

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GENETİK ALGORİTMALAR İLE HAVAYOLU EKİP
PLANLAMADA EKİP ROTASYON
OPTİMİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Uçak Müh. Bahadır ZEREN**

Anabilim Dalı: Uçak ve Uzay Mühendisliği

Programı: Uçak ve Uzay Mühendisliği

OCAK 2008

**GENETİK ALGORİTMALAR İLE HAVAYOLU EKİP
PLANLAMADA EKİP ROTASYON
OPTİMİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Uçak Müh. Bahadır ZEREN
Enstitü No: 511041005**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Aralık 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 28 Ocak 2008**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. İbrahim ÖZKOL (İ.T.Ü.)
Diğer Jüri Üyeleri : Doç.Dr. Selman NAS (İ.T.Ü.)
Doç.Dr. Erol UZAL (İ.Ü.)**

OCAK 2008

ÖNSÖZ

Hazırlamış olduğum bu tezi, öncelikle bugünlere gelmemde büyük emeği olan aileme ithaf ediyorum. Tezimin hazırlanmasında değerli eleştiri ve önerileri ile bana destek olan ve motivasyonumu hep üst seviyede tutmaya çalışan danışman hocam Prof. Dr. İbrahim Özkol 'a da teşekkürü borç bilirim. Ayrıca tez çalışmasının analizinde ve ilerleyen aşamalarında sorduğum soruları özveri ile cevaplayarak desteklerini esirgemeyen İşl. Yük. Müh. Ebru Özkan 'a da şükranlarımı sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	II
TABLO LİSTESİ	V
ŞEKİL LİSTESİ	VI
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
1. GİRİŞ	1
2. HAVAYOLU EKİP PLANLAMADA TEMEL KAVRAM VE TANIMLAR	2
2.1. Filo Tipi (Fleet Type)	2
2.2. Mürettebat Tipleri (Crew Types)	2
2.2.1. Kokpit (Cockpit) Mürettebatı	2
2.2.2. Kabin (Cabin) Mürettebatı	2
2.3. Ekip Sertifikaları (Crew Certificates)	3
2.4. Planlama Alanı (Planning Area)	3
2.5. Uçuş Görevi (Flight Duty)	5
2.6. Dinlenme Süresi (Rest Period)	6
2.7. Ekip Rotasyonu (Pairing)	6
2.8. Pas Uçuş	7
2.9. Uzun Menzil Uçuşu (ER Flight)	7
3. EKİP ROTASYON OPTİMİZASYON PROBLEMİ (Crew Pairing Optimization Problem)	8
4. EKİP ROTASYON PROBLEMİNİN ÇÖZÜM	10
5. EKİP ROTASYONU OLUŞTURMA (Pairing Generation)	11
5.1. Uçuş Görevi Oluşturma (Flight Duty Generation)	11
5.2. Ekip Rotasyonu Oluşturma (Pairing Generation)	13
6. DİLİMLEME (Slicing)	16
7. OPTİMİZASYON (Optimization)	17
7.1. Küme Kapsama Problemi (Set Covering Problem)	17
7.2. Genetik Algoritmalar	18
7.3. Ekip Rotasyon Optimizasyonunda GA	21
7.3.1. Kolon Temelli Gösterim (Column-Based Representation)	21
7.3.2. Satır Temelli Gösterim (Row-Based Representation)	22
7.3.3. İlk Populasyon (Initial Population)	22
7.3.4. Seleksiyon Operatörü (Selection Operator)	23
7.3.5. Çaprazlama Operatörü (Crossover Operator)	24
7.3.6. Mutasyon Operatörü (Mutation Operator)	25
7.3.7. Uygunluk Operatörü (Heuristic Feasibility Operator)	26
7.3.8. Kromozom İyileştirme Operatörü (Enhancement Operator)	28
7.3.9. Uygunluk Fonksiyonu (Fitness Function)	29
7.3.10. Populasyon Yenileme (Population Replacement)	30
8. DENEYSEL SONUÇLAR	31
8.1. Tek Merkezli	31

8.2. Çok Merkezli	33
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	35
10. KAYNAKLAR	36
11. ÖZGEÇMİŞ	37

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 2.1 : Uçak tiplerine göre ihtiyaç duyulan ekip sayıları	2
Tablo 2.2 : Filo tiplerine göre ihtiyaç duyulan kokpit sertifikaları	3
Tablo 2.3 : Filo tiplerine göre ihtiyaç duyulan kabin sertifikaları	3
Tablo 2.4 : Planlama alanları	4
Tablo 2.5 : Örnek uçuş görevi	5
Tablo 2.6 : Normal uçuş görev süreleri	5
Tablo 2.7 : Uzun menzil uçuları azami uçuş görev süreleri	6
Tablo 2.8 : Asgari dinlenme süreleri	6
Tablo 2.9 : Örnek ekip rotasyonu	6
Tablo 8.1 : Tek merkezli optimizasyon sonuçları	32
Tablo 8.2 : İki merkezli optimizasyon sonuçları	33

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 4.1: Ekip rotasyon probleminin çözümü özet şema	10
Şekil 5.1: Uçuş görevi üretimi akış diyagramı	12
Şekil 5.2: Ekip rotasyon üretimi akış diyagramı	14
Şekil 6.1: Ekip rotasyon probleminin çözümü detay şema	16
Şekil 7.1: Örnek küme kapsama problemi	18
Şekil 7.2: Genetik algoritma yaşam döngüsü	20
Şekil 7.3: Kolon temelli gösterim	21
Şekil 7.4: Satır temelli gösterim	22
Şekil 7.5: Algoritma çalışma esnasındaki mutasyon oranı değişimi	26
Şekil 8.1: Tek merkezli çözümde maliyet değişimi	31
Şekil 8.2: Tek merkezli çözümde pas sayısı değişimi	32
Şekil 8.3: İki merkezli çözümde maliyet değişimi	34
Şekil 8.4: İki merkezli çözümde pas sayısı değişimi	34

GENETİK ALGORİTMALAR İLE HAVAYOLU EKİP PLANLAMADA EKİP ROTASYON OPTİMİZASYONU

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, havayolu şirketlerinin en büyük maliyet kalemlerinden biri olan ekip planlama konusunun incelenmesi ve ekip planlama sürecinin ilk aşaması olan ekip rotasyonları üretimi konusunda genetik algoritmalar ile bir optimizasyon algoritmasının geliştirilmesidir.

Ekip planlama konusu birçok endüstri için mali açıdan çok önemli bir konudur. Özellikle havayolu firmaları göz önünde alındığında ekip maliyetleri yakıt maliyetlerinden sonraki en büyük harcama kalemini oluşturmaktadır. Aynı zamanda görev süresi kısıtlamaları sebebi ile de firma bünyesindeki ekip elemanlarının verimli kullanımı da ekip planlama sürecinde göz önüne alınması gereken önemli bir parametredir. Bu durum ekip planlama ve optimizasyon yazılımlarını havayolu endüstrisi için son derece önemli kılmaktadır.

Çalışmada öncelikle ekip planlamanın önemi belirtilmiştir. Daha sonra planlama süreci ile ilgili temel kavram ve tanımlar açıklanmıştır. İleriki bölümlerde ise ekip rotasyon probleminin aşamaları olan ekip rotasyon üretimi ve ekip rotasyon optimizasyonu konuları incelenmiş ve bu konuda geliştirmeler yapılmıştır.

Ekip planlama, temelde ekip rotasyon (crew pairing) ve ekip atama (crew roster) optimizasyonu olmak üzere iki aşamada incelenmektedir. Bunlardan ilk aşama olan ekip rotasyon optimizasyonu bu çalışmanın da temelini oluşturmaktadır. Ekip rotasyon optimizasyonu problemi, planlama sürecinde maliyetlerin büyük ölçüde belirlendiği aşamadır. Bu aşamada belirli bir ekip merkezinden başlayıp tekrar aynı merkezde biten ve tüm uçuşları kapsayan optimum ekip rotasyon kümeleri üretilir. Ekip atama aşamasında ise üretilen optimum ekip rotasyon kümesi için gereken ekip atamaları yapılır.

Bu çalışmada ekip rotasyon optimizasyonu konusunda var olan bazı çalışmalar incelenmiş ve özellikle çok merkezli çözüm ile genetik algoritmanın daha da sağlam ve efektif çalışması konusunda geliştirmeler yapılmıştır. Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere yapılan iyileştirme ile genetik algoritmanın çok daha sağlam (robust) çalışması sağlanmış ve yakınsama hızı oldukça yükseltilmiştir.

Bu çalışma aynı zamanda ekip planlama sürecinin ikinci aşaması olan ekip atama (crew rostering) aşaması için de bir ön çalışma mahiyetindedir. Çünkü ekip atama sürecinin başarısıda tamamen ekip rotasyon aşamasında üretilen ekip rotasyon kümelerinin kalitesine bağlıdır.

CREW PAIRING OPTIMIZATION WITH GENETIC ALGORITHMS

SUMMARY

The aim of this study is to examine Airline crew scheduling topic which is the one of the biggest cost factors for all airline companies and to develop an optimization algorithm about optimum crew pairing generation which is the first phase of airline crew scheduling with genetic algorithms.

Man power scheduling is very important issue in economical manner for a lot of kind of industry. Especially for airline companies, crew costs constitutes the biggest cost factor next to fuel costs. At the same time, a nother parameter that has to be taken into account is the efficient crew utilization, because of the flight duration limits for the crew that airline companies has to consider. These situations make crew scheduling and optimization softwares too important for airline industry.

In this study, first, the importance of crew scheduling were stated. Then the main definitions and concepts related to planning process were explained. In further sections, crew pairing generation and crew pairing optimization which are the phases of crew pairing problem were examined and some developments has been done upon them.

Crew scheduling is examined mainly in two sections, crew pairing and crew rostering optimization. Crew pairing optimization phase which is the first one between them constitutes the main subject of this study. Crew pairing optimization problem is the main cost-determining phase in scheduling process. In this phase, optimum sets of crew pairings which are begining and ending at the homebase for the crew are generated to cover all flights in the airline's timetable. In crew rostering phase, necessary crew assignments are done for optimum crew pairing set which is generated before.

In this study, some studies about crew pairing optimization were examined, some existing methods were improved to obtain faster convergence rate and the existence of multiple crewbase was simulated for the solution of the problem using genetic algorithms. As can be seen from the results, convergence rate was increased and more robust results were obtained through the perturbation operator we used.

This study is also an initial study for the crew rostering phase which is the second phase of the crew scheduling. Because the success of the crew rostering phase is completely depend on the quality of results of crew pairing phase.

1. GİRİŞ

Havayolu Ekip Planlama; bir havayolu şirketi bünyesinde çalışan, çeşitli niteliklere sahip olan uçuş mürettebatının (crew), firma tarafından planlanmış olan uçuş programını eksiksiz tamamlayacak şekilde uçuş görevlerine atanması işlemi olarak tanımlanabilir. Ve bu süreç doğrudan firmanın uçuş maliyetlerini etkilediği için, günümüzün rekabetçi piyasa koşullarında havayolu firmaları için ekonomik açıdan her geçen gün önemi artan bir konudur. Öyleki, ekip maliyetleri, havayolu firmaları için yakıt tüketiminden sonraki en büyük ikinci maliyet unsurudur.

Havayolu Ekip Planlama problemi, kendi içinde zor ve kombinatoriyel optimizasyon (combinatorial optimization) alt problemlerini barındırmaktadır. Öyleki, örneğin ekip rotasyon optimizasyonu göz önüne alındığında, orta büyüklükteki bir havayolu şirketinin, bir uçuş noktasında, yüzlerce farklı havaalanı ile bağlantısı olabileceği için milyonlarca farklı olasılık ile karşılaşılmaktadır.

Süreç, temel olarak iki aşamadan oluşmakta ve öncelikle Öncelikle **Ekip Rotasyon (Crew Pairing)** problemi çözülmektedir. Bu aşamada havayolu firmasının programındaki her uçuşu en az bir kez kapsayan ve aynı zamanda maliyetleri minimize eden Ekip Rotasyonları (Crew Pairings) kümesi oluşturulur.

Ardından ise **Ekip Atama (Crew Rostering)** problemi çözülmektedir. Bu aşamada ise belirlenen Ekip Rotasyon kümesindeki her bir Ekip Rotasyonuna ihtiyaç duyulduğu kadar mürettebat ataması yapılır.

Her iki aşamada da, sivil havacılık kurumunun [1] ve havayolu firmasının uyguladığı bir çok kısıt göz önüne alınmak zorundadır. Bu durum ele alınan problemi yüksek seviyede kısıtlı bir optimizasyon problemine dönüştürmektedir.

Planlama sürecinin [5] ve [6] referanslarındaki gibi tek aşamada çözümü konusunda yapılmış çalışmalar da vardır. Fakat tek aşamalı çözümün gerektirdiği büyük işlem yükü ve çok daha büyük sayılara ulaşan çözüm kümesi, optimizasyon algoritmasının kısıtlamaları ihlal etmeyen (feasible) çözüm üretebilme ihtimalini azaltmaktadır.

2. HAVAYOLU EKİP PLANLAMADA TEMEL KAVRAM VE TANIMLAR

2.1. Filo Tipi (Fleet Type)

Filo grupları; sertifikasyon, yolcu ve mürettebat sayısı gibi özellikleri birbirine benzeyen uçaklar için yapılan, kavramsal bir gruplandırma. Örneğin Airbus 32A, 32B, 32S...321 model uçaklar A-320 filosunu; 313, 314, 317...31F uçakları A-310 filosunu oluşturmaktadır.

2.2. Mürettebat Tipleri (Crew Types)

Bir havayolu firmasında temel olarak, **kokpit (cockpit)** ve **kabin (cabin)** olmak üzere iki uçucu ekip sınıfı vardır.

2.2.1. Kokpit (Cockpit) Mürettebatı

Kokpit mürettebatı, kaptan ve pilotlardan oluşmaktadır. Genelde her uçuşta bir kaptan ve bir pilot bulunmaktadır.

2.2.2. Kabin (Cabin) Mürettebatı

Kabin ekibi, kabin amiri ve kabin memurundan oluşmaktadır. Genelde her uçuşta bir amir bulunur. Memur sayısı ise uçak filo tipi, uygulanan uçuş görevi tipi gibi parametrelere bağlı olarak 3 ile 8 arasında elemandan oluşabilmektedir. Örneğin 737 filosu 3 memur ile uçar iken 340 filosu 7 memur ile uçmaktadır. Genel olarak uçak tipine bağlı olarak ihtiyaç duyulan ekip sayıları aşağıdaki gibi uygulanmaktadır.

Tablo 2.1 : Uçak tiplerine göre ihtiyaç duyulan ekip sayıları

Uçak/ekip	A-340		A-310		B738		A-320	
	A-340	A-330	A-310	31Y	B-738	B-737	A-319/320	A-321
Kokpit	Kaptan	1	1	1	1	1	1	1
	Pilot	1	1	1	1	1	1	1
Kabin	Amir	1	1	1	1	1	1	1
	Memur	7	7	5	0	3	3	4

2.3. Ekip Sertifikaları (Crew Certificates)

Ekip sertifikaları bir ekip elemanının hangi uçak filusunun sertifikalarına sahip olduğunu yani hangi filo ile göreve gidebileceğini gösterir. Sertifikalar özellikle atama (roster) sürecinde çok önemlidir. Fakat ileride görüleceği üzere ekip rotasyon oluşturma sürecinde de özellikle ekip ikamet merkezlerine (crew base) göre sertifika dağılımı önemli bilgi sağlamaktadır. Sertifikalar kokpit ve kabin için aşağıdaki gibidir.

Tablo 2.2 : Filo tiplerine göre ihtiyaç duyulan kokpit sertifikaları

Filo	Kaptan	Pilot
A-310	310-C	310-P
A-320	320-C	320-P
A-340	340-C	340-P
B-737	737-C	737-P
B-738	738-C	738-P

Tablo 2.3 : Filo tiplerine göre ihtiyaç duyulan kabin sertifikaları

Filo	Amir	Memur
A-310	310-A	310-S
A-320	320-A	320-S
A-340	340-A	340-S
B-737	737-A	737-S
B-738	738-A	738-S

Tüm kaptanlar aynı zamanda ilgili pilot sertifikasına, tüm amirler de aynı zamanda ilgili memur sertifikasına sahiptirler.

2.4. Planlama Alanı (Planning Area)

Planlama alanı, ekip planlama sürecindeki en önemli kavramsal gruplandırmalardan biridir. Problem, uçak tiplerine göre aşağıdaki gibi planlama alanlarına bölünerek çözülmektedir.

Tablo 2.4 : Planlama alanları

Planlama Alanı	Kokpit				Kabin		
	340	320	310	738	340	320	310
Uçak Tipleri	343	32A	313	738	343	32A	313
	332	32B	314	734	332	32B	314
	34Y	32B	317	73C	34Y	32B	317
		32S	318	73G		32S	318
		3P1	31Y	737		3P1	31Y
		32E	311			32E	311
		32I	312			32I	312
		32L	31F			32L	31F
		32M				32M	
		32T				32T	
		32U				32U	
		319				319	
		320				320	
		321				321	
						738	
						734	
						73C	
					73G		
					737		

Tablodan da anlaşılacağı üzere, ekip rotasyon problemi kokpit ve kabin olmak üzere öncelikle iki planlama grubuna ayrılır. Daha sonra ise kokpit ve kabin planlama alanları sertifikasyon dağılımına göre filo gruplarına ayrılır.

Ekip rotasyon problemi çözülürken, algoritma her planlama alanı için ayrı ayrı çalıştırılarak optimize edilmiş ekip rotasyon kümeleri oluşturulur. Örneğin, planlama yapılacak period içindeki tüm A-320 filosuna bağlı olan uçuşlar seçilerek Kokpit 320 planlama alanı altına çözülür.

2.5. Uçuş Görevi (Flight Duty)

Bir veya daha fazla uçuştan oluşan ve bitiminde uçuş mürettebatının dinlenmeye alınması gereken zaman dilimine uçuş görevi denir. Örnek bir uçuş görevi aşağıdaki gibidir.

Tablo 2.5 : Örnek uçuş görevi

Görev Başlangıcı	Görev Bitişi	Filo Tipi	Kalkış Saati	İniş Saati	Kalkış Yeri	Varış Yeri
25.03.2007 06:20		310	25.03.2007 07:35	25.03.2007 10:45	IST	GVA
		310	25.03.2007 11:45	25.03.2007 14:45	GVA	IST
		310	25.03.2007 16:00	25.03.2007 17:00	IST	ESB
	25.03.2007 19:30	310	25.03.2007 18:00	25.03.2007 19:00	ESB	IST

Uçuş görevleri ekip sayılarına göre temel olarak üç şekilde uygulanır.

- Normal uçuş ekibi ile
- İlave uçuş ekibi ile
- İlave tam uçuş ekibi ile

Uçuş görevinin normal uçuş ekibi ile uygulanması, görevin uygulandığı uçak filosunun ihtiyaç duyduğu kadar kokpit ve kabin ekibi ile uygulanmasıdır. İlave uçuş ekibi ve ilave tam uçuş ekibi ise, SHT (Sivil havacılık Talimatı) [1] kapsamı içinde görev süresinin uzatılmasının gerektiği durumlarda uygulanabilmektedir. İlave ekip, ekstradan bir kaptan ve bir kabin memurunu, ilave tam ekip ise ekstradan tam bir normal ekibi içermektedir.

Uzun menzil uçuşlarında ise uçuş görev süresi, normal ekip ile uygulansa dahi uzun olabilmekte fakat dinlenme süreleri buna göre farklı uygulanmaktadır.

Uçuş görevi süreleri SHT talimatında [1] aşağıdaki gibi verilmiştir.

Tablo 2.6 : Normal uçuş görev süreleri

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

Tablo 2.7 : Uzun menzil uçuları azami uçuş görev süreleri

	Uçuş Görev Süresi
Normal Uçuş Ekibi	14 Saat
İlave Ekip ile	16 Saat
İlave Tam Ekip ile	18 Saat

2.6. Dinlenme Süresi (Rest Period)

Dinlenme süresi bir uçucu ekibin, uçuş görevi sonunda başlayan ve her türlü görevden muhaf tutulduğu süredir. Asgari dinlenme süreleri SHT [1] de aşağıdaki gibi verilmiştir.

Tablo 2.8 : Asgari dinlenme süreleri

BİR ÖNCEKİ UÇUŞ GÖREV SÜRESİ	ASGARİ DİNLENME SÜRESİ
6 Saate kadar	8 saat
11 Saate kadar(Dahil)	10 Saat
11 Saatten daha fazla	12 Saat
12–14 Saat veya ZD farkı 3 saatten fazla	14 Saat
Uzun Menzil Uçuşları	2 Yerel Gece / 36 saat

2.7. Ekip Rotasyonu (Pairing)

Ekip rotasyonu, bir veya birden fazla uçuş görevinden oluşan ve belirli bir ekip ikamet merkezinden (crew base) başlayıp tekrar aynı merkezde biten uçuş dizisidir. Örnek bir ekip rotasyonu aşağıdaki gibidir.

Tablo 2.9 : Örnek ekip rotasyonu

Uçuş Görev No	Görev Başlangıcı	Görev Bitişi	Filo Tipi	Kalkış Saati	İniş Saati	Kalkış Yeri	Varış Yeri
1	25.03.2007 10:00		310	25.03.2007 11:15	25.03.2007 13:20	IST	TLV
			310	25.03.2007 14:20	25.03.2007 16:25	TLV	IST
		25.03.2007 23:05	310	25.03.2007 17:25	25.03.2007 22:35	IST	ALA
Dinlenme							
2	26.03.2007 19:45	27.03.2007 03:25	310	26.03.2007 20:45	27.03.2007 02:55	ALA	IST
Dinlenme							

Ekip rotasyonu planlama işlemi, ekip planlama sürecinin ilk ve en önemli aşamasıdır. Planlamanın başarısı ve maliyetlerin minimize edilebilmesi, tamamen bu aşamada kullanılan algoritmanın optimum ekip rotasyon kümesi oluşturabilme kabiliyetine bağlıdır.

2.8. Pas Uçuş

Bir uçuşçu ekip eğer mürettebat değil de yolcu olarak uçuş yapıyor ise buna pas uçuş denmektedir. Pas uçuşlar ile özellikle, bir uçuş ekibinin başka bir uçuş görevini yerine getirmek için sözkonusu uçuş görevinin başlama noktasına gitmesi gerektiği durumlarda karşılaşılr.

Pas uçuşlar, yolcu taşıma kapasitesini düşüren ve ekibin verimli kullanımını azaltan bir faktördür. Bundan dolayı planlama sürecinde daima sayısının minimize edilmesi istenir.

2.9. Uzun Menzil Uçuşu (ER Flight)

Bir uçuş görev süresi içinde, 4 saatten daha fazla zaman dilimi geçilen uçuş veya tek inişli uçuş için 8 saat veya daha fazla yapılan uçuş, iki inişli uçuşlarda ise uçuşlardan en az birisinin süresi 6 (dahil) saati geçen ve bu iki uçuşun süreleri toplamı 8,5 (dahil) saati geçen bir uçuş görevini ifade eder. [1]

3. EKİP ROTASYON OPTİMİZASYON PROBLEMİ (Crew Pairing Optimization Problem)

Ekip rotasyon problemindeki temel amaç, uçuşlara atanan ekip elemanlarının maliyetlerinin minimize edilmesidir. Her ekip elemanı bir ekip merkezinde (crew base) ikamet etmekte ve atanacağı ekip rotasyonlarının da bu ikamet merkezinden başlayıp tekrar aynı merkezde bitmesi gerekmektedir. Ekip rotasyon çözümünde, her ikamet merkezi için büyük eleman sayılarına ulaşan uygun (legal) ekip rotasyon kümeleri üretilir ve bu kümelerin içinden, tarifedeki her uçuşu en az bir kez kapsayan ve maliyetleri minimize eden alt kümeler aranır.

Ekip rotasyonlarının legal olabilmesi için birtakım kısıtlamalar göz önüne alınmalıdır. Bu kısıtlamalardan bazıları zamansal ve konumsal kısıtlamalar iken diğerleri ise Sivil Havacılık Yönetmeliğinden [1] veya havayolu şirketinin uyguladığı özel uygulamalardan gelmektedir.

- Zamansal kısıtlamalar: Ekip rotasyonundaki bir uçuşun kalkış saati ondan önceki uçuşun bitiş saatinden sonra yer almak zorundadır. Aynı zamanda ilk uçuşun bitiş saati ile sonraki uçuşun kalkış saati arasında yönetmelikle belirlenen bir geçiş zaman aralığı olmak zorundadır.
- Konumsal kısıtlamalar: Ekip rotasyonundaki arka arkaya gerçekleştirilen iki uçuşun ilkinin varış yeri ile, ondan sonraki uçuşun kalkış yeri aynı olmak zorundadır. Aynı zamanda ekip rotasyonunun ilk uçuşunun kalkış yeri ile son uçuşun iniş yeri de aynı ekip ikamet merkezi olmalıdır.
- Yönetmelik kaynaklı kısıtlamalar: Bu kısıtlamalar genel anlamda maksimum uçuş süresi, maksimum uçuş görev süresi, minimum dinlenme süresi, maksimum ekip rotasyon süresi gibi kısıtları belirlerler.

Problem çözümlenirken karar verilmesi gereken diğer bir önemli konu da kullanılacak olan amaç fonksiyonu (objective function) ve maliyet değerleri yerine kullanılacak niceliklerdir. Genelde bu konuda [2], [5] ve benzeri çalışmalarda toplam parasal maliyet kullanılmaktadır. Bunun için öncelikle ekip rotasyonlarının maliyetleri, görevdeki ekibin sözkonusu ekip rotasyonu için alacağı ücretler ve otel masrafları gibi kalemlerin toplanması ile elde edilir. Ve tüm çözümün maliyeti ise, bu ekip rotasyonlarının maliyetlerinin toplanması ile hesaplanır.

Fakat THY ekip planlama bölümü tarafından, doğrudan ekip ücretleri ile hesaplanan maliyetin minimize edilmesinden ziyade, ekip rotasyonlarının (uçuş görevi + dinlenme süresi) sürelerinin toplamının minimize edilmesinin daha önemli bir gereksinim olduğu belirtilmiştir. Dolayısıyla bu çalışmada amaç fonksiyonu olarak toplam ekip rotasyon sürelerinin minimize edilmesine çalışılmıştır.

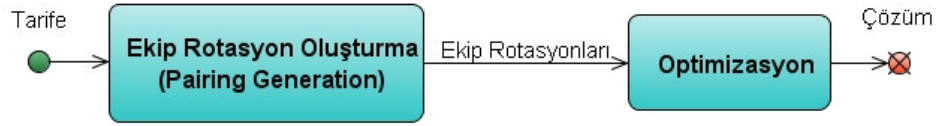
Göz önüne alınması gereken diğer bir husus da pas uçuşlardır. Yolcu taşıma kapasitesini düşüren ve ekibin verimli kullanımını azaltan pas uçuşların sayısının minimize edilmesi için maliyet fonksiyonundaki payları, belirli katsayı ile çarpılarak hesaplanmıştır.

Pas uçuşlar gibi maliyet fonksiyonunda etkisinin arttırıldığı diğer bir husus da ekip rotasyonlarının ikamet merkezlerine (crew base) göre dağılımıdır. Ekip rotasyonları ikamet merkezlerine göre öyle seçilmeli ki ikamet merkezlerindeki ekip sayılarına göre görev dağılımı orantılı olmalıdır. Bu kısıtlama görev dağılımı aşamasında değişik şehirlerde ikamet eden ekip elemanları için daha sağlıklı görev ataması yapılabilmesi açısından önem arz etmektedir.

4. EKİP ROTASYON PROBLEMİNİN ÇÖZÜMÜ

Ekib rotasyon problemi, [2] ve [4] te de görülebileceği üzere büyük boyutlara ulaşan arama uzayı (large size of search space), sistemin nonlineerliğini arttıran kısıtlamalar ve amaç fonksiyonu sebebiyle iki aşamada çözülmektedir.

- Ekib rotasyon oluşturma : Bu aşamada, tarifedeki uçuş verisi kullanılarak çok sayıda uygun ekib rotasyonu oluşturulur ve her bir ekib rotasyonu için amaç fonksiyonunda kullanılacak olan değerler hesaplanır.
- Optimizasyon : Oluşturulan ekib rotasyonu kümesinin içinden; her uçuşu en az bir kez kapsayan ve amaç fonksiyonunu minimize eden optimum ekib rotasyonu alt kümesi seçilir.



Şekil 4.1: Ekib rotasyon probleminin çözümü özet şema

Bu yaklaşımın bir avantajı da kısıtlamalar ve amaç fonksiyonu ile ilgili hesaplamaların tamamen birinci aşamada göz önüne alınıyor olması ve optimizasyon aşamasının bunlardan bağımsız olmasıdır. Bu sayede ilk aşamada büyük sayıda ekib rotasyonları üretildikten sonra optimizasyon aşaması kolay bir şekilde küme kapsama problemi (set covering problem) olarak modellenebilmektedir. [4]

5. EKİP ROTASYONU OLUŞTURMA (Pairing Generation)

Ekip rotasyonu üretimi işleminin girdi verisi, havayolu şirketinin tarifesindeki uçuşların kümesi F dir. Sistem kısıtlamaları ise $C : 2^F \rightarrow \{0,1\}$ formülü ile tanımlanmaktadır. Burada p , $C(p)=1$ ise geçerli, $C(p)=0$ ise geçerli olmayan bir ekip rotasyonudur. Bu aşamada amaç, zorunlu olan tüm sistem kısıtlamalarını sağlayan $P = \{p \in 2^F \mid C(p)=1\}$ ekip rotasyon kümesinin elde edilmesidir.

Fakat problemin pratikteki büyüklüğü göz önüne alındığında tüm ekip rotasyonlarının üretimi mümkün olmamaktadır. Örneğin $F = 1000$ için ekip rotasyonu üretimi sözkonusu olduğunda 2^{1000} ekip rotasyonu kontrol edilmek zorunda kalınacaktır. Ve aynı zamanda çok fazla ekip rotasyonu üretilmesi, bir sonraki aşama olan optimizasyon aşamasının zorluğunu da arttıracaktır. Bu nedenle bu aşamada sonucun kalitesini düşürmeyecek ölçüde, mümkün olduğu kadar az ekip rotasyonu üretilmesi yoluna gidilmiştir. [4]

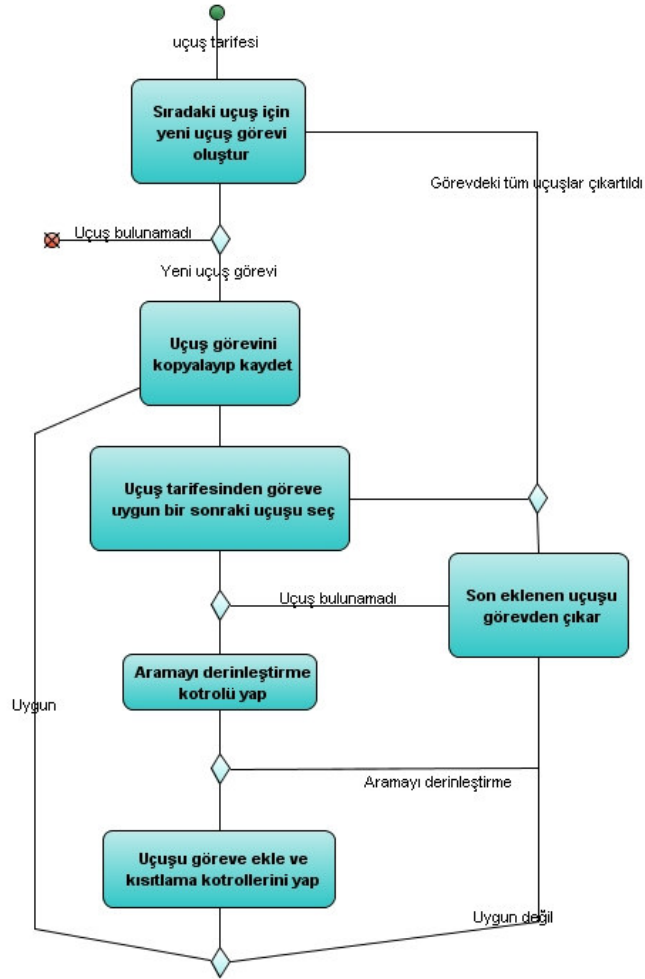
Ekip rotasyonu oluşturma işlemi kendi içinde de ikiye ayrılmaktadır. İlk olarak tarifedeki uçuşlar kullanılarak uçuş görevleri, ikinci aşamada da oluşturulan uçuş görevlerinden ekip rotasyonları üretilmektedir. İlk aşamada tarifedeki uçuş kümesi girdi olarak kullanılarak uçuş görevleri üretilir ve kısıtlamalara uygun olan kaliteli uçuş görevleri ise bir sonraki adımda girdi olarak kullanılmak üzere saklanır. İkinci aşamada da benzer yöntem ile ilk aşamada üretilen uçuş görevleri kümesi girdi olarak kullanılır. Ve yine uçuş görevlerinden elde edilen ekip rotasyonlarının kısıtlamaları sağlayan ve kaliteli olanları optimizasyon aşaması için saklanır.

Tüm süreç boyunca, her uçuşun yaklaşık olarak diğer uçuşlar ile aynı sayıda ekip rotasyonu tarafından kapsanması sağlanmıştır. Bu sayede arama uzayında daha büyük farklılık (diversity) sağlanmış ve yüksek kalitede bir çözüm bulunabilmesi kolaylaştırılmıştır. [4]

5.1. Uçuş Görevi Oluşturma (Flight Duty Generation)

Uçuş görevi üretme işlemi için [2] deki gibi kolon oluşturma (column generation) tabanlı yöntemler kullanılabileceği gibi [4] teki gibi iteratif arama algoritmaları da uygulanabilmektedir. Bu yöntemler hakkında daha detaylı bilgi edinmek için [12] ve

[13] referansları incelenebilir. Bu çalışmada depth-first search algoritması kullanılmıştır ve akış diyagramı aşağıdaki gibidir.



Şekil 5.1: Uçuş görevi üretimi akış diyagramı

İlk aşamada tarife verisi, veritabanından bir dizi halinde hafızaya çekilmektedir. Daha sonra sırasıyla tarifedeki her uçuş için uçuş görevi oluşturulup kaydedilir ve sonraki adımlarda ise bu görevler için arama derinleştirilerek tarifeden uçuş görevine eklenebilecek uygun uçuşlar olup olmadığına bakılır. Burada kısıtlama kontrolleri, aramanın daha da derinleştirilip derinleştirilemeyeceği hesaplanır. Kurallara uygun uçuş görevi bulunduğu kopyalanarak kaydedilir. Ve algoritma ilk uçuştan başlayan tüm makul uçuş görevi kombinasyonlarını gözden geçirmiş olur. Daha sonra tarifedeki bir sonraki uçuşa geçilir ve bu uçuş ile başlayan uçuş görevi oluşturularak aynı iterasyon tekrarlanır.

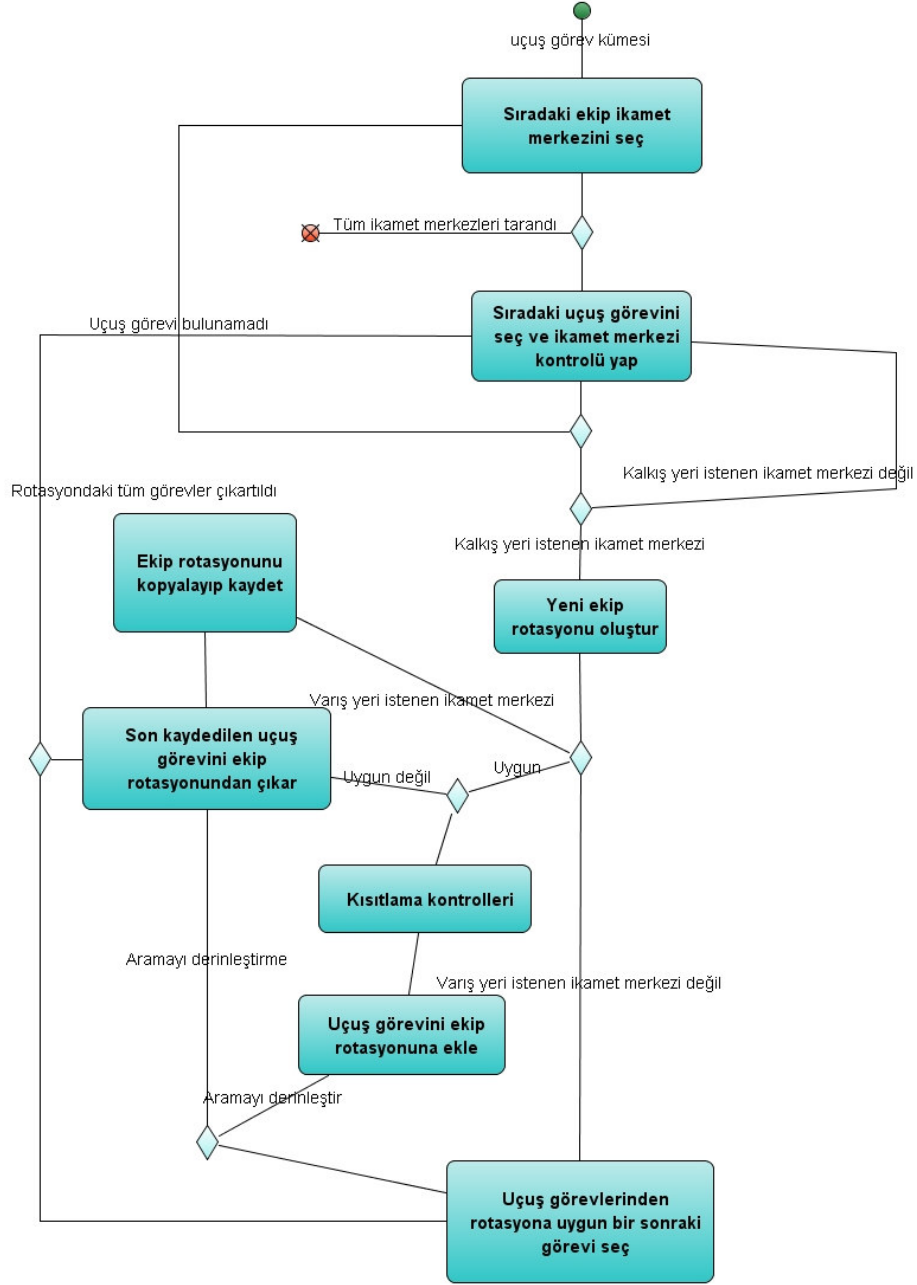
Arama algoritması bu şekilde tamamlandıktan sonra büyük sayıda uçuş görevi kümesi elde edilmiş olur. Fakat çok büyük sayıda uçuş görevini diğer aşamalar için kullanmak ciddi performans problemlerine yol açmaktadır. Bu nedenle uçuş görevi oluşturma işleminin son aşamasında, her uçuş için belli sayıda kaliteli uçuş görevinin saklanması koşulu ile, kötü olan uçuş görevlerinin elenmesi yoluna gidilmiştir. Burada kalite ölçüsü olarak

$$\text{Havada kalma süresi} / (\text{Uçuş görevi süresi} + \text{Dinlenme süresi}) \quad (5.1)$$

oranı kullanılmıştır. Bu oranın yüksek olması uçuş görevinin kaliteli olduğunu, yani daha çok uçuş ile geçtiğini göstermektedir. Eğer bir uçuş görevinde bulunan herhangi bir uçuş için sözkonusu uçuş görevi kalite sıralamasında üstlerde ise uçuş görevi saklanır fakat eğer tüm uçuşlar için kalite sıralamasında sonlarda ise elenir.

5.2. Ekip Rotasyonu Oluşturma (Pairing Generation)

Ekip rotasyonu oluşturma aşamasında da bir önceki uçuş görevi oluşturma aşamasındaki gibi depth first search algoritması kullanılmıştır. Fakat bu aşamadaki girdi, bir önceki aşamada üretilen uçuş görevi kümesidir ve amaç ta bu uçuş görevi kümesinden geçerli ekip rotasyon kümeleri elde etmektir. Akış diyagramı aşağıdaki gibidir.



Şekil 5.2: Ekip rotasyon üretimi akış diyagramı

Bu aşamada hangi ekip ikamet merkezine göre ekip rotasyonu üretilmek isteniyor ise o merkezden başlayıp tekrar aynı merkezde biten uçuş görevi veya görevleri aranmaktadır. İterasyon süresince; zamansal, konumsal ve yönetmelik kaynaklı kısıtlama kontrolleri yapıp uygun bulunan ekip rotasyonları saklanmaktadır. İterasyon tamamlandığında girdi olarak kullanılan uçuş görev kümesinden üretilebilecek tüm makul ekip rotasyonu kombinasyonları gözden geçirilmiş olmaktadır.

Ekib rotasyon oluşturma aşamasının sonunda da performans problemleri ile karşılaşmamak için kalitesiz ekib rotasyonlarının elimine edilmesi yoluna gidilmiştir. Bir nceki uçuş görev oluşturma aşamasındaki gibi her uçuş için belirli sayıda yüksek kalitede ekib rotasyonu saklamak koşulu ile kalitesiz ekib rotasyonları elimine edilmektedir. Ve burada da kalite ölçüsü olarak uçuş görevi eleme işlemindekine benzer bir şekilde

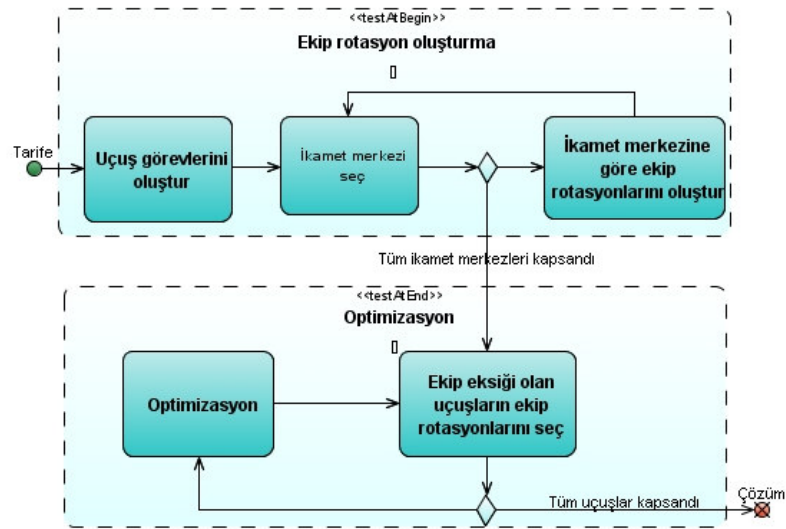
Havada kalma süresi / (Toplam ekib rotasyonu süresi + Dinlenme süresi) (5.2)

oranı kullanılmıştır.

Ekib rotasyon oluşturma aşaması bir önceki aşamadan farklı olarak ne kadar ekib ikamet merkezi var ise hepsi için ayrı ayrı çalıştırılmalıdır.

6. DİLİMLEME (Slicing)

Havayolu ekip planlamada önemli ihtiyaçlardan biri de farklı uçuşlarda farklı sayıda ekip ataması gerekliliğidir. Bu gereklilik, uçuş görev süresinin aşılması sebebi ile ekip sayısının artırılması olabileceği gibi havayolu şirketinin politikaları gereği belli güzergahlarda değişik ekip sayıları uygulanması da olabilir. Bunun için optimizasyon aşamasında [2] de ki gibi dilimleme (slicing) tekniği uygulanmıştır. Dilimleme tekniğinde, her döngü başlangıcında, uçuşlardaki ortak ekip ihtiyacı göz önüne alınarak çözüm üretilir ve her döngü sonunda ekip eksikliği bulunan uçuşlar bir sonraki döngüye girmek üzere küme içinde kalırken, ekip ihtiyacı karşılanan uçuşlar küme dışına çıkarılır. Örnek olarak kokpit 320 planlama alanı için problem çözülmek istendiğinde standart durumda 1 kaptan ve 1 pilot gerekmektedir. Fakat herhangi bir uçuş görevinde ilave ekip uygulanması durumunda kaptan sayısının 2 ye çıkarılması zorunluluğu bulunmaktadır. Uçuş görevlerindeki bu farklı sayıdaki ekip ihtiyacı ekip rotasyonlarında ekip sayısı uyumsuzluklarına yol açmaktadır. Bunun için optimizasyon aşaması öncelikle 1+1 yani 1 kaptan ve 1 pilot için çözülmektedir. Daha sonra elde edilen ilk ekip rotasyon kümesindeki ekip eksikliği bulunan uçuşlar için optimizasyon ayrıca 1+0 yani 1 kaptan 0 pilot olacak şekilde birkez daha çalıştırılmaktadır. Ve ekip ihtiyacı sıfırlanana kadar bu şekilde optimizasyon aşaması tekrarlanmaktadır. Sistemin genel şeması aşağıdaki gibidir.



Şekil 6.1: Ekip rotasyon probleminin çözümü detay şema

7. OPTİMİZASYON (Optimization)

Bu aşamaya kadar; uçuş tarifesi, planlama alanları, ekip ikamet merkezleri gibi verilere dayanarak çok sayıda yüksek kalitede ekip rotasyonu üretilmiştir. Optimizasyon aşamasında ise, elde edilen bu ekip rotasyonlarından, tüm uçuşlardaki ekip ihtiyacını karşılayarak amaç fonksiyonunu minimize eden alt kümeler bulunması amaçlanmaktadır. Ve bu işlem bir küme kapsama (set covering) problemi olarak modellenmiştir.

7.1. Küme Kapsama Problemi (Set Covering Problem)

Küme kapsama problemi, tipik bir kombinatoriyal optimizasyon (combinatorial optimization) problemidir. Problemden amaç, satır sayısı m , kolon sayısı n olan 1 ve 0 lardan oluşan bir matrisin tüm satırlarını minimum maliyet ile kapsamaktır. [7] Örneğin bir x vektörü için, eğer $x_j = 1$ ise j kolonu $c_j > 0$ maliyeti ile çözüm kümesi içinde, $x_j = 0$ ise çözüm kümesi dışında olduğu düşünülürse problem aşağıdaki gibi formülize edilir ($j = 1, 2, \dots, n$).

$$\text{Min} \quad \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (7.1)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq 1, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (7.1a)$$

$$x_j \in \{0, 1\}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (7.1b)$$

Burada (7.1) toplam maliyetin hesaplandığı amaç fonksiyonunu göstermektedir. (7.2) ifadesi ise çözüm dahilinde tüm satırların en az bir kez kapsanmasını garanti altına alan sistem kısıtlamasıdır. Eğer (7.2) kısıtlaması bir eşitlik olursa, problem, küme paylaşma (set partitioning) problemi olarak tanımlanmaktadır.

Örnek olarak aşağıdaki matrisi göz önüne aldığımızda, $X = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0]$ matrisi ile tüm satırlar kapsanarak, çözümün toplam maliyeti $C = 10 + 11 + 8 = 29$ bulunur.

$$\begin{aligned}
 x &= [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5 \quad x_6] \\
 a &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \\
 c &= [10 \quad 5 \quad 11 \quad 10 \quad 8 \quad 2]
 \end{aligned}$$

Şekil 7.1: Örnek küme kapsama problemi

Ekip rotasyon optimizasyonu problemi de tipik bir küme kapsama problemidir. Analogik olarak ekip rotasyonları kolonları, uçuşlar ise satırları temsil eder. Amaç eksiksiz olarak tüm uçuşların, mutlaka en az bir adet ekip rotasyonu tarafından kapsanmasını sağlamaktır. Tarifedeki uçuşların kümesinin F ve bu uçuşları kapsaması gereken ekip rotasyonlarının kümesinin de P olduğu göz önüne alınırsa ekip rotasyon problemi için küme kapsama problemi aşağıdaki gibi formülize edilebilir [9].

$$\text{Min} \quad \sum_{p \in P} c_p x_p \quad (7.2)$$

$$\sum_{p: i \in p} x_p \geq 1 \quad i \in F \quad (7.2a)$$

$$x_p \in \{0,1\} \quad p \in P \quad (7.2b)$$

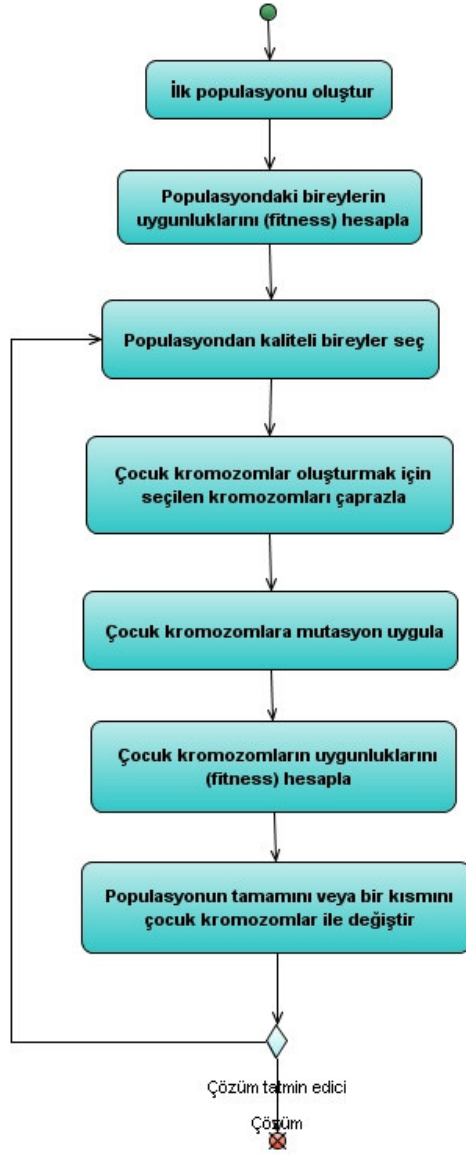
Küme kapsama problemleri için en çok klasik “branch and bound” temelli yöntemler ile genetik algoritmalar yaygın olarak kullanılmaktadır. “Branch and bound” temelli algoritmaların daha kesin sonuçlara ulaşabilmeleri mümkün olsa da orta seviyede bir havayolu şirketinde satır sayısı 5000 leri sütun sayısı ise 100000 leri bulabilen küme kapsama problemleri ortaya çıkmaktadır. Ve genetik algoritmaların [3] teki gibi çalışmalarda 10000 satır ve 1000000 sütun gibi çok büyük problemlerde çok daha hızlı çözüme yakınsadığı kanıtlanmıştır.

7.2. Genetik Algoritmalar

Genetik algoritmalar, bir çok değişik optimizasyon problemine uyarlanabilen, olasılıklara dayanarak çalışan, “zeki” arama-tarama algoritmaları olarak tanımlanabilirler [3]. Teorik temelleri Holland tarafından ortaya atılmıştır [8]. Genetik

algoritmalar, doğadaki biyolojik organizmaların, geçirdikleri evrimsel süreçlerden esinlenilerek geliştirilmiştir. Evrimsel süreç ilerledikçe, populasyon doğal seleksiyon prensibine göre evrimleşmektedir. Populasyon içinde, diğerlerine nazaran, çevrelerine daha iyi adapte olmuş olan bireyler daha yüksek yaşama ve çoğalma şansına sahiptirler ve daha sağlıklı bireyler elenirler. Bu şekilde evrimsel süreç boyunca sağlıklı olan bireylerin genleri nesiller boyunca bir sonraki nesile aktarılır. Sağlıklı bireylerin gen kombinasyonları, kendilerinden daha sağlıklı yeni bireyler oluşmasını sağlayabilmekte ve bu şekilde evrim süreci boyunca populasyonda daha sağlıklı bireyler oluşturabilmektedir.

Genetik algoritmalar, rastgele üretilen ilk nesil ve ondan sonra gelen tüm nesiller üzerinde genetik operatörleri uygulayarak, bu evrimsel optimizasyon sürecini simüle eder. Populasyondaki her birey, problem için mümkün bir çözümü ifade etmektedir ve probleme özgü bir şekilde kodlanarak kromozomlarla temsil edilirler. Her kromozomun (bireyin) çözüm kalitesi (fitness), kullanılan amaç fonksiyonu ile hesaplanır. Yüksek kalitede olan bireyler, genlerindeki bilgiyi, diğer yüksek kalitedeki bireyler ile çaprazlaşma (crossover) operatörü vasıtası ile üreyerek, yeni nesillere aktarırlar. Bu şekilde, ebeveynlerin genleri değişik kombinasyonlarda çocuk nesillere aktarılır ve sürekli yeni çözümler üretilir. Lokal maksimum ve minimuma yakalanmamak için her nesilde, kromozom üzerindeki bazı genlerin değiştirilmesi yolu ile belirli bir oranda mutasyon (mutation) operatörü uygulanır. Ve sonuç olarak yeni nesil ya tamamen eski nesil ile yer değiştirilir (generational approach), ya da kalitesiz olan eski nesildeki bireyler ile yeni nesildeki kaliteli bireyler yer değiştirilir (steady-state approach). Bu döngü tatmin edici bir çözüm bulunana kadar tekrarlanır. Temel genetik algoritma yaşam döngüsü aşağıdaki gibidir.



Şekil 7.2: Genetik algoritma yaşam döngüsü

7.3. Ekip Rotasyon Optimizasyonunda GA

Genetik algoritmalarda küme kapsama problemi için iki çeşit sistem önerilmiştir. Bunlar, kolon temelli gösterim (column-based representation) [3] ve satır temelli gösterimdir (row-based representation) [10].

7.3.1. Kolon Temelli Gösterim (Column-Based Representation)

Kolon temelli gösterim yalın bir gösterim şeklidir ve bu çalışmada da kolon temelli gösterim esas alınmıştır. Ekip rotasyonu sayısının p olduğunu düşünürsek, kromozomlar, 1 ve 0 değerlerini alabilen p uzunluğunda bir dizi ile temsil edilmektedir. Kromozom üzerindeki 1 değerleri, değerlerin bulunduğu indeksteki ekip rotasyonunun (kolon) çözüm kümesi içinde olduğunu, 0 ise olmadığını göstermektedir. Örnek bir gösterim şekli aşağıdaki gibidir.

P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8
1	0	0	1	0	1	1	0

Şekil 7.3: Kolon temelli gösterim

Ve üstteki şemadaki gibi temsil edilmiş bir bireyin (kromozom) uygunluk (fitness) hesabı aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$\sum_{j=1}^8 c_j x_j \quad (7.3)$$

Kolon temelli gösterimde ilk populasyon rastgele üretilir. Fakat ilk populasyon üretiminde ve algoritmanın ileri aşamalarındaki operasyonlar sonucunda ortaya çıkan kromozomların çözüme uygun olması (feasibility) garanti edilemez. Yani algoritma koşarken, çalışan operatörler genler üzerinde değişiklik yaptığı sürece, tüm uçuşların (satırların) kapsanması kısıtını ihlal eden kromozomlar ortaya çıkabilmektedir. Bunun için algoritmada, uygun olmayan kromozomların uygun hale getirilebilmesi için bir düzeltme mekanizmasına ihtiyaç vardır. Bunu sağlayabilmek için kullanılacak en basit yol, uygun olmayan tüm kromozomları çözüm kümesi dışına atmaktır ki bu şekilde hareket edilirse hiç uygun sonucun bulunamaması riski doğar. İkinci olarak bu tip uygun olmayan kromozomların uygunluk fonksiyonunda yüksek ceza değerleri uygulamaktır ve referans [5] te bu yaklaşım kullanılmıştır. Son olarak ise bir uygun olmayan kromozomların belirli bir kurallar çerçevesinde bir onarım sürecinden geçirilerek uygun hale getirilmeleridir. Örnek olarak referans [3]

te, kolon temelli gösterimde onarma stratejisi uygulanarak, uygun olmayan kromozomları, uygun kromozomlar haline getirmek için bir kural tabanlı operator (heuristic feasibility operator) uygulanmıştır.

7.3.2. Satır Temelli Gösterim (Row-Based Representation)

Satır temelli gösterimde, bireyler, uçuş (satır) sayısı kadar genden oluşmaktadır. Her genin indeksi bir uçuşu (satır), genin değeri ise o uçuşu kapsayan ekip rotasyonunu (kolon) temsil etmektedir. Örnek bir gösterim şekli aşağıdaki gibidir.

f_1	F_2	f_3	f_4	f_5	f_6
2	5	7	4	4	1

Şekil 7.4: Satır temelli gösterim

Örnekte görüldüğü üzere, 1. uçuşu 2. ekip rotasyonu, 2. uçuşu 5. ekip rotasyonu kapsamaktadır. Satır temelli gösterim ile kolon temelli gösterimdeki uygun olmayan (infeasible) kromozomların ortaya çıkması problemi oluşmamaktadır. Fakat bu yöntemde, aynı kolon birden fazla gen tarafından temsil edilebileceğinden dolayı aynı çözümün farklı formlarda temsil edilebilmesi mümkün olabilmektedir. Bu da, uygunluk fonksiyonunun hesaplanmasını belirsizleştirmekte, farklı kromozomların aynı çözümü üretmesini ve farklı kromozomların aynı maliyette olmalarını mümkün kılmaktadır. Yöntemin bir diğer dezavantajı da, kolon tabanlı gösterimde iyi sonuç veren uniform çaprazlama operatörünün burada kullanılması durumunda çok fazla mükerrer satır temsili ortaya çıkarmasıdır. Bu durum, tek noktadan çaprazlama (1 point crossover) operatörü veya çok noktadan çaprazlama (multi point crossover) operatörü ile aşılsa dahi bu operatörler de hızlı yakınsama konusunda, diğer yönteme göre çok yavaş kalmaktadırlar. Aynı şekilde, kromozomda belirli genlerin değiştirilmesi ile uygulanan mutasyon operatörü de mükerrer satır temsiline sebep olmaktadır. Referans [10] daki çalışmada satır temelli gösterim kullanılmıştır.

7.3.3. İlk Populasyon (Initial Population)

İlk populasyon, genetik algoritma iterasyonuna girecek olan ilk çözüm kümesidir ve bu kümenin üretilmesi, genetik algoritma çalışmasının ilk aşamasıdır. İlk populasyon üretilirken hiçbir uçuş açıkta kalmayacak şekilde aşağıdaki gibi bir metot uygulanmıştır.

F = Tüm uçuşların (satırların) kümesi

P = Tüm ekip rotasyonlarının (kolonların) kümesi

$\alpha_f = f$ uçuşunu kapsayan ekip rotasyonlarının kümesi, $f \in F$

$\beta_p = p$ ekip rotasyonunun kapsadığı uçuşların kümesi, $p \in P$

S = Bir çözüm kümesini oluşturan ekip rotasyonları kümesi, $S \subset P$

$w_f = f$ uçuşunu kapsayan ve S içinde olan ekip rotasyonlarının sayısı, $f \in F$

olmak üzere;

1. İlk değerleri $S = 0$ ve $w_f = 0$ olarak ayarla.
2. F kümesi içindeki her f için:
 - a. Eğer $w_f > 0$ ise bir sonraki uçuş için 2. adıma git.
 - b. α_f kümesi içinden rastgele bir p ekip rotasyonu seç.
 - c. p ekip rotasyonunu S ye ekle
 - d. $w_f = w_f + 1, \forall f \in \beta_p$

Burada, α_f kümesindeki ekip rotasyonları, kalitelerine göre azalan sırada dizilmişlerdir. Dolayısıyla, 2-b deki ekip rotasyonu seçimi aşamasında, seçilecek olan ekip rotasyonunun, α_f kümesinin ilk k elemanının içinden seçilmesi sağlandığı taktirde, ilk popülasyondaki kaliteyi arttırmak ve ilk iterasyonlarda daha hızlı yakınsama sağlayabilmek mümkün olmaktadır [3]. Bu çalışmada $k = 5$ alınmıştır. k elemandan sonraki ekip rotasyonlarının taranması ise genetik algoritma koşarken gerçekleştirilen; mutasyon, onarma ve iyileştirme operatörleri vasıtası ile sağlanmaktadır.

Popülasyondaki kromozom sayısı $20 * \text{Ekip Merkezi Sayısı}$ formülü ile belirlenmiştir. Kromozom sayısının arttırılması iterasyon sayısını azaltsa dahi işlem yükünü arttırdığı için toplam çözüm süresinin kısalmasını sağlamamaktadır. İlk popülasyondaki her kromozom tek tek yukarıdaki adımlar ile üretildikten sonra genetik algoritma koşturulara hazır hale gelmektedir.

7.3.4. Seleksiyon Operatörü (Selection Operator)

Seleksiyon işlemi, genetik algoritmanın her iterasyonundaki ilk işlemdir. Bu aşamadaki amaç bundan sonraki aşama olan çaprazlama (crossover) operasyonuna girecek olan kromozomların tespit edilmesidir. Çaprazlama (crossover) operasyonu genetik bilginin yeni nesillere aktarıldığı aşama olduğu için çaprazlamaya girecek olan kromozomların seçimi işlemi de algoritmanın yakınsama hızına doğrudan etki etmektedir. Dolayısıyla çaprazlanacak (crossover) olan

kromozomlar, kalitelerinin göz önüne alındığı belirli bir seleksiyon operatörüne göre seçilirler. Bu çalışmada iki yöntem denenmiştir.

- Orantılı seleksiyon (Proportionate selection): Bu yöntemde bir kromozomun seçilebilme olasılığı, uygunluk (fitness) değerine göre hesaplanır. Formülü; N popülasyondaki kromozom sayısı, o_i i . kromozomun seçilme olasılığı, u_i i . kromozomun uygunluk değeri olmak üzere aşağıdaki gibidir.

$$o_i = \frac{1/u_i}{\sum_{j=1}^N 1/u_j} \quad (7.4)$$

Fakat bu yöntemde genetik algoritma ilerledikçe kromozomların uygunluk değerleri birbirine çok yaklaşmakta ve bu nedenle neredeyse eşit olasılık değerlerine sahip olabilmektedirler.

- İkili turnuva seleksiyonu (Binary tournament selection): Bu yöntem turnuva seleksiyon yönteminin iki elemanlı kümeler ile uygulanan halidir. Ekstra bir hesaplama gereksinimi olmadığından hızlı çalışmakta ve aynı zamanda performans açısından da bir dezavantaj getirmemektedir. Dolayısıyla bu çalışmada da [3] teki gibi bu yöntem uygulanmıştır. Yöntem aşağıdaki gibi çalışmaktadır.

1. Popülasyondan rastgele iki kromozom seçilir.
2. Bunlardan uygunluk (fitness) değeri iyi olan seçilir.
3. Popülasyondan tekrar rastgele iki kromozom seçilir.
4. Yine iki kromozomdan uygunluk (fitness) değeri iyi olan seçilir.

2. ve 4. aşamadaki seçilen kromozomlar bir sonraki aşamada çaprazlama işlemine tabi tutulurlar.

7.3.5. Çaprazlama Operatörü (Crossover Operator)

Çaprazlama operatörü, genetik bilginin yeni nesillere aktarıldığı yani çocuk kromozomların oluşturulduğu aşamadır. Seleksiyon işleminden sonra seçilen yüksek uygunluk değerine sahip iki kromozom kullanılarak çaprazlama operatörü vasıtasıyla duruma göre bir veya iki yeni çocuk oluşturulmaktadır. [3] de kromozomların uygunluk (fitness) değerlerinin kullanıldığı fusion çaprazlama operatörü önerilmiştir. Çaprazlanacak olan kromozomlar $K_1[i]$ ve $K_2[i]$, uygunluk değerleri u_{K1} ve u_{K2} , popülasyondaki en kötü uygunluk değeri u_{ek} ve çocuk kromozom $C[i]$ olmak üzere;

1. $i = 1$
2. Eğer $K_1[i] == K_2[i]$ ise $C[i] = K_1[i] = K_2[i]$
3. Eğer $K_1[i] <> K_2[i]$ ise
 1. $o = (u_{K1} - u_{ek}) / (u_{K1} - u_{ek} + u_{K2} - u_{ek})$ olasılığı ile $C[i] = K_1[i]$
 2. $1 - o$ olasılığı ile $C[i] = K_2[i]$
4. Eğer $i < p$ ise $i = i + 1$ ve 2. adıma dön.

Burada u_{ek} değeri sayesinde iki kromozomun çaprazlama olasılıkları dengelenmektedir. Bu sayede algoritma ilerledikçe uygunluk değerleri birbirlerine yaklaşırsa dahi, birbirine çok yakın çaprazlama oranı oluşması engellenmektedir. Örneğin $u_{K1} = 9$, $u_{K2} = 8$, $u_{ek} = 7$ ise $o_1 = 2 / 3$, $o_2 = 1 / 3$ bulunmaktadır.

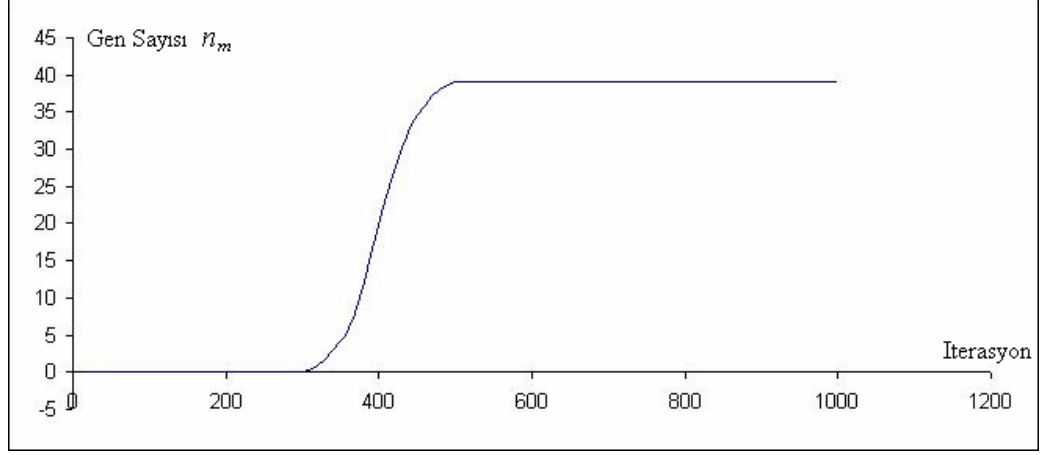
7.3.6. Mutasyon Operatörü (Mutation Operator)

Mutasyon operatörü, algoritmanın lokal maksimum ve minimumlara yakalanmaması için çaprazlama işlemi ile oluşturulan çocuk kromozomlarda gerçekleştirilir ve sistem içinde, küçük çaplı rastlantısal bir arama mekanizması sağlar. Genelde kromozom üzerindeki belli sayıda genin, küçük bir olasılık ile değiştirilmesi şeklinde uygulanır. Referans [3] te, sabit sayıda gen üzerinde değişiklik yapılması yerine algoritma ilerledikçe artan mutasyon oranı kullanmanın daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Algoritma optimum noktaya yaklaştıkça yakınsama hızı azalmakta ve dolayısıyla bu aşamadan sonra mutasyon operatörünün sağlayacağı arama mekanizması, çaprazlama operatörünün sağladığı ilerlemeden daha önemi hale gelmektedir. Bir kromozomdaki mutasyona uğratılacak gen sayısı n_m aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$DegistirilecekGenSayısı = n_m = \left[\frac{m_f}{1 + \exp(-4m_g(t - m_c) / m_f)} \right] \quad (7.5)$$

- m_f : Değişken mutasyon oranının alacağı maksimum değer.
- m_c : Değişken mutasyon oranının değerinin yarısına ulaştığı andaki iterasyon adımı.
- t : İterasyon adımı (Baştan itibaren oluşturulan çocuk kromozom sayısı).
- m_g : Fonksiyonun $t = m_c$ deki eğimi.

Bu çalışmada $m_f = \text{Kromozom Uzunluğu} / 90$, $m_c = 400$, $m_g = 0.4$ kullanılmıştır ve algoritma çalışırken mutasyona uğratılacak gen sayısı değişimi aşağıdaki gibidir.



Şekil 7.5: Algoritma çalışma esnasındaki mutasyon oranı değişimi

Değiştirilecek gen sayısına karar verildikten sonra, karar verilmesi gereken bir parametre de mutasyon oranı (mutation rate) o_m dir. Mutasyona uğrıtılacak bir gen seçildiğinde o_m olasılığı ile mutasyona uğrıtılmaktadır. o_m değeri, referans [4] te belirtildiği üzere popülasyonun en sağlıklı bireyindeki 1 değerine sahip olan genlerin sayısı ile kromozomun toplam uzunluğunun oranı ile hesaplanmıştır. Örneğin kromozom uzunluğu 100 ve bunların içinden 10 tanesi 1 diğerleri 0 ise bu durumda $o_m = 10 / 100 = 0.1$ olacaktır. K mutasyona uğrıtılacak kromozom ve n kromozomdaki gen sayısı olmak üzere olmak üzere mutasyon operatörü aşağıdaki gibi çalışmaktadır.

1. $i = 1$
2. 1 den n 'e kadar rastgele bir x tam sayısı seç.
3. Eğer $x > n_m$ ise $i = i + 1$ ve 2. adıma dön.
4. 0 ile 1 arasında rastgele bir y reel sayısı seç
5. Eğer $K[i] = 0$ ve $y \leq o_m$ ise $K[i] = 1$
6. Eğer $K[i] = 1$ ve $y > o_m$ ise $K[i] = 0$
7. $i = i + 1$ ve 2. adıma dön.

7.3.7. Uygunluk Operatörü (Heuristic Feasibility Operator)

Daha önceki bölümlerde bahsedildiği üzere çaprazlama ve mutasyon operatörlerinden sonra elde edilen bir çocuk kromozomun uygun (feasible) olma garantisi yoktur. Dolayısıyla bu çalışmada [3] te belirtildiği üzere, oluşabilecek bu tip kromozomların onarılması yoluna gidilmiştir. Buna ek olarak, algoritmayı daha efektif yapabilmek için bir lokal optimizasyon adımı uygulanmıştır.

Uygun olmayan bir kromozomu uygun hale getirmek için çözüm kümesi tarafından kapsanamamış uçuşları ve bu uçuşların kapsanabilmesi için çözüm kümesine ilave edilebilecek olan ekip rotasyonlarını belirlemek gerekmektedir. Eksik olan uçuşları kapsamak üzere hangi ekip rotasyonunun çözüm kümesine ekleneceğine aşağıdaki oran ile karar verilmektedir.

$$\text{Ekip rotasyonunun maliyeti} / \text{İçerdiği kapsanamamış uçuş sayısı} \quad (7.6)$$

Kromozom uygun (feasible) hale getirildikten sonra aşırı kapsamaya sebep olan (redundant) ekip rotasyonlarının çözüm kümesi dışına alındığı bir lokal optimizasyon adımı uygulanmıştır. Bunun için çözüm kümesi dışına çıkarılsa dahi kromozomun uygunluğunun bozulmadığı ekip rotasyonları aranmaktadır. Algoritma aşağıdaki gibi çalışmaktadır.

F = Tüm uçuşların (satırların) kümesi

P = Tüm ekip rotasyonlarının (kolonların) kümesi

$\alpha_f = f$ uçuşunu kapsayan ekip rotasyonlarının kümesi, $f \in F$

$\beta_p = p$ ekip rotasyonunun kapsadığı uçuşların kümesi, $p \in P$

S = Bir çözüm kümesini oluşturan ekip rotasyonları kümesi, $S \subset P$

U = Kapsanamamış uçuşların kümesi, $U \subset F$

$w_f = f$ uçuşunu kapsayan ekip rotasyonlarının sayısı, $f \in F$ in S

olmak üzere;

1. w_f için ilk değerleri $w_f = |S \cap \alpha_f|, \forall f \in F$ olarak ayarla.
2. U için ilk değerleri $U = \{f \mid w_f = 0, \forall f \in F\}$ olarak ayarla.
3. U kümesi içindeki her f için:
 - a. $c_p / |U \cap \beta_p|$ oranını minimize eden ilk $p \in \alpha_f$ ekip rotasyonunu bul.
 - b. $S = S + p; w_f = w_f + 1, \forall f \in \beta_p; U = U - \beta_p$
 - c. $w_f = w_f + 1, \forall f \in \beta_p$
4. S kümesi içindeki her ekip rotasyonu p için
 - a. Eğer $w_f > 1, \forall f \in \beta_p$ ise $S = S - p; w_f = w_f - 1, \forall f \in \beta_p$

Algoritmada 1. ve 2. aşamalarda kapsanamayan uçuşlar belirlenmekte. 3. aşamada kromozom uygun hale getirilmekte ve 4. aşamada ise aşırı kapsamaya sebep olan ekip rotasyonları çözüm kümesinden çıkarılmaktadır.

7.3.8. Kromozom İyileştirme Operatörü (Enhancement Operator)

Bu çalışmada, diğerlerinden farklı olarak, kromozom uygunluk operatörünü takiben çalıştırılmak üzere bir kromozom iyileştirme operatörü uygulanmıştır. Bu operatörde, öncelikle çözüm kümesi içindeki bir veya daha fazla ekip rotasyonu kümeden çıkartılarak kromozom uygun olmayan (infeasible) hale getirilir ve ardından uygunluk operatörüne benzer şekilde, kaldırılan ekip rotasyonu yerine konabilecek maliyeti düşüren bir veya birden fazla alternatif ekip rotasyonu olup olmadığı kromozom üzerinde aranır. Kromozom uygun olmayan hale getirildiği için bu işlem bir nevi bozuntu (perturbation) tekniği olarak düşünülebilir. Eğer arama başarılı ise alternatif olan ekip rotasyonları çözüm kümesi içine alınır, arama başarısız olur ise kromozom ilk durumdaki haline getirilir. Arama işlemi, kromozom uygunluk operatöründeki gibi “Ekip rotasyonunun maliyeti / İçerdiği kapsanamamış uçuş sayