı algoritma ile elde edilen çözüm kullanılmıştır. Böylece, sütun üretme yaklaşımının, GA tabanlı algoritma ile elde edilen çözümden daha kötü çözüm bulması engellenmiş olur. Sütun üretme yaklaşımı ana ve alt olmak üzere iki ayrı alt problemden oluşmaktadır. Tezde, ana problem olarak küme kapsama modeli kullanılmıştır. Ana problemde, ikil değişkenlerin elde edilebilmesi için küme kapsama modeli doğrusal olarak gevşetilerek çözülmüştür. Alt problem ise en kısa yol problemidir. Alt problemin çözümünde, her ana üs için ayrı şebekeler oluşturulmuştur. Durdurma koşulu sağlandıktan sonra ana problem doğrusal gevşetme olmaksızın, tamsayılı olma koşulu ile tekrar çözümlenerek çözüme ulaşılmaktadır.

Çalışmanın etkililiğini gözlemlemek ve sonuçları karşılaştırmak amacıyla, geliştirilen tüm yaklaşımlar Türk Hava Yolları'ndan elde edilen 2 ayrı veri seti üzerinde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, karma sütun üretme algoritması ile daha düşük maliyetli çizelgeler oluşturulduğunu göstermektedir. Ancak, karma sütun üretme yaklaşımı ile elde edilen çizelgenin maliyeti ile GA tabanlı algoritma ile elde edilen çizelgelerin maliyeti arasında çok büyük farklar yoktur. Ayrıca, karma sütun üretme yaklaşımı, GA tabanlı algoritmaya göre çözüme çok daha uzun

sürede ulaşmaktadır. Dolayısıyla, ekip eşlemelerinin (çizelgenin) oluşturulması için, GA tabanlı algoritmanın kullanılması önerilmiştir.

Tezde, ekip eşlemeleri tek günlük planlanarak, sonuçlar elde edilmiştir. İleriki çalışmalarda, ekip eşlemeleri 2 günlük planlanarak problem çözülebilir. Ayrıca, ekip eşleme probleminin çözümüne yönelik olarak, sütun üretme yaklaşımı ve modern sezgisel yöntemler birlikte kullanılarak karma bir algoritma geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] GOPALAKRISHNAN, B., ELLIS, L. J., Airline Crew Scheduling: State-of-the-Art, *Annals of Operation Research*, vol. 140, s. 305-337, 2005.
- [2] *Platin Dergisi*, <http://www.kobifinans.com.tr/tr/sector/011406/18079/9>.
- [3] Türk Hava Yolları Faaliyet Raporu, http://www.thy.com/tr-TR/corporate/about_us/annual_reports.aspx, 2007.
- [4] YU, G., *Operations Research in Airline Industry*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1998 .
- [5] RUSSELL, A. R., HOFFMAN, K. L., PADBERG, M., *Recent Advances in Exact Optimization of Airline Scheduling Problems*, Technical Report, George Mason University, 1995.
- [6] MERCIER, A., FRANÇOIS, S., *An Integrated Aircraft Routing, Crew Scheduling and Flight Retiming Model*, *Computers & Operations Research*, vol. 34, s. 2251 – 2265, 2007.
- [7] ANBIL, R., GELMAN, E., PATTY, B., and TANGA, R., *Recent Advances in Crew-Pairing Optimization at American Airlines*, vol. 21, s. 62–74, 1991
- [8] BARUTT, J. and HULL, T., *Airline Crew Scheduling: Supercomputers and Algorithms*, *SIAM News*, vol. 23, no. 6, s. 20–22, 1990.
- [9] GRAVES, G.W., MCBRIDE, R.D., and GERSHKOFF, I., *Flight Crew Scheduling*, *Management Science*, vol. 39, no. 6, s. 736–745, 1993.
- [10] KENGER, E., *Airline Crew Rescheduling Problem: A Heuristic Approach*, M.Sc. thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 1999.
- [11] MEDARD, C. P., SAWHNEY, N., *Airline crew scheduling from planning to operations*, *European Journal of Operational Research*, 2006.
- [12] DESAULNIERS, G., DESROSIERS, J., DUMAS, Y., MARC, S., RIOUX, B., SOLOMON, M.M., and SOUMIS, F., *Crew Pairing at Air France*, vol. 97, s. 245–259, 1997.
- [13] PAVLOPOULOU, C., GIONIS, A., STAMATOPOULOS, P., HALATSIS, C., *Crew Pairing Optimization Based on CLP*, *Proceedings of the 2nd International Conference on the Practical Applications of Constraint Technology PACT '96*, London, s. 191-210, 1996.
- [14] KORNILAKIS, H., STAMATOPOULOS, P., *Crew Pairing Optimization with Genetic Algorithms*, *Hellenic Conference on Artificial Intelligence*, s. 109-120, 2002.

- [15] BARNHART, C., BELOBABA, P. and ODONI, A.R., Applications of Operations Research in the Air Transport Industry, *Transportation Science*, vol. 37, no. 4:, s. 368-391, 2003.
- [16] SHT6A-50, Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü, Uçucu Ekip Uçuş Görev ve Dinlenme Süreleri ile Uygulama Esasları Talimatı, 2003.
- [17] KLABJAN, D., JOHNSON, E., NEMHAUSER, G.L., GELMAN, E., and RAMASWAMY, S., Solving Large Airline Crew Scheduling Problems: Random Pairing Generation and Strong Branching, *Computational Optimization and Applications* 20, s. 73–91, 2001.
- [18] SCHAEFER, A., JOHNSON, E., KLEYWEGT, A., NEMHAUSER, G. L., Airline Crew Scheduling under Uncertainty, *Transportation Science*, vol. 39, no. 3, s. 340-348, 2005.
- [19] GUSTAFSSON, T., A heuristic approach to column generation for airline crew scheduling, Licentiate thesis, Dept. of Mathematics, Chalmers Univ. of Tech., 1999.
- [20] YAN, S., CHANG, J.C., Discrete Optimization: Airline Cockpit Crew Scheduling, *European Journal of Operations Research*, vol. 136, s. 501-511, 2002.
- [21] SANDHU, R. and KLABJAN, D., Integrated Airline Fleeting and Crew Pairing Decisions, *Operations Research*, vol. 55, s. 430-438, 2007.
- [22] ANBIL, R., FORREST, J., and PULLEYBLANK, W., Column Generation and the Airline Crew Pairing Problem, *Documenta Mathematica—Journal der Deutschen Mathematiker Vereinigung*, number III in extra volume: proceedings of the ICM, 1998.
- [23] RYAN, D.M. and FALKNER, J.C., On the Integer Properties of Scheduling Set Partitioning Problems, *European Journal of Operations Research*, vol. 35, s. 442–456, 1988.
- [24] ARABEYRE, J. P., FEANLEY, J., STIEGER, F.C., and TEATHER, W., The Airline Crew Scheduling Problem: A Survey, *Transportation Science*, vol. 3, s. 140–163, 1969.
- [25] ETSCHMAIER, M.M. and MATHAISEL, D.F.X., Airline Scheduling: An Overview, *Transportation Science*, vol. 19, s. 127–138, 1985.
- [26] GERSHKOFF, I., Optimizing Flight Crew Schedules, *Interfaces* 19, s. 29–43, 1989.
- [27] ANBIL, R., JOHNSON, E.L., and TANGA, R., A Global Approach to Crew Pairing Optimization, *IBM Systems Journal*, vol. 31, s. 71–78, 1991.

- [28] HOUSOS, E. and ELMROTH, T., Automatic Optimization of Subproblems in Scheduling Airline Crews, *Interfaces* 27, s. 68–77, 1997.
- [29] BAKER, E.K., BODIN, L.D. and FISHER, M., The Development of a Heuristic Set Covering Based System for Aircrew Scheduling, *Transportation Policy Decision Making*, vol. 3, s. 95–110, 1985.
- [30] BALL, M. and ROBERTS, A., A Graph Partitioning Approach to Airline Crew Scheduling, *Transportation Science*, vol. 19, no. 2, s. 107–126, 1985.
- [31] RUBIN, J., A Technique for the Solution of Massive Set Covering Problems with Applications to Airline Crew Scheduling, *Transportation Science*, vol. 7, s. 34–38, 1973.
- [32] GERBRACHT, R., A New Algorithm for Very Large Crew Pairing Problems, 18th AGIFORS Symposium, Vancouver, British Columbia, CA, 1978.
- [33] DESAULNIERS, G. , DESROSIERS, J., IOACHİM, I., SOLOMON, M.M., SOUMIS, F., VILLENEUVE, D., A unified framework for deterministic time constrained vehicle routing and crew scheduling problems, *Fleet Management and Logistics*, s. 57–93. Kluwer, Norwell, MA, 1998.
- [34] STOJKOVIĆ, M., SOUMIS, F., DESROSIERS, J., The operational airline crew scheduling problem, *Transportation Science*, vol. 32, no. 3, s. 232-245, 1998.
- [35] VANCE, P.H, ATAMTÜRK, A., BARNHART, C., GELMAN, E., JOHNSON, E.L., KRISHNA, A., MAHIDHARA, D., NEMHAUSER, G.L., REBELLO, R., A heuristic branch-and-price approach for the airline crew pairing problem, Technical report, NSF Grant DMI-9410102 and United Airlines, 1997.
- [36] LAVOIE, S., MINOUX, M., and ODIER, E., A New Approach to Crew Pairing Problems by Column Generation and Application to Air Transport, *European Journal of Operations Research*, vol. 35, s. 45–58, 1988.
- [37] DANTZIG, G.B. and WOLFE, P., Decomposition Principle for Linear Programs, *Operations Research*, vol. 8, s. 101-111, 1960.
- [38] BARNHART, C., JOHNSON, E.L., ANBIL, R., and HATAY, L., A Column Generation Technique for the Long-Haul Crew Assignment Problem, In T.A. Cirani and R.C. Leachman (eds.), *Optimization in Industry II*, Wiley, 1994.
- [39] CHU, H., GELMAN, E., and JOHNSON, E.L., Solving Large Scale Crew Scheduling Problem, *European Journal of Operations Research*, vol. 97, s. 245–259, 1997.
- [40] DESROSIERS, J., DUMAS, Y., DESROCHERS, M., SOUMIS, F., SASNO, B., and TRUDEAU, P., A Breakthrough in Airline Crew Scheduling, Technical Report, - s. 91-111, Les Cahiers du GERAD, 1991.

- [41] VANCE, P.H., BARNHART, C., JOHNSON, E.L., and NEMHAUSER, G.L., Airline Crew Scheduling: A New Formulation and Decomposition Algorithm, *Operations Research*, vol. 45, no. 2, s. 188–200, 1995.
- [42] RUBIN, J., Airline Crew Scheduling—The Non-Mathematical Problem, IBM Technical Report, No. 320.3006, 1971.
- [43] FORREST, J.J., Mathematical Programming with a Library of Optimization Subroutines, ORSA/TIMS Joint National Meeting, New York, 1989.
- [44] BARAHONA, F. and ANBIL, R., The Volume Algorithm: Producing Primal Solutions with a Subgradient Method, Research Report RC 21103 (94395), IBM T.J. Watson Research Center, Yorktown Heights, NY, 1997.
- [45] HELD, M. and KARP, R.M., The Travelling Salesman Problem and Minimum Spanning Tress: Part II, *Mathematical Programming* 1, s. 6–25, 1971.
- [46] HELD, M., WOLFE, P., and CROWDER, H.P., 1974, Validation of Subgradient Optimization, *Mathematical Programming* 6, s. 62–88, 1974.
- [47] LARSON, T. and LIU, Z., A Primal Convergence Result for Dual Subgradient Optimization with Application to Multicommodity Network Flows, Research Report No. 581 83, Dept. of Math., Linkoping Institute of Technology, 1989.
- [48] HOFFMAN, K.L. and PADBERG, M., Solving Airline Crew-Scheduling Problems by Branch-and-Cut, *Management Science*, vol. 39, s. 657–682, 1993.
- [49] BARNHART, C., JOHNSON, E.L., NEMHAUSER, G. L., SAVELSBERGH, M.W.P., and VANCE, P.H., Branch-and-Price: Column Generation for Solving Huge Integer Programs, *Operations Research*, vol. 43, s. 491–499, 1998.
- [50] DESROCHERS, J., DUMAS, Y., SOLOMON, M.M., and SOUMIS, F., Time Constrained Routing and Scheduling, *Handbook in Operations Research and Management Science, Network Routing*, Elsevier, Amsterdam, s. 35–140, 1995.
- [51] RALPHS, T.K., LADANYI, L., and TROTTER, L.E., Branch, Cut, and Price: Sequential and Parallel, *Computational Combinatorial Optimization*, 2001.
- [52] PANAYIOTIS, A., SANDERS, P., TAKKULA, T., and WEDELIN, D., Parallel Integer Optimization for Crew Scheduling, *Annals of Operations Research*, vol. 99, s. 141–166, 2000.
- [53] FISHER, M.L., The Lagrangian Relaxation Method for Solving Integer Programming Problems, *Management Science*, vol. 27, no. 1, s.1–18, 1981.
- [54] WEDELIN, D., An Algorithm for Large-Scale 0-1 Integer Programming with Applications to Airline Crew Scheduling, *Annals of Operations Research*, vol. 57, s. 283–301, 1995.

- [55] The Carmen Systems, version 5.1, Carmen Systems AB, Göteborg, Sweden.
- [56] EHRGOTT, M. and RYAN, D.M., Constructing Robust Crew Schedules with Bicriteria Optimization, *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, vol. 11, s. 139–150, 2003.
- [57] KLABJAN, D., JOHNSON E., and NEMHAUSER, G.L., GELMAN, E., and RAMASWAMY, S., Airline Crew Scheduling with Time Windows and Plane Count Constraints, *Transportation Science*, vol. 36, s. 337–348, 2002.
- [58] BARNHART, C., LU, F., and SHENOI, R., Integrated airline schedule planning, *Operations Research in the Airline Industry*, vol. 9, s. 384-403, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [59] BARNHART, C., BOLAND, N., CLARKE, L., JOHNSON, E., NEMHAUSER, G., and SHENOI, R., Flight string models for aircraft, fleet and routing. *Transportation Science*, vol. 32, s. 208-220, 1998.
- [60] CORDEAU, J., DESROSIERS, J., SOUMIS, F, and STOJKOVIĆ, G., Benders decomposition for simultaneous aircraft routing and crew scheduling, *Transportation Science*, vol. 35, s. 375-388, 2000.
- [61] MERCIER, A., CORDEAU, J.F., and SOUMIS, F.. A Computational Study of Benders Decomposition for the Integrated Aircraft Routing and Crew Scheduling Problem, *Computers & Operations Research*, 2003.
- [62] BARNHART, C., COHN, A.M., JOHNSON, E.L., KLABJAN, D., NEMHAUSER, G.L., and VANCE, P.H., Airline Crew Scheduling, *Handbook of Transportation Science*, 2nd Edition, Randolph W. Hall (editor), Kluwer Academic Publishers, Norwell, s. 517-560, 2003.
- [63] HOLLAND, J., *Adaption in Natural and Artificial Systems*, Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975.
- [64] GOLDBERG, D, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1989.
- [65] CHU, P. C and BEASLEY, J. E., A genetic algorithm for the set partitioning problem, Technical report, Imperial College, The Management School, London, England, 1995.
- [66] LEVINE, D., Application of a hybrid genetic algorithm to airline crew scheduling , *Computers & Operations Research*, vol. 23, no. 6, s. 547-558, 1996.
- [67] OZDEMIR, H. T., MOHAN, C., Flight Graph Based Genetic Algorithm for Crew Scheduling in Airlines, *Information Sciences*, vol. 133, s.165–173, 2001.
- [68] DENGİZ, B. ve ALTIPARMAK, F., Genetik Algoritmalar, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol.11, no. 3, s. 523-541, 1998.

- [69] MICHALEWICZ, Z., Genetic Algorithms and Data Structures, Evolution Programs, Springer-Verlag, 3rd edition, Berlin, Heidelberg, 1992.
- [70] ALTIPARMAK, F., Genetik Algoritma ile Haberleşme Şebekelerini Topolojik Tasarımı, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 1996.
- [71] GREFENSTETTE, J.J., Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithms, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 161, no. 1, s. 122-128, 1986.
- [72] KAPASALIS, A., RAYWARD-SMITH, V., and SMITH, G., Fast sequential and parallel implementation of genetic algorithms using the GAMETER toolkit. Int. Conf. on Neural Networks and Genetic Algorithms, Innsbruck, Springer-Verlag, 1993.
- [73] CHEN, C.L., VEMPATIZ, V.S., ALJABER, N., An application of gas for flow shop problems, European Journal of Operational Research, vol. 80, s. 389-396, 1995
- [74] AUSTIN, S., An introduction to genetic algorithms, All Experts, s. 49-53, 1991
- [75] BOOKER, L., Improving Search in Genetic Algorithms, Genetic Algorithms and Simulated Annealing, Morgan Kaufman Publishers, Inc., Los Altos, CA, 1987.
- [76] DE JONG, K., An analysis of the behaviour of a class of genetic adaptive systems, PhD thesis, University of Michigan, MI. University Microfilms No. 756-9381, 1975.
- [77] BRINDLE, A., Genetic Algorithms for Function Optimization, PhD. thesis, University of Alberta, Edmonton, Australia., 1981.
- [78] GOLDBERG, D.E., DEB, K., A Comparative Analyses of Selection Schemes Used in Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann Publishers, Las Altos, CA, s. 69-93, 1991
- [79] BAKER, J., Adaptive selection methods for genetic algorithms, In the Proceedings of the First International Conference ob Genetic Algorithms and Their Applications, s. 101-111, Lawrence Erlbaum Associates, 1985.
- [80] MICHALEWICZ, Z., JANIKOW, C.Z., Handling Constraints in Genetic Algorithms, Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann Publishers, SanMateo, CA, 151.
- [81] SYSWERDA, G., Uniform crossover in genetic algorithms, Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, 1989.

- [82] FANG, H.L., ROSS, P., CORNE, D., A Promising Genetic Algorithm Approach to Job-Shop Scheduling, Re-scheduling and Open-Shop Scheduling Problems, Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann Publishers, Los-Altos, CA, s. 375-382, 1993.
- [83] GOLDBERG, D. E. and LINGLE, R., Alleles loci and the traveling salesman problem, In Proceedings of an International Conference on Genetic Algorithms, s. 10-19. Morgan Kauffman, 1985.
- [84] DAVIS, L., Job Shop Scheduling with Genetic Algorithm, Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms and their applications, Lawrence, Erlbaum, Hillsdale, s. 136-140, 1985.
- [85] OLIVER, I.M., SMITH, D.J., HOLLAND, J.R.C., A Study of Permutation Crossover Operators on the Traveling Salesman Problem, Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ, s. 224-230, 1987.
- [86] P. C. Gilmore and R. E. Gomory, A linear programming approach to the cutting stock problem, Part I, Operations Research 9 (1961), 849–859.
- [87] TEKİNER, H., Robust Crew Pairing for Managing Extra Flight, M.Sc. thesis, Sabancı University Graduate School of Engineering and Natural Sciences, İstanbul, 60p, 2006.
- [88] BIXBY, R., GREGORY, J.W., LUSTIG, I.J., MARSTEN, R. and SHANNO, D., Very large scale linear programming: A case study in combining interior point and simplex methods, Operations Research, vol. 40, s. 885-897, 1992.
- [89] HU, J. and JOHNSON, E., Computational results with a primal-dual subproblem simplex method, Operations Research Letters, vol. 25, s.149–158, 1999.
- [90] DESROCHERS, M. and SOUMIS, F., A column generation approach to the urban transit crew scheduling problem, Transportation Science, vol. 23, no.1, 1989.
- [91] AHMADBEYĞİ ,S. and COHN A., University of Michigan, Conference, 2006.
- [92] RYAN, D., The solution of massive generalized set partitioning problems in air crew rostering, Journal of the Operational Research Society, vol. 43, s. 459–467, 1992.
- [93] GAMACHE, M., SOUMIS, F., VILLENEUVE, D., DESROSIERS, J., and GELINAS, E., The preferential bidding system at Air Canada, Transportation Science, vol. 32, s. 246–255, 1998.
- [94] GAMACHE, M. and SOUMIS, F., A method for optimally solving the rostering problem, Operations Research in the Airline Industry, p. 124–157, Kluwer Academic Publishers, 1998.

[95] MARSTEN, R., Crew planning at Delta Airlines, XV Mathematical Programming Symposium, Presentation, 1994.

[96] ANDERSSON, E., HOUSOS, E., KOHL, N., and WEDELIN, D., Crew pairing optimization, Operations Research in the Airline Industry, s. 228–258, Kluwer Academic Publishers, 1998.

[97] ZEYBEKCAN, N., Airline Crew Scheduling, M.Sc. thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences of Dokuz Eylül University, 179p, İzmir, 2005.

EKLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Ek 1 SHT 6a-50 Uçuş Görev Süreleri ve Dinlenme Süreleri Sınırlama Tabloları.....	92
Ek 2 172 Uçuşlu THY Uçuş Çizelgesi.....	95
Ek 3 150 Uçuşlu THY Uçuş Çizelgesi.....	99
Ek 4 Rassal Üretimli Eniyileme Algoritması Akış Şeması.....	102
Ek 5 Çaprazlama Algoritması Akış Şeması.....	103
Ek 6 GA Tabanlı Algoritma Akış Şeması.....	104
Ek 7 Sütun Üretme Yaklaşımı Akış Şeması.....	105
Ek 8 172 Uçuşlu THY Verisi İçin GA Tabanlı Algoritma İle Elde Edilen Çözüm.....	106
Ek 9 150 Uçuşlu THY Verisi İçin GA Tabanlı Algoritma İle Elde Edilen Çözüm.....	109
Ek10 150 Uçuşlu THY Uçuş Çizelgesi İçin GA Tabanlı Algoritma İle Elde Edilen İyileştirilmiş Bir Çözüm.....	112
Ek11 172 Uçuşlu THY Verisi İçin Karma Sütun Üretme Yaklaşımı İle Elde Edilen Çözüm.....	115
Ek12 150 Uçuşlu THY Verisi İçin Karma Sütun Üretme Yaklaşımı İle Elde Edilen Çözüm.....	118

EK 1 SHT 6A-50 Uçuş Görev Süreleri ve Dinlenme Süreleri Sınırlama Tabloları

Kısaltmalar:

- DS : Dinlenme Süresi
SKPK : Sorumlu Kaptan Pilot Kararı
UGS : Uçuş Görev Süresi
US : Uçuş Süresi (Blok süresi)

Tablolarda kullanılan haftalık, aylık, üç aylık ve yıllık tabirlerinin anlamı bu talimatın zaman tanımlarında olduğu gibidir.

Azami Süreler: Aşağıdaki tablo azami uçuş ve uçuş görev sürelerini göstermektedir

Çizelge 1 AZAMI SÜRELER

SÜRE	HAFTALIK	AYLIK	ÜÇ AYLIK	YILLIK
UGS	56 Saat	210 Saat	500 Saat	1800 Saat
US	36 Saat	110 Saat	300 Saat	1000 Saat

Uçuş Görev Süresi Sınırlamaları: Aşağıdaki tablolar periyotlara göre azami uçuş görev süresinin üst sınırlarını göstermektedir. Aşağıdaki saatler kalkış meydanının mahalli kış saatidir. Yaz saati uygulaması ile beraber mahalli kış saati = mahalli yaz saati - 1 saat formülü kullanılarak gerekli ayarlamalar yapılabilir.

Çizelge 2 AZAMI UÇUŞ GÖREV SÜRELERİ

GÖREV BAŞLANGIÇ SAATİ	1-4 İNİŞ	5 İNİŞ
05.00 – 14.00	14 SAAT	13 SAAT
14.01 – 17.00	13 SAAT	12 SAAT
17.01 – 04.59	12 SAAT	11 SAAT

Not 1. Tablodaki süreler ilave ekip ile 2 saat uzatılabilir.

Not 2. Tablodaki süreler 23. maddedeki özel şartların oluşması halinde sorumlu kaptan pilot kararı ile 2 saat uzatılabilir.

Çizelge 3 UZUN MENZİL UÇUŞLARI AZAMI UÇUŞ GÖREV SÜRELERİ

	UGS	UGS (SKPK ile)
Normal Uçuş Ekibi	14 Saat	16 Saat,
İlave Ekip ile	16 Saat	18 Saat
İlave Tam Ekip ile	18 Saat	20 Saat

Not-1. Tablo-3' e göre verilen uçuş görev süreleri 1-3 iniş arasındaki uçuş görevleri içindir.

Not-2. İlave ekip veya ilave tam ekip ile yapılan uçuşlarda her bir uçucu ekip üyesinin görev yapma süresi 12 saati aşamaz.

Not-3. Uzun menzil uçuşundan ana veya geçici üsse dönen uçucu ekipler, 48 saatten az olmamak üzere uçuş görev süresinin 3 katı kadar dinlenme süresine tabi tutulurlar.

Dinlenme Süresi: Aşağıdaki tablo asgari dinlenme sürelerini ve SKPK ile kısaltmalarını göstermektedir.

Çizelge 4 ASGARI DİNLENME SÜRELERİ

BİR ÖNCEKİ UGS	ASGARI DS	SKPK İLE ASGARI DS
6 Saate kadar	8 saat	8 saat
11 Saate kadar(Dahil)	10 Saat	10 Saat
11 Saatten daha fazla	12 Saat	10 Saat
12-14 Saat veya ZD farkı 3 saatten fazla	14 Saat	12 Saat
Uzun Menzil Uçuşları	2 Yerel Gece / 36 saat	2 Yerel Gece / 36 saat - 2

Not-1. SKPK ile uçuş görev süresinin arttırılma durumlarında, arttırılan uçuş görev süresi kadar dinlenme süresi de arttırılır.

Not-2. SKPK ile dinlenme süresinin kısaltılabilmesi için tek geçerli olan husus, 21'nci maddenin 3'ncü paragrafında yazılı olan istisnai durumdur.

Not-3. UGS 18 saat ve üzerine çıktığı durumlarda, asgari dinlenme süresi 24 saattir. 21'nci maddenin 3'ncü paragrafında belirtilen şart oluştuysa sorumlu kaptan pilotun kararı ile bu süre 22 saate indirilebilir.

Not-4. Uzun menzil uçuş görevinde bir görev süresinin ardından aynı tür ikinci bir görev için asgari dinlenme süresi konaklama meydanında 2 yerel geceyi kapsayan 36 saattir. Bu uçuşu takiben ana üs veya geçici üsse yapılacak dönüşün uçuş görev süresi sonundaki dinlenme süresi, en az 48 saattir. Uygulama esasları işletme tarafından belirlenmek üzere bu süre ayda bir defaya mahsus olmak üzere 24 saat olarak uygulanabilir.

Not-5. Dinlenme süreleri hesaplamaları gerçekleşen uçuş görev sürelerine göre yapılır.

Boş süreler: Aşağıdaki tablo, uçucu ekiplerin dinlenme süreleri dışında asgari boş sürelerini göstermektedir. Konaklama meydanlarındaki konaklama süresi boş süre olarak kabul edilmez.

Çizelge 5 ASGARİ BOŞ SÜRELER

	HAFTALIK	AYLIK	ÜÇ AYLIK	YILLIK
SÜRE	1 Gün	7 Gün (2+2+1+1+ 1)	21 gün	96 Gün

Not-1. Dinlenme süresi ile bu tabloda dinlenme süresi dışında gösterilen boş günler, birbirinin üzerine ilave edilmez. Boş günler çalışılan gün ile orantılı olarak verilir.

Not-2. Tablodaki haftalık 1 günlük süre, aylık boş günlere dahil olarak verilebilir ve uçuş görev süresinin bittiği günü takip eden gün süresini kapsar.

EK 2 172 Uçuşlu THY Uçuş Çizelgesi

Uçuş no	KALKIŞ	VARIŞ	K.ZAMANI	V.ZAMANI	SÜRE
1	ada	ist	02:50	04:25	01:35
2	ecn	ist	03:00	04:35	01:35
3	ayt	ist	03:05	04:20	01:15
4	adb	ist	03:10	04:10	01:00
5	ank	ist	03:25	04:25	01:00
6	ank	ist	04:00	05:00	01:00
7	ank	ayt	04:15	05:15	01:00
8	ank	ist	04:15	05:15	01:00
9	ist	ank	04:15	05:15	01:00
10	ist	ecn	04:35	06:15	01:40
11	szf	ist	04:40	06:10	01:30
12	adb	ist	04:55	05:55	01:00
13	asr	ist	04:55	06:25	01:30
14	ada	ist	05:00	06:35	01:35
15	adb	ist	05:00	06:00	01:00
16	ist	ada	05:00	06:30	01:30
17	ist	adb	05:00	06:00	01:00
18	ist	dnz	05:00	06:05	01:05
19	ist	tzx	05:00	06:45	01:45
20	ist	bjv	05:05	06:15	01:10
21	ist	dln	05:05	06:20	01:15
22	ayt	ist	05:15	06:30	01:15
23	ist	dly	05:15	07:05	01:50
24	ist	ank	05:15	06:15	01:00
25	tzx	ank	05:15	06:35	01:20
26	tzx	ist	05:15	07:05	01:50
27	adb	ank	05:30	06:45	01:15
28	ank	ist	05:30	06:30	01:00
29	ada	ank	05:45	06:45	01:00
30	ist	ank	05:45	06:45	01:00
31	ayt	ank	06:00	07:00	01:00
32	ist	adb	06:00	07:00	01:00
33	ist	ank	06:00	07:00	01:00
34	ist	szf	06:00	07:25	01:25
35	ist	kya	06:05	07:15	01:10
36	ist	ada	06:20	07:50	01:30
37	ist	adb	06:40	07:40	01:00
38	dnz	ist	06:55	08:00	01:05
39	adb	ist	07:00	08:00	01:00
40	ecn	ist	07:00	08:35	01:35
41	ank	ist	07:00	08:00	01:00
42	ist	adb	07:00	08:00	01:00
43	ist	ank	07:00	08:00	01:00
44	bjv	ist	07:05	08:15	01:10
45	dln	ist	07:05	08:25	01:20
46	ist	erc	07:10	08:55	01:45
47	ist	hty	07:10	08:55	01:45
48	ist	erz	07:20	09:10	01:50

49	ada	ist	07:25	09:00	01:35
50	ank	diy	07:30	08:50	01:20
51	ank	van	07:45	09:15	01:30
52	diy	ist	07:55	09:55	02:00
53	tzx	ist	07:55	09:45	01:50
54	adb	ist	08:00	09:00	01:00
55	ank	ist	08:00	09:00	01:00
56	ist	ayt	08:00	09:15	01:15
57	kya	ist	08:00	09:15	01:15
58	szf	ist	08:10	09:40	01:30
59	adb	ist	08:30	09:30	01:00
60	ada	ist	08:50	10:25	01:35
61	adb	ist	09:00	10:00	01:00
62	ank	ist	09:00	10:00	01:00
63	ist	adb	09:00	10:00	01:00
64	ist	ank	09:00	10:00	01:00
65	ist	ada	09:15	10:45	01:30
66	ist	ayt	09:30	10:45	01:15
67	diy	ank	09:35	11:05	01:30
68	erc	ist	09:40	11:30	01:50
69	hty	ist	09:40	11:35	01:55
70	ist	ksy	09:50	11:50	02:00
71	erz	ist	09:55	11:55	02:00
72	ayt	ist	10:00	11:15	01:15
73	ist	ank	10:00	11:00	01:00
74	van	ank	10:00	11:50	01:50
75	ist	van	10:20	12:20	02:00
76	ist	erc	10:35	12:20	01:45
77	adb	ist	10:50	11:50	01:00
78	ank	ist	11:00	12:00	01:00
79	ist	adb	11:00	12:00	01:00
80	ist	ank	11:00	12:00	01:00
81	ayt	ist	11:30	12:45	01:15
82	ada	ist	11:45	13:20	01:35
83	ank	erc	12:00	13:15	01:15
84	ank	ist	12:00	13:00	01:00
85	ist	ada	12:15	13:45	01:30
86	ank	erz	12:30	13:55	01:25
87	ksy	ist	12:35	14:45	02:10
88	ist	ayt	12:45	14:00	01:15
89	adb	ist	13:00	14:00	01:00
90	ank	ist	13:00	14:00	01:00
91	ist	adb	13:00	14:00	01:00
92	ist	ank	13:00	14:00	01:00
93	erc	ist	13:05	14:55	01:50
94	van	ist	13:05	15:20	02:15
95	ank	adb	13:45	15:00	01:15
96	ank	ist	14:00	15:00	01:00
97	ist	ada	14:00	15:30	01:30
98	ist	adb	14:00	15:00	01:00
99	ist	ank	14:00	15:00	01:00
100	erc	ank	14:05	15:30	01:25

101	ada	ist	14:45	16:20	01:35
102	ayt	ist	14:45	16:00	01:15
103	erz	ank	14:45	16:15	01:30
104	adb	ist	15:00	16:00	01:00
105	ank	adb	15:00	16:15	01:15
106	ank	ist	15:00	16:00	01:00
107	ist	ada	15:00	16:30	01:30
108	ist	adb	15:00	16:00	01:00
109	ist	tzx	15:20	17:05	01:45
110	ist	ayt	15:30	16:45	01:15
111	ist	ank	15:30	16:30	01:00
112	adb	ank	15:50	17:05	01:15
113	adb	ist	16:00	17:00	01:00
114	ank	ist	16:00	17:00	01:00
115	ist	adb	16:00	17:00	01:00
116	ist	asr	16:20	17:40	01:20
117	ada	ist	16:25	18:00	01:35
118	ist	szf	16:35	18:00	01:25
119	ist	bjv	16:50	18:00	01:10
120	ist	dln	16:50	18:05	01:15
121	adb	ank	17:00	18:15	01:15
122	ank	ist	17:00	18:00	01:00
123	ist	adb	17:00	18:00	01:00
124	ist	ayt	17:00	18:15	01:15
125	ist	gny	17:10	19:00	01:50
126	ada	ist	17:15	18:45	01:30
127	adb	ist	17:20	18:20	01:00
128	ist	ada	17:20	18:50	01:30
129	ank	ada	17:30	18:30	01:00
130	ayt	ist	17:40	18:55	01:15
131	ist	dly	17:45	19:35	01:50
132	ist	erz	17:45	19:35	01:50
133	tzx	ist	17:55	19:45	01:50
134	adb	ist	18:00	19:00	01:00
135	ank	ist	18:00	19:00	01:00
136	ank	tzx	18:00	19:15	01:15
137	ist	adb	18:00	19:00	01:00
138	ist	ank	18:00	19:00	01:00
139	asr	ist	18:25	19:55	01:30
140	ank	ist	18:30	19:30	01:00
141	ist	ayt	18:30	19:45	01:15
142	bjv	ist	18:45	19:55	01:10
143	szf	ist	18:45	20:15	01:30
144	dln	ist	18:50	20:10	01:20
145	adb	ist	19:00	20:00	01:00
146	ank	ayt	19:00	20:00	01:00
147	ank	ist	19:00	20:00	01:00
148	ist	adb	19:00	20:00	01:00
149	ist	ank	19:00	20:00	01:00
150	ayt	ist	19:05	20:20	01:15
151	ist	ecn	19:15	20:45	01:30
152	ist	ada	19:30	21:00	01:30

153	gny	ist	19:45	21:40	01:55
154	ada	ist	19:55	21:30	01:35
155	ist	adb	20:00	21:00	01:00
156	ist	ank	20:00	21:00	01:00
157	diy	ist	20:10	22:10	02:00
158	ist	asr	20:15	21:35	01:20
159	ist	ank	20:15	21:15	01:00
160	ist	szf	20:20	21:45	01:25
161	adb	ist	20:30	21:30	01:00
162	erz	ist	20:30	22:30	02:00
163	ayt	ist	20:35	21:50	01:15
164	ayt	ank	20:45	21:45	01:00
165	ank	adb	20:50	22:05	01:15
166	ist	ecn	21:30	23:00	01:30
167	ist	txz	21:30	23:15	01:45
168	ecn	ist	21:35	23:10	01:35
169	ist	ada	21:35	23:05	01:30
170	ist	adb	21:45	22:45	01:00
171	ist	ank	21:45	22:45	01:00
172	ist	ayt	21:55	23:10	01:15

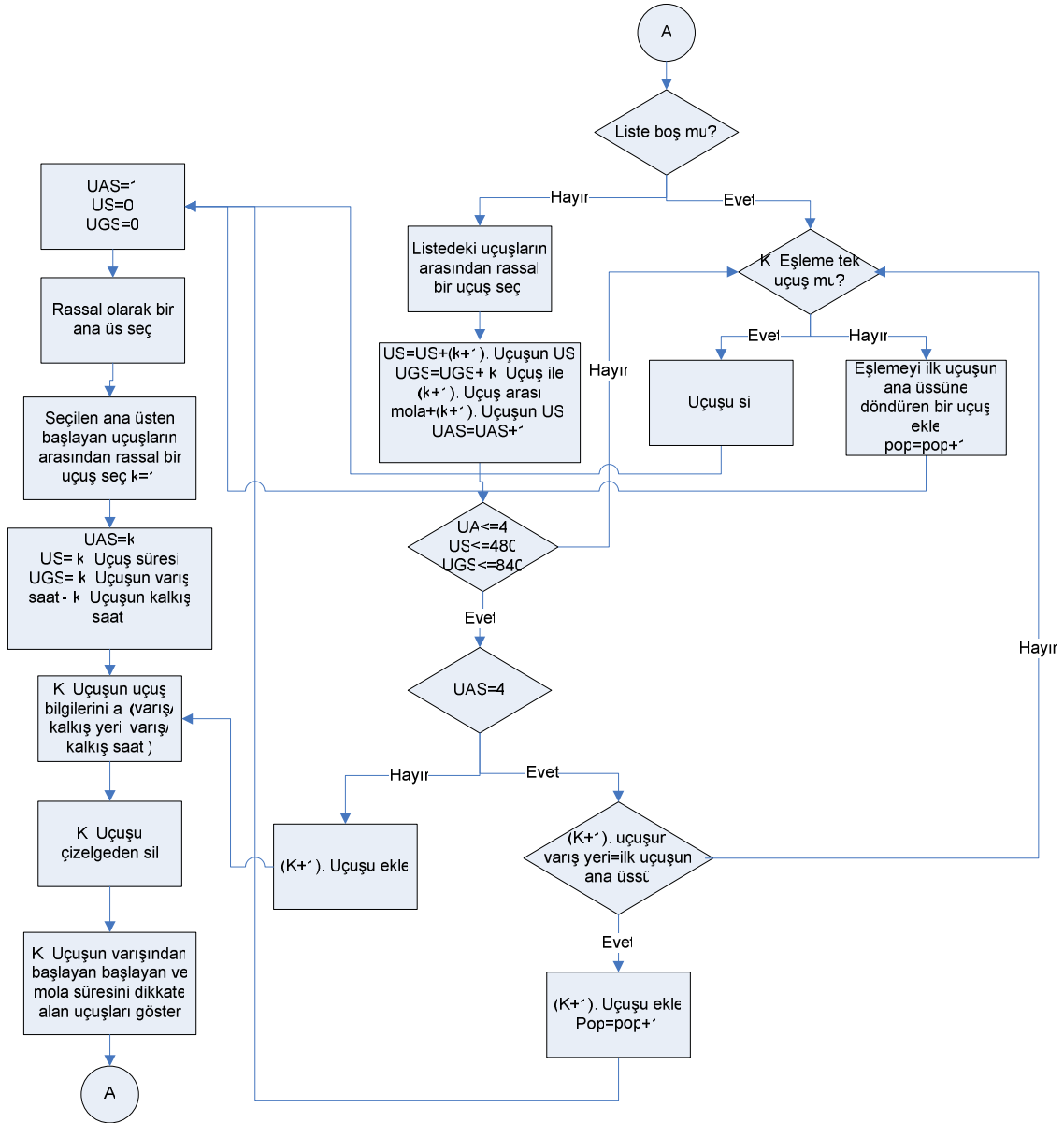
EK 3 150 Uçuşlu THY Uçuş Çizelgesi

Uçuş no	KALKIŞ	VARIŞ	K.ZAMANI	V.ZAMANI	SÜRE
1	ist	ayt	05:05	06:20	01:15
2	ist	tzk	05:05	06:50	01:45
3	ist	adb	05:10	06:10	01:00
4	ist	ank	05:30	06:30	01:00
5	ist	adb	06:30	07:30	01:00
6	ist	ada	07:00	08:35	01:35
7	ist	dln	07:05	08:20	01:15
8	ist	bjv	07:05	08:15	01:10
9	ist	diy	07:15	09:10	01:55
10	ist	ank	07:30	08:30	01:00
11	ist	tzk	07:30	09:15	01:45
12	ist	kbp	08:40	10:40	02:00
13	ist	gzt	07:45	09:30	01:45
14	ist	adb	08:00	09:00	01:00
15	ist	szf	08:00	09:20	01:20
16	ist	ada	08:20	09:55	01:35
17	ist	ayt	08:25	09:40	01:15
18	ist	adb	08:30	09:30	01:00
19	ist	asr	08:35	10:00	01:25
20	ist	ank	09:00	10:00	01:00
21	ist	adb	09:00	10:00	01:00
22	ist	ank	11:00	12:00	01:00
23	ist	adb	11:00	12:00	01:00
24	ist	ank	11:05	12:05	01:00
25	ist	ada	11:30	13:05	01:35
26	ist	ayt	12:15	13:30	01:15
27	ist	erz	12:30	14:30	02:00
28	ist	van	12:30	14:30	02:00
29	ist	adb	13:00	14:00	01:00
30	ist	adb	15:00	16:00	01:00
31	ist	ank	15:10	16:10	01:00
32	ist	tzk	15:15	17:00	01:45
33	ist	adb	16:00	17:00	01:00
34	ist	ank	16:10	17:10	01:00
35	ist	ayt	16:20	17:55	01:35
36	ist	ank	16:40	17:50	01:10
37	ist	adb	17:00	18:00	01:00
38	ist	ada	17:15	18:45	01:30
39	ist	gzt	17:15	19:05	01:50
40	ist	ayt	17:20	18:35	01:15
41	ist	ank	17:30	18:30	01:00
42	ist	ank	18:00	19:00	01:00
43	ist	dnz	18:15	19:25	01:10
44	ist	asr	18:15	19:40	01:25
45	ist	szf	18:30	19:50	01:20
46	ist	ayt	18:55	20:10	01:15
47	ist	ank	19:00	20:00	01:00
48	ist	adb	19:00	20:00	01:00

49	ist	diy	19:05	21:00	01:55
50	ist	bjv	19:15	20:25	01:10
51	ist	ada	19:15	20:50	01:35
52	ist	dIm	19:20	20:35	01:15
53	ist	mlx	19:25	21:00	01:35
54	ist	adb	20:00	21:00	01:00
55	ist	tzk	20:00	21:45	01:45
56	ist	ayt	20:20	21:35	01:15
57	ist	ank	21:00	22:00	01:00
58	ist	adb	21:30	22:30	01:00
59	ank	ist	07:00	08:00	01:00
60	ank	ist	08:00	09:00	01:00
61	ank	adb	08:10	09:30	01:20
62	ank	ezs	09:30	10:45	01:15
63	ank	ksy	09:45	11:25	01:40
64	ank	van	09:45	11:25	01:40
65	ank	ist	10:00	11:00	01:00
66	ank	ist	10:00	11:00	01:00
67	ank	diy	10:00	11:20	01:20
68	ank	van	12:35	14:15	01:40
69	ank	ist	13:00	14:00	01:00
70	ank	mqm	13:30	15:00	01:30
71	ank	erz	14:30	15:55	01:25
72	ank	diy	15:00	16:20	01:20
73	ank	mlx	15:15	16:15	01:00
74	ank	mlx	16:45	17:45	01:00
75	ank	ist	17:00	18:00	01:00
76	ank	adb	17:40	19:00	01:20
77	ank	ist	18:00	19:00	01:00
78	ank	ist	19:00	20:00	01:00
79	ank	ist	19:30	20:30	01:00
80	ank	gzt	19:30	20:50	01:20
81	ank	mlx	19:30	20:30	01:00
82	ank	ada	19:55	20:50	00:55
83	ank	tzk	20:00	21:15	01:15
84	ank	gzt	20:15	21:35	01:20
85	ank	ist	21:00	22:00	01:00
86	ank	ist	22:45	23:45	01:00
87	asr	ist	10:55	12:15	01:20
88	asr	ist	20:35	21:50	01:15
89	ayt	ist	07:05	08:20	01:15
90	ayt	ist	10:30	11:45	01:15
91	ayt	ist	14:05	15:20	01:15
92	ayt	ist	18:45	20:00	01:15
93	ayt	ist	19:30	20:45	01:15
94	ayt	ist	21:00	22:15	01:15
95	ayt	ist	22:15	23:30	01:15
96	ada	ist	09:25	11:00	01:35
97	ada	ank	09:30	10:30	01:00
98	ada	ist	11:10	12:45	01:35
99	ada	ist	13:45	15:20	01:35
100	ada	ist	19:30	21:00	01:30

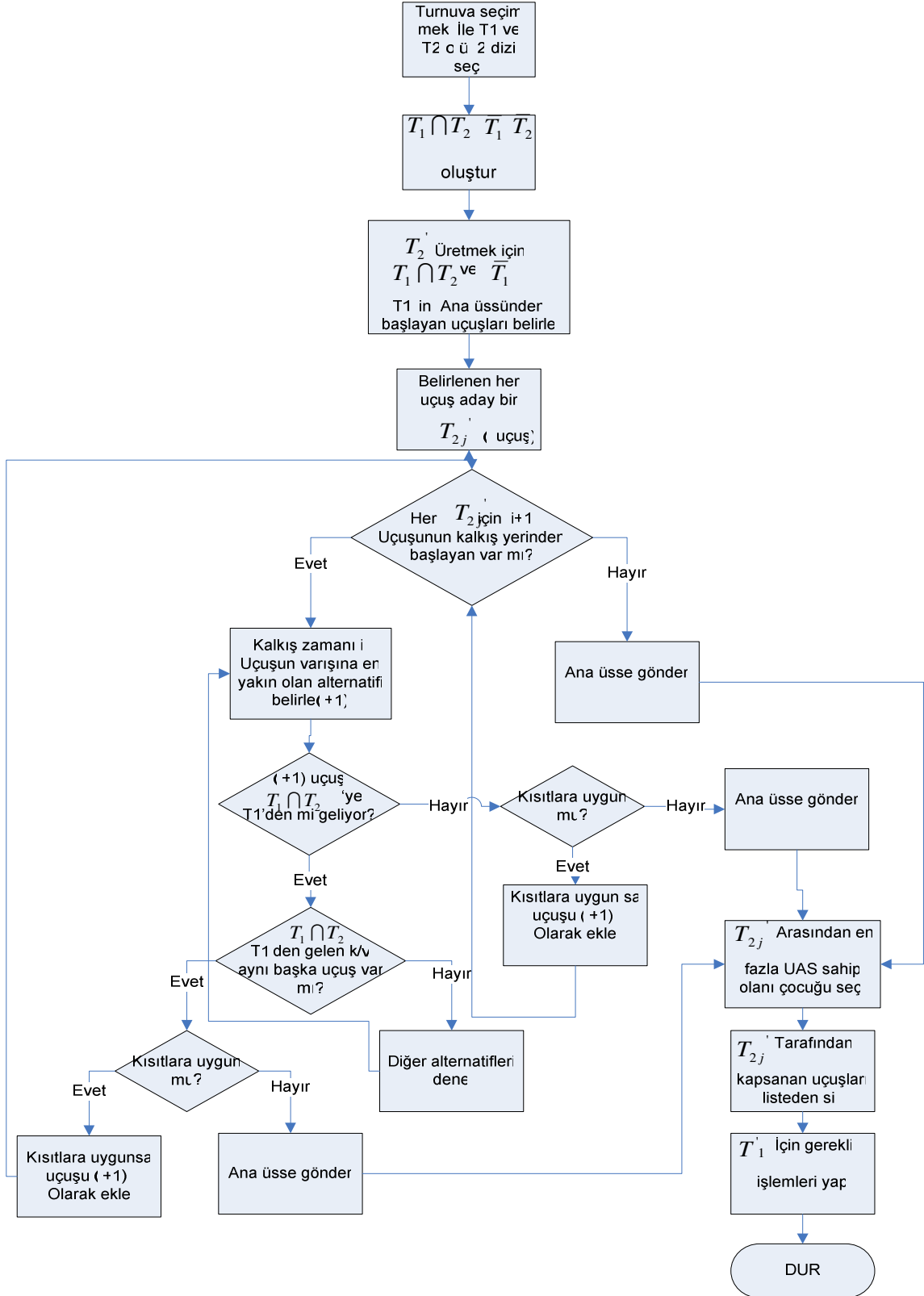
101	ada	ist	21:55	23:30	01:35
102	adb	ist	06:30	07:30	01:00
103	adb	ank	07:45	09:00	01:15
104	adb	ist	09:00	10:00	01:00
105	adb	ist	10:00	11:00	01:00
106	adb	ist	10:30	11:30	01:00
107	adb	ank	10:30	11:45	01:15
108	adb	ist	11:00	12:00	01:00
109	adb	ist	13:00	14:00	01:00
110	adb	ist	15:00	16:00	01:00
111	adb	ist	17:00	18:00	01:00
112	adb	ist	18:00	19:00	01:00
113	adb	ist	19:00	20:00	01:00
114	adb	ank	19:50	21:05	01:15
115	adb	ist	21:00	22:00	01:00
116	adb	ist	23:00	00:00	01:00
117	bjv	ist	09:05	10:15	01:10
118	bjv	ist	21:15	22:25	01:10
119	diy	ist	22:00	23:55	01:55
120	diy	ist	09:55	11:50	01:55
121	diy	ank	12:10	13:40	01:30
122	diy	ank	17:10	18:40	01:30
123	dlm	ist	09:10	10:25	01:15
124	dlm	ist	21:30	22:50	01:20
125	dnz	ist	20:15	21:25	01:10
126	erz	ist	15:25	17:25	02:00
127	erz	ank	16:45	18:15	01:30
128	gzt	ank	10:00	11:20	01:20
129	gzt	ist	10:30	12:20	01:50
130	gzt	ist	20:00	21:55	01:55
131	gzt	ist	21:30	23:10	01:40
132	gzt	ist	22:20	00:00	01:40
133	kbp	ist	11:40	13:45	02:05
134	ksy	ank	12:15	14:05	01:50
135	mlx	ank	17:15	18:25	01:10
136	mlx	ank	18:45	19:55	01:10
137	mlx	ank	21:30	22:40	01:10
138	mlx	ist	22:00	23:35	01:35
139	mqm	ank	15:45	17:20	01:35
140	szf	ist	10:10	11:35	01:25
141	szf	ist	20:45	22:10	01:25
142	tzk	ist	07:20	09:05	01:45
143	tzk	ank	09:15	10:35	01:20
144	tzk	ist	10:00	11:45	01:45
145	tzk	ist	17:30	19:20	01:50
146	tzk	ist	22:15	00:00	01:45
147	van	ank	12:15	14:05	01:50
148	van	ank	15:00	16:50	01:50
149	van	ist	15:20	17:30	02:10
150	ezs	ank	11:30	12:45	01:15

EK 4 Rassal Üretimli Eniyileme Algoritması Akış Şeması

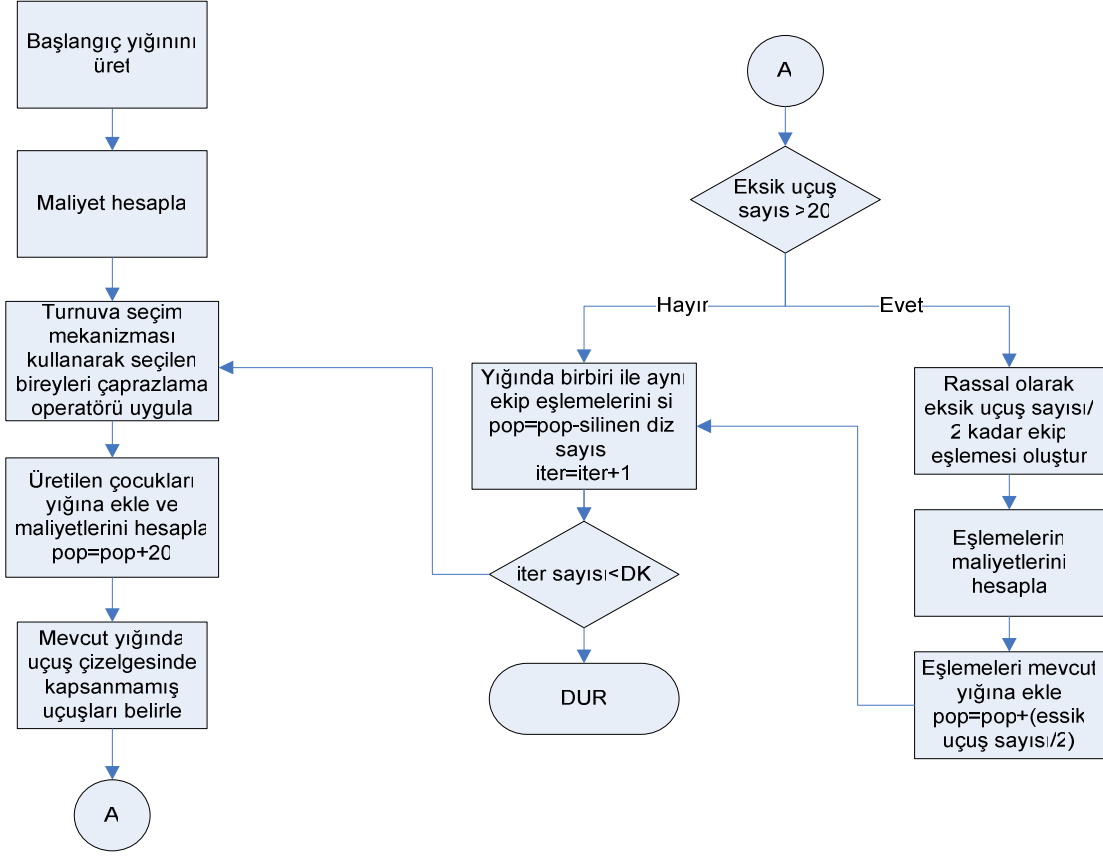


UAS= Uçuş Ayağı Sayısı
 US= Uçuş Süresi
 UGS= Uçuş Görev Süresi

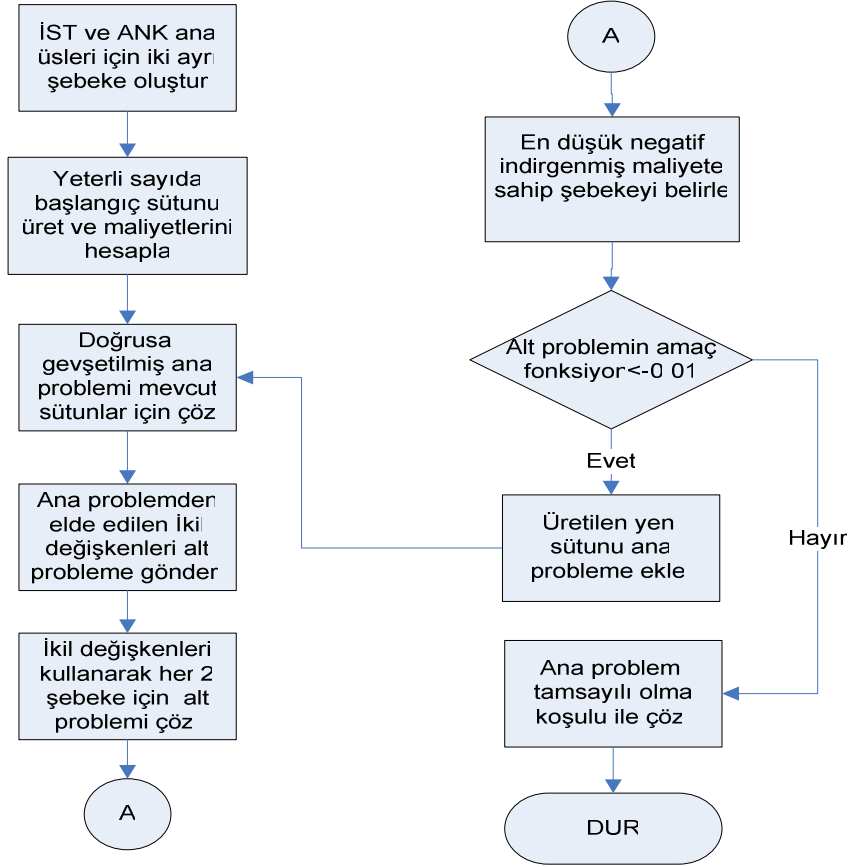
EK 5 Çaprazlama Algoritması Akış Şeması



EK 6 GA Tabanlı Algoritma Akış Şeması



EK 7 Sütun Üretme Yaklaşımı Akış Şeması



EK 8 172 Uçuşlu THY Verisi İçin GA Tabanlı Algoritma İle Elde Edilen Çözüm

Ekip sys.	Uçuşlar	Maliyet	Kalkış yeri/saati - Varış yeri/saati
1	97 117	185	ist ada ada ist 14:00 15:30 16:25 18:00
2	105 121	150	ank adb adb ank 15:00 16:15 17:00 18:15
3	47 69 88 102	370	ist hty hty ist ist ayt ayt ist 07:10 08:55 09:40 11:35 12:45 14:00 14:45 16:00
4	120 144 166 2	352	ist dlm dlm ist ist ecn ecn ist 16:50 18:05 18:50 20:10 21:30 23:00 03:00 04:35
5	114 141 164	195	ank ist ist ayt ayt ank 16:00 17:00 18:30 19:45 20:45 21:45
6	137 161 172 3	310	ist adb adb ist ist ayt ayt ist 18:00 19:00 20:30 21:30 21:55 23:10 03:05 04:20
7	118 143	175	ist szf szf ist 16:35 18:00 18:45 20:15
8	110 130	150	ist ayt ayt ist 15:30 16:45 17:40 18:55
9	35 57 75 94	400	ist kya kya ist ist van van ist 06:05 07:15 08:00 09:15 10:20 12:20 13:05 15:20
10	125 153	225	ist gny gny ist 17:10 19:00 19:45 21:40
11	46 68 98 113	335	ist erc erc ist ist adb adb ist 07:10 08:55 09:40 11:30 14:00 15:00 16:00 17:00
12	151 168	185	ist ecn ecn ist 19:15 20:45 21:35 23:10
13	131 157	230	ist diy diy ist 17:45 19:35 20:10 22:10
14	21 45 66 81	305	ist dlm dlm ist ist ayt ayt ist 05:05 06:20 07:05 08:25 09:30 10:45 11:30 12:45
15	132 162	230	ist erz erz ist 17:45 19:35 20:30 22:30
16	34 58	175	ist szf szf ist 06:00 07:25 08:10 09:40
17	23 52	230	ist diy diy ist 05:15 07:05 07:55 09:55
18	48 71	230	ist erz erz ist 07:20 09:10 09:55 11:55
19	86 103	175	ank erz erz ank 12:30 13:55 14:45 16:15
20	56 72	150	ist ayt ayt ist 08:00 09:15 10:00 11:15
21	16 49	185	ist ada ada ist 05:00 06:30 07:25 09:00
22	42 59	120	ist adb adb ist 07:00 08:00 08:30 09:30
23	32 61	120	ist adb adb ist 06:00 07:00 09:00 10:00
24	17 39	120	ist adb adb ist 05:00 06:00 07:00 08:00

25	6 30	120	ank ist ist ank 04:00 05:00 05:45 06:45
26	20 44	140	ist bju bju ist 05:05 06:15 07:05 08:15
27	10 40	195	ist ecn ecn ist 04:35 06:15 07:00 08:35
28	62 80	120	ank ist ist ank 09:00 10:00 11:00 12:00
29	122 156	120	ank ist ist ank 17:00 18:00 20:00 21:00
30	107 126	180	ist ada ada ist 15:00 16:30 17:15 18:45
31	18 38	130	ist dnz dnz ist 05:00 06:05 06:55 08:00
32	78 99	120	ank ist ist ank 11:00 12:00 14:00 15:00
33	124 163	150	ist ayt ayt ist 17:00 18:15 20:35 21:50
34	85 101	185	ist ada ada ist 12:15 13:45 14:45 16:20
35	7 31	120	ank ayt ayt ank 04:15 05:15 06:00 07:00
36	65 82	185	ist ada ada ist 09:15 10:45 11:45 13:20
37	108 134	120	ist adb adb ist 15:00 16:00 18:00 19:00
38	116 139 160 11	415	ist asr asr ist ist szf szf ist 16:20 17:40 18:25 19:55 20:20 21:45 04:40 06:10
39	170 12	245	ist adb adb ist 21:45 22:45 04:55 05:55
40	119 142 158 13	408	ist bju bju ist ist asr asr ist 16:50 18:00 18:45 19:55 20:15 21:35 04:55 06:25
41	152 1 169 14	1052	ist ada ada ist ist ada ada ist 19:30 21:00 02:50 04:25 21:35 23:05 05:00 06:35
42	148 15 37 54	420	ist adb adb ist ist adb adb ist 19:00 20:00 05:00 06:00 06:40 07:40 08:00 09:00
43	146 22 43	390	ank ayt ayt ist ist ank 19:00 20:00 05:15 06:30 07:00 08:00
44	136 25	377	ank tzu tzu ank 18:00 19:15 05:15 06:35
45	167 26	287	ist tzu tzu ist 21:30 23:15 05:15 07:05
46	135 152 29	382	ank ist ist ada ada ank 18:00 19:00 19:30 21:00 05:45 06:45
47	115 127	120	ist adb adb ist 16:00 17:00 17:20 18:20
48	9 50 67 84	290	ist ank ank diy diy ank ank ist 04:15 05:15 07:30 08:50 09:35 11:05 12:00 13:00
49	76 93 128 154	400	ist erc erc ist ist ada ada ist 10:35 12:20 13:05 14:55 17:20 18:50 19:55 21:30
50	98 112 129 154	290	ist adb adb ank ank ada ada ist 14:00 15:00 15:50 17:05 17:30 18:30 19:55 21:30

51	149 165 4	275	ist ank ank adb adb ist 19:00 20:00 20:50 22:05 03:10 04:10
52	8 33	120	ank ist ist ank 04:15 05:15 06:00 07:00
53	140 155 27	368	ank ist ist adb adb ank 18:30 19:30 20:00 21:00 05:30 06:45
54	123 145	120	ist adb adb ist 17:00 18:00 19:00 20:00
55	79 89	120	ist adb adb ist 11:00 12:00 13:00 14:00
56	36 60	185	ist ada ada ist 06:20 07:50 08:50 10:25
57	51 74	200	ank van van ank 07:45 09:15 10:00 11:50
58	124 150	150	ist ayt ayt ist 17:00 18:15 19:05 20:20
59	83 100	160	ank erc erc ank 12:00 13:15 14:05 15:30
60	41 64	120	ank ist ist ank 07:00 08:00 09:00 10:00
61	95 127 149	195	ank adb adb ist ist ank 13:45 15:00 17:20 18:20 19:00 20:00
62	147 171	120	ank ist ist ank 19:00 20:00 21:45 22:45
63	55 70 87 138	370	ank ist ist ksy ksy ist ist ank 08:00 09:00 09:50 11:50 12:35 14:45 18:00 19:00
64	109 133	215	ist tzx tzx ist 15:20 17:05 17:55 19:45
65	106 159	188	ank ist ist ank 15:00 16:00 20:15 21:15
66	73 90	120	ist ank ank ist 10:00 11:00 13:00 14:00
67	96 111	120	ank ist ist ank 14:00 15:00 15:30 16:30
68	5 24	120	ank ist ist ank 03:25 04:25 05:15 06:15
69	19 53	215	ist tzx tzx ist 05:00 06:45 07:55 09:45
70	91 104	120	ist adb adb ist 13:00 14:00 15:00 16:00
71	28 63 77 92	255	ank ist ist adb adb ist ist ank 05:30 06:30 09:00 10:00 10:50 11:50 13:00 14:00
Toplam Maliyet		16119	

EK 9 150 Uçuşlu THY Verisi İçin GA Tabanlı Algoritma İle Elde Edilen Çözüm

Ekip sys.	Uçuşlar	Maliyet	Kalkış yeri/saati	-	Varış yeri/saati
1	55 146	210	ist	tzk	tzk ist 20:00 21:45 22:15 00:00
2	82 101 4	318	ank	ada	ada ist ist ank 19:55 20:50 21:55 23:30 05:30 06:30
3	67 121 76 114	332	ank	diy	diy ank ank adb adb ank 10:00 11:20 12:10 13:40 17:40 19:00 19:50 21:05
4	20 68 149	290	ist	ank	ank van van ist 09:00 10:00 12:35 14:15 15:20 17:30
5	72 122	170	ank	diy	diy ank 15:00 16:20 17:10 18:40
6	61 108 28 148	370	ank	adb	adb ist ist van van ank 08:10 09:30 11:00 12:00 12:30 14:30 15:00 16:50
7	41 83 146	240	ist	ank	ank tzk tzk ist 17:30 18:30 20:00 21:15 22:15 00:00
8	13 129 29 110	335	ist	gzt	gzt ist ist adb adb ist 07:45 09:30 10:30 12:20 13:00 14:00 15:00 16:00
9	57 86	120	ist	ank	ank ist 21:00 22:00 22:45 23:45
10	42 84 132	240	ist	ank	ank gzt gzt ist 18:00 19:00 20:15 21:35 22:20 00:00
11	71 127	175	ank	erz	erz ank 14:30 15:55 16:45 18:15
12	48 115	120	ist	adb	adb ist 19:00 20:00 21:00 22:00
13	44 88	160	ist	asr	asr ist 18:15 19:40 20:35 21:50
14	43 125	140	ist	dnz	dnz ist 18:15 19:25 20:15 21:25
15	40 93	150	ist	ayt	ayt ist 17:20 18:35 19:30 20:45
16	26 91 46 94	300	ist	ayt	ayt ist ist ayt ayt ist 12:15 13:30 14:05 15:20 18:55 20:10 21:00 22:15
17	19 87 32 145	380	ist	asr	asr ist ist tzk tzk ist 08:35 10:00 10:55 12:15 15:15 17:00 17:30 19:20
18	12 133 38 100	425	ist	kbp	kbp ist ist ada ada ist 08:40 10:40 11:40 13:45 17:15 18:45 19:30 21:00
19	50 118	140	ist	bjv	bjv ist 19:15 20:25 21:15 22:25
20	49 119	230	ist	diy	diy ist 19:05 21:00 22:00 23:55
21	53 138	190	ist	mlx	mlx ist 19:25 21:00 22:00 23:35
22	45 141	165	ist	szf	szf ist 18:30 19:50 20:45 22:10

23	11 144	210	ist tzk tzk ist 07:30 09:15 10:00 11:45
24	39 130	225	ist gzt gzt ist 17:15 19:05 20:00 21:55
25	31 80 131	240	ist ank ank gzt gzt ist 15:10 16:10 19:30 20:50 21:30 23:10
26	70 139 81 137	315	ank mqm mqm ank ank mlx mlx ank 13:30 15:00 15:45 17:20 19:30 20:30 21:30 22:40
27	15 140	165	ist szf szf ist 08:00 09:20 10:10 11:35
28	73 135	130	ank mlx mlx ank 15:15 16:15 17:15 18:25
29	2 142	210	ist tzk tzk ist 05:05 06:50 07:20 09:05
30	6 97 69	215	ist ada ada ank ank ist 07:00 08:35 09:30 10:30 13:00 14:00
31	59 18 107	195	ank ist ist adb adb ank 07:00 08:00 08:30 09:30 10:30 11:45
32	6 96	190	ist ada ada ist 07:00 08:35 09:25 11:00
33	2 143 69	268	ist tzk tzk ank ank ist 05:05 06:50 09:15 10:35 13:00 14:00
34	54 116	120	ist adb adb ist 20:00 21:00 23:00 00:00
35	8 117	140	ist bju bju ist 07:05 08:15 09:05 10:15
36	5 104 33 112	375	ist adb adb ist ist adb adb ist 06:30 07:30 09:00 10:00 16:00 17:00 18:00 19:00
37	64 147	210	ank van van ank 09:45 11:25 12:15 14:05
38	24 74 136 85	328	ist ank ank mlx mlx ank ank ist 11:05 12:05 16:45 17:45 18:45 19:55 21:00 22:00
39	63 134	210	ank ksy ksy ank 09:45 11:25 12:15 14:05
40	36 79	130	ist ank ank ist 16:40 17:50 19:30 20:30
41	60 22	120	ank ist ist ank 08:00 09:00 11:00 12:00
42	51 101	190	ist ada ada ist 19:15 20:50 21:55 23:30
43	10 62 150 75	315	ist ank ank ezs ezs ank ank ist 07:30 08:30 09:30 10:45 11:30 12:45 17:00 18:00
44	3 102 23 109	265	ist adb adb ist ist adb adb ist 05:10 06:10 06:30 07:30 11:00 12:00 13:00 14:00
45	1 89	150	ist ayt ayt ist 05:05 06:20 07:05 08:20
46	16 98	190	ist ada ada ist 08:20 09:55 11:10 12:45

47	21 106	120	ist adb adb ist 09:00 10:00 10:30 11:30
48	3 103 66	195	ist adb adb ank ank ist 05:10 06:10 07:45 09:00 10:00 11:00
49	65 25 99 47	310	ank ist ist ada ada ist ist ank 10:00 11:00 11:30 13:05 13:45 15:20 19:00 20:00
50	56 95	150	ist ayt ayt ist 20:20 21:35 22:15 23:30
51	13 128 77	338	ist gzt gzt ank ank ist 07:45 09:30 10:00 11:20 18:00 19:00
52	17 90	150	ist ayt ayt ist 08:25 09:40 10:30 11:45
53	58 116	120	ist adb adb ist 21:30 22:30 23:00 00:00
54	35 92	170	ist ayt ayt ist 16:20 17:55 18:45 20:00
55	34 78	120	ist ank ank ist 16:10 17:10 19:00 20:00
56	27 126 52 124	395	ist erz erz ist ist dlm dlm ist 12:30 14:30 15:25 17:25 19:20 20:35 21:30 22:50
57	7 123	150	ist dlm dlm ist 07:05 08:20 09:10 10:25
58	9 120 30 111	350	ist diy diy ist ist adb adb ist 07:15 09:10 09:55 11:50 15:00 16:00 17:00 18:00
59	14 105 37 113	360	ist adb adb ist ist adb adb ist 08:00 09:00 10:00 11:00 17:00 18:00 19:00 20:00
Toplam maliyet		13234	

EK 10 150 Uçuşlu THY Uçuş Çizelgesi İçin GA Tabanlı Algoritma İle Elde Edilen İyileştirilmiş Bir Çözüm

Ekip sys.	Uçuşlar	Maliyet	Kalkış yeri/saati	-	Varış yeri/saati
1	21 106 27 126	360	ist	adb adb	ist ist erz erz ist 09:00 10:00 10:30 11:30 12:30 14:30 15:25 17:25
2	59 18 108 31	275	ank	ist ist adb adb	ist ist ank 07:00 08:00 08:30 09:30 11:00 12:00 15:10 16:10
3	2 143 69	268	ist	tzk tzk ank ank	ist 05:05 06:50 09:15 10:35 13:00 14:00
4	13 128 69	245	ist	gzt gzt ank ank	ist 07:45 09:30 10:00 11:20 13:00 14:00
5	66 28 148	290	ank	ist ist van van	ank 10:00 11:00 12:30 14:30 15:00 16:50
6	11 144 27 126	450	ist	tzk tzk ist ist	erz erz ist 07:30 09:15 10:00 11:45 12:30 14:30 15:25 17:25
7	17 90 29 110	270	ist	ayt ayt ist ist	adb adb ist 08:25 09:40 10:30 11:45 13:00 14:00 15:00 16:00
8	6 96 25 99	380	ist	ada ada ist ist	ada ada ist 07:00 08:35 09:25 11:00 11:30 13:05 13:45 15:20
9	76 114 86 4	385	ank	adb adb ank ank	ist ist ank 17:40 19:00 19:50 21:05 22:45 23:45 05:30 06:30
10	35 92 57 86	290	ist	ayt ayt ist ist	ank ank ist 16:20 17:55 18:45 20:00 21:00 22:00 22:45 23:45
11	5 104 24 69	240	ist	adb adb ist ist	ank ank ist 06:30 07:30 09:00 10:00 11:05 12:05 13:00 14:00
12	42 83 146	240	ist	ank ank tzk tzk	ist 18:00 19:00 20:00 21:15 22:15 00:00
13	67 121 73 135	300	ank	diy diy ank ank	mlx mlx ank 10:00 11:20 12:10 13:40 15:15 16:15 17:15 18:25
14	41 80 131	240	ist	ank ank gzt gzt	ist 17:30 18:30 19:30 20:50 21:30 23:10
15	39 130	225	ist	gzt gzt ist	 17:15 19:05 20:00 21:55
16	15 140 29 110	285	ist	szf szf ist ist	adb adb ist 08:00 09:20 10:10 11:35 13:00 14:00 15:00 16:00
17	8 117 23 109	260	ist	bjv bju ist ist	adb adb ist 07:05 08:15 09:05 10:15 11:00 12:00 13:00 14:00
18	34 82 101	220	ist	ank ank ada ada	ist 16:10 17:10 19:55 20:50 21:55 23:30
19	7 123 26 91	300	ist	dml dml ist ist	ayt ayt ist 07:05 08:20 09:10 10:25 12:15 13:30 14:05 15:20
20	64 147 74 136	340	ank	van van ank ank	mlx mlx ank 09:45 11:25 12:15 14:05 16:45 17:45 18:45 19:55
21	9 120 26 91	380	ist	diy diy ist ist	ayt ayt ist 07:15 09:10 09:55 11:50 12:15 13:30 14:05 15:20
22	4 61 105	200	ist	ank ank adb adb	ist 05:30 06:30 08:10 09:30 10:00 11:00

23	60 24 70 139	305	ank ist ist ank ank mqm mqm ank	08:00 09:00 11:05 12:05 13:30 15:00 15:45 17:20
24	13 129 31 77	338	ist gzt gzt ist ist ank ank ist	07:45 09:30 10:30 12:20 15:10 16:10 18:00 19:00
25	46 94	150	ist ayt ayt ist	18:55 20:10 21:00 22:15
26	19 87 29 111	285	ist asr asr ist ist adb adb ist	08:35 10:00 10:55 12:15 13:00 14:00 17:00 18:00
27	40 93 58 116	270	ist ayt ayt ist ist adb adb ist	17:20 18:35 19:30 20:45 21:30 22:30 23:00 00:00
28	47 85	120	ist ank ank ist	19:00 20:00 21:00 22:00
29	36 78 56 95	280	ist ank ank ist ist ayt ayt ist	16:40 17:50 19:00 20:00 20:20 21:35 22:15 23:30
30	6 97 68 149	385	ist ada ada ank ank van van ist	07:00 08:35 09:30 10:30 12:35 14:15 15:20 17:30
31	33 112 54 116	240	ist adb adb ist ist adb adb ist	16:00 17:00 18:00 19:00 20:00 21:00 23:00 00:00
32	10 63 134 75	330	ist ank ank ksy ksy ank ank ist	07:30 08:30 09:45 11:25 12:15 14:05 17:00 18:00
33	43 125	140	ist dnz dnz ist	18:15 19:25 20:15 21:25
34	71 127 79 57	295	ank erz erz ank ank ist ist ank	14:30 15:55 16:45 18:15 19:30 20:30 21:00 22:00
35	16 98 30 113	350	ist ada ada ist ist adb adb ist	08:20 09:55 11:10 12:45 15:00 16:00 19:00 20:00
36	52 124	155	ist dlm dlm ist	19:20 20:35 21:30 22:50
37	12 133 32 145	460	ist kbp kbp ist ist tzk tzk ist	08:40 10:40 11:40 13:45 15:15 17:00 17:30 19:20
38	42 84 132	240	ist ank ank gzt gzt ist	18:00 19:00 20:15 21:35 22:20 00:00
39	48 115	120	ist adb adb ist	19:00 20:00 21:00 22:00
40	51 101	190	ist ada ada ist	19:15 20:50 21:55 23:30
41	49 119	230	ist diy diy ist	19:05 21:00 22:00 23:55
42	37 115	150	ist adb adb ist	17:00 18:00 21:00 22:00
43	44 88	160	ist asr asr ist	18:15 19:40 20:35 21:50
44	55 146	210	ist tzk tzk ist	20:00 21:45 22:15 00:00
45	62 150 72 122	320	ank ezs ezs ank ank diy diy ank	09:30 10:45 11:30 12:45 15:00 16:20 17:10 18:40
46	50 118	140	ist bju bju ist	19:15 20:25 21:15 22:25

47	45 141	165	ist szf szf ist 18:30 19:50 20:45 22:10
48	53 138	190	ist mlx mlx ist 19:25 21:00 22:00 23:35
49	2 142 22 69	330	ist tzk tzk ist ist ank ank ist 05:05 06:50 07:20 09:05 11:00 12:00 13:00 14:00
50	14 107 69	195	ist adb adb ank ank ist 08:00 09:00 10:30 11:45 13:00 14:00
51	1 89 20 69	270	ist ayt ayt ist ist ank ank ist 05:05 06:20 07:05 08:20 09:00 10:00 13:00 14:00
52	38 100 58 116	300	ist ada ada ist ist adb adb ist 17:15 18:45 19:30 21:00 21:30 22:30 23:00 00:00
53	81 137	130	ank mlx mlx ank 19:30 20:30 21:30 22:40
54	3 103 65	195	ist adb adb ank ank ist 05:10 06:10 07:45 09:00 10:00 11:00
55	3 102	120	ist adb adb ist 05:10 06:10 06:30 07:30
Toplam Maliyet		14201/13191	

EK 11 172 Uçuşlu THY Verisi İçin Karma Sütun Üretme Yaklaşımı İle Elde Edilen Çözüm

Ekip sys.	Uçuşlar	Maliyet	Kalkış yeri/saati	-	Variş yeri/saati
1	166 2 35 57	352	ecn ist ist	kya kya ist ist	ecn 03:00 04:35 06:05 07:15 08:00 09:15 21:30 23:00
2	7 31 50 67	290	ank ayt ayt	ank ank diy diy	ank 04:15 05:15 06:00 07:00 07:30 08:50 09:35 11:05
3	23 52 85 101	415	ist diy diy	ist ist ada ada	ist 05:15 07:05 07:55 09:55 12:15 13:45 14:45 16:20
4	125 153	225	ist gny gny	ist	 17:10 19:00 19:45 21:40
5	151 168	185	ist ecn ecn	ist	 19:15 20:45 21:35 23:10
6	120 144	155	ist dlm dlm	ist	 16:50 18:05 18:50 20:10
7	65 82 107 126	365	ist ada ada	ist ist ada ada	ist 09:15 10:45 11:45 13:20 15:00 16:30 17:15 18:45
8	132 162	230	ist erz erz	ist	 17:45 19:35 20:30 22:30
9	135 152 29	382	ada ank ank	ist ist ada	 05:45 06:45 18:00 19:00 19:30 21:00
10	18 38	130	ist dnz dnz	ist	 05:00 06:05 06:55 08:00
11	48 71 88 102	380	ist erz erz	ist ist ayt ayt	ist 07:20 09:10 09:55 11:55 12:45 14:00 14:45 16:00
12	116 139 160 11	415	szf ist ist	asr asr ist ist	szf 04:40 06:10 16:20 17:40 18:25 19:55 20:20 21:45
13	131 157	230	ist diy diy	ist	 17:45 19:35 20:10 22:10
14	141 163	150	ist ayt ayt	ist	 18:30 19:45 20:35 21:50
15	34 58	175	ist szf szf	ist	 06:00 07:25 08:10 09:40
16	16 49	185	ist ada ada	ist	 05:00 06:30 07:25 09:00
17	86 103	175	ank erz erz	ank	 12:30 13:55 14:45 16:15 03:45
18	63 77 98 113	240	ist adb adb	ist ist adb adb	ist 09:00 10:00 10:50 11:50 14:00 15:00 16:00 17:00
19	122 156	120	ank ist ist	ank	 17:00 18:00 20:00 21:00
20	6 30	120	ank ist ist	ank	 04:00 05:00 05:45 06:45
21	56 72	150	ist ayt ayt	ist	 08:00 09:15 10:00 11:15
22	110 130	150	ist ayt ayt	ist	 15:30 16:45 17:40 18:55

23	80 96	120	ist ank ank ist	11:00 12:00 14:00 15:00
24	115 134	120	ist adb adb ist	16:00 17:00 18:00 19:00
25	108 127	120	ist adb adb ist	15:00 16:00 17:20 18:20
26	10 40	195	ist ecn ecn ist	04:35 06:15 07:00 08:35
27	8 33	120	ank ist ist ank	04:15 05:15 06:00 07:00
28	12 170	245	adb ist ist adb	04:55 05:55 21:45 22:45
29	13 119 142 158	408	asr ist ist bju bju ist ist asr	04:55 06:25 16:50 18:00 18:45 19:55 20:15 21:35
30	1 14 152 169	1052	ada ist ist ada ist ada	05:00 06:35 19:30 21:00 21:35 23:05
31	15 37 54 148	420	adb ist ist adb adb ist ist adb	05:00 06:00 06:40 07:40 08:00 09:00 19:00 20:00
32	25 136	377	tzx ank ank tzx	05:15 06:35 18:00 19:15
33	26 167	287	tzx ist ist tzx	05:15 07:05 21:30 23:15
34	27 140 155	368	adb ank ank ist ist adb	05:30 06:45 18:30 19:30 20:00 21:00
35	22 43 146	390	ayt ist ist ank ank ayt	05:15 06:30 07:00 08:00 19:00 20:00
36	4 149 165	275	adb ist ist ank ank adb	03:10 04:10 19:00 20:00 20:50 22:05
37	47 69	220	ist hty hty ist	07:10 08:55 09:40 11:35 04:25
38	3 17 39 172	302	ayt ist ist adb adb ist ist ayt	03:05 04:20 05:00 06:00 07:00 08:00 21:55 23:10
39	137 161	120	ist adb adb ist	18:00 19:00 20:30 21:30 03:30
40	73 90	120	ist ank ank ist	10:00 11:00 13:00 14:00
41	118 143	175	ist szf szf ist	16:35 18:00 18:45 20:15
42	42 59 79 89	240	ist adb adb ist ist adb adb ist	07:00 08:00 08:30 09:30 11:00 12:00 13:00 14:00
43	32 61	120	ist adb adb ist	06:00 07:00 09:00 10:00
44	9 41	120	ist ank ank ist	04:15 05:15 07:00 08:00 03:45
45	24 62 76 93	335	ist ank ank ist ist erc erc ist	05:15 06:15 09:00 10:00 10:35 12:20 13:05 14:55
46	19 53 91 104	335	ist tzx tzx ist ist adb adb ist	05:00 06:45 07:55 09:45 13:00 14:00 15:00 16:00

47	105 121	150	ank adb adb ank 15:00 16:15 17:00 18:15
48	111 129 154	215	ist ank ank ada ada ist 15:30 16:30 17:30 18:30 19:55 21:30
49	28 46 68 99	335	ank ist ist erc erc ist ist ank 05:30 06:30 07:10 08:55 09:40 11:30 14:00 15:00
50	36 60 97 117	370	ist ada ada ist ist ada ada ist 06:20 07:50 08:50 10:25 14:00 15:30 16:25 18:00
51	95 112 147 171	270	ank adb adb ank ank ist ist ank 13:45 15:00 15:50 17:05 19:00 20:00 21:45 22:45
52	78 92	120	ank ist ist ank 11:00 12:00 13:00 14:00
53	83 100	160	ank erc erc ank 12:00 13:15 14:05 15:30
54	51 74	200	ank van van ank 07:45 09:15 10:00 11:50
55	70 87 123 145	370	ist ksy ksy ist ist adb adb ist 09:50 11:50 12:35 14:45 17:00 18:00 19:00 20:00
56	106 138	120	ank ist ist ank 15:00 16:00 18:00 19:00
57	114 141 164	195	ank ist ist ayt ayt ank 16:00 17:00 18:30 19:45 20:45 21:45
58	128 154	185	ist ada ada ist 17:20 18:50 19:55 21:30
59	55 75 94 138	375	ank ist ist van van ist ist ank 08:00 09:00 10:20 12:20 13:05 15:20 18:00 19:00
60	84 109 133 159	335	ank ist ist tzx tzx ist ist ank 12:00 13:00 15:20 17:05 17:55 19:45 20:15 21:15
61	21 45 66 81	305	ist dlm dlm ist ist ayt ayt ist 05:05 06:20 07:05 08:25 09:30 10:45 11:30 12:45
62	124 150	150	ist ayt ayt ist 17:00 18:15 19:05 20:20
63	5 20 44 64	260	ank ist ist bju bju ist ist ank 03:25 04:25 05:05 06:15 07:05 08:15 09:00 10:00
Toplam Maliyet		15918	

EK 12 150 Uçuşlu THY Verisi İçin Karma Sütun Üretme Yaklaşımı İle Elde Edilen Çözüm

Ekip sys.	Uçuşlar	Maliyet	Kalkış yeri/saati	-	Varış yeri/saati
1	25 38 99 100	370	ist	ada	ist ada ada ist ada ist 11:30 13:05 17:15 18:45 13:45 15:20 19:30 21:00
2	8 27 117 126	380	ist	bjv	ist erz bjv ist erz ist 07:05 08:15 12:30 14:30 09:05 10:15 15:25 17:25
3	56 95	150	ist	ayt	ayt ist 20:20 21:35 22:15 23:30
4	32 57 69 145	335	ist	tzk	ist ank ank ist tzk ist 15:15 17:00 21:00 22:00 13:00 14:00 17:30 19:20
5	49 119	230	ist	diy	diy ist 19:05 21:00 22:00 23:55
6	50 118	140	ist	bjv	bjv ist 19:15 20:25 21:15 22:25
7	45 141	165	ist	szf	szf ist 18:30 19:50 20:45 22:10
8	44 88	160	ist	asr	asr ist 18:15 19:40 20:35 21:50
9	11 29 111 144	330	ist	tzk	ist adb adb ist tzk ist 07:30 09:15 13:00 14:00 17:00 18:00 10:00 11:45
10	73 135	130	ank	mlx	mlx ank 15:15 16:15 17:15 18:25
11	15 140	165	ist	szf	szf ist 08:00 09:20 10:10 11:35
12	43 125	140	ist	dnz	dnz ist 18:15 19:25 20:15 21:25
13	74 136	130	ank	mlx	mlx ank 16:45 17:45 18:45 19:55
14	72 122	170	ank	diy	diy ank 15:00 16:20 17:10 18:40
15	35 92	170	ist	ayt	ayt ist 16:20 17:55 18:45 20:00
16	9 120	230	ist	diy	diy ist 07:15 09:10 09:55 11:50
17	70 139	185	ank	mqm	mqm ank 13:30 15:00 15:45 17:20
18	3 18 102 105	240	ist	adb	ist adb adb ist adb ist 05:10 06:10 08:30 09:30 06:30 07:30 10:00 11:00
19	39 130	225	ist	gzt	gzt ist 17:15 19:05 20:00 21:55
20	13 129	215	ist	gzt	gzt ist 07:45 09:30 10:30 12:20
21	17 90	150	ist	ayt	ayt ist 08:25 09:40 10:30 11:45
22	3 65 103	195	ist	adb	ank ist adb ank 05:10 06:10 10:00 11:00 07:45 09:00

23	19 87	165	ist asr asr ist 08:35 10:00 10:55 12:15
24	26 91	150	ist ayt ayt ist 12:15 13:30 14:05 15:20
25	37 113	120	ist adb adb ist 17:00 18:00 19:00 20:00
26	7 123	150	ist dlm dlm ist 07:05 08:20 09:10 10:25
27	23 109	120	ist adb adb ist 11:00 12:00 13:00 14:00
28	63 134	210	ank ksy ksy ank 09:45 11:25 12:15 14:05
29	12 133	245	ist kbp kbp ist 08:40 10:40 11:40 13:45
30	5 104	120	ist adb adb ist 06:30 07:30 09:00 10:00
31	1 21 89 106	270	ist ayt ist adb ayt ist adb ist 05:05 06:20 09:00 10:00 07:05 08:20 10:30 11:30
32	40 58 93 116	270	ist ayt ist adb ayt ist adb ist 17:20 18:35 21:30 22:30 19:30 20:45 23:00 00:00
33	30 46 94 111	270	ist adb ist ayt ayt ist adb ist 15:00 16:00 18:55 20:10 21:00 22:15 17:00 18:00
34	31 51 75 101	310	ist ank ist ada ank ist ada ist 15:10 16:10 19:15 20:50 17:00 18:00 21:55 23:30
35	6 84 97 132	120	ist ada ank gzt ada ank gzt ist 07:00 08:35 20:15 21:35 09:30 10:30 22:20 00:00
36	28 80 132 148	120	ist van ank gzt gzt ist van ank 12:30 14:30 19:30 20:50 22:20 00:00 15:00 16:50
37	14 32 110 146	120	ist adb ist tzk adb ist tzk ist 08:00 09:00 15:15 17:00 15:00 16:00 22:15 00:00
38	54 62 116 150	120	ist adb ank ezs adb ist ezs ank 20:00 21:00 09:30 10:45 23:00 00:00 11:30 12:45
39	48 54 115 116	120	ist adb ist adb adb ist adb ist 19:00 20:00 20:00 21:00 21:00 22:00 23:00 00:00
40	53 55 138 146	120	ist mlx ist tzk mlx ist tzk ist 19:25 21:00 20:00 21:45 22:00 23:35 22:15 00:00
41	37 84 114 132	120	ist adb ank gzt adb ank gzt ist 17:00 18:00 20:15 21:35 19:50 21:05 22:20 00:00
42	10 33 96 116	120	ist ank ist adb ada ist adb ist 07:30 08:30 16:00 17:00 09:25 11:00 23:00 00:00
43	5 47 86 116	142.5	ist adb ist ank ank ist adb ist 06:30 07:30 19:00 20:00 22:45 23:45 23:00 00:00
44	14 83 107 146	120	ist adb ank tzk adb ank tzk ist 08:00 09:00 20:00 21:15 10:30 11:45 22:15 00:00
45	42 68 149	290	ist ank ank van van ist 18:00 19:00 12:35 14:15 15:20 17:30
46	20 48 66 116	120	ist ank ist adb ank ist adb ist 09:00 10:00 19:00 20:00 10:00 11:00 23:00 00:00

47	2	76	116	143	120	ist	tzk	ank	adb	adb	ist	tzk	ank	05:05	06:50	17:40	19:00	23:00	00:00	09:15	10:35	
48	10	58	78	116	120	ist	ank	ist	adb	ank	ist	adb	ist	07:30	08:30	21:30	22:30	19:00	20:00	23:00	00:00	
49	16	34	59	98	310	ist	ada	ist	ank	ank	ist	ada	ist	08:20	09:55	16:10	17:10	07:00	08:00	11:10	12:45	
50	13	61	116	128	120	ist	gzt	ank	adb	adb	ist	gzt	ank	07:45	09:30	08:10	09:30	23:00	00:00	10:00	11:20	
51	24	71	85	127	120	ist	ank	ank	erz	ank	ist	erz	ank	11:05	12:05	14:30	15:55	21:00	22:00	16:45	18:15	
52	55	64	146	147	327.5	ist	tzk	ank	van	tzk	ist	van	ank	20:00	21:45	09:45	11:25	22:15	00:00	12:15	14:05	
53	54	67	116	121	130	ist	adb	ank	diy	adb	ist	diy	ank	20:00	21:00	10:00	11:20	23:00	00:00	12:10	13:40	
54	32	81	137	146	120	ist	tzk	ank	mlx	mlx	ank	tzk	ist	15:15	17:00	19:30	20:30	21:30	22:40	22:15	00:00	
55	33	52	112	124	275	ist	adb	ist	dln	adb	ist	dln	ist	16:00	17:00	19:20	20:35	18:00	19:00	21:30	22:50	
56	108	116			120	adb	ist	adb	ist					11:00	12:00	23:00	00:00					
57	36	55	77	146	120	ist	ank	ist	tzk	ank	ist	tzk	ist	16:40	17:50	20:00	21:45	18:00	19:00	22:15	00:00	
58	13	55	131	146	120	ist	gzt	ist	tzk	gzt	ist	tzk	ist	07:45	09:30	20:00	21:45	21:30	23:10	22:15	00:00	
59	22	60			120	ist	ank	ank	ist					11:00	12:00	08:00	09:00					
60	41	82	101		210	ist	ank	ank	ada	ada	ist			17:30	18:30	19:55	20:50	21:55	23:30			
61	2	18	116	142	120	ist	tzk	ist	adb	adb	ist	tzk	ist	05:05	06:50	08:30	09:30	23:00	00:00	07:20	09:05	
62	4	58	79	116	120	ist	ank	ist	adb	ank	ist	adb	ist	05:30	06:30	21:30	22:30	19:30	20:30	23:00	00:00	
Toplam maliyet					11210																	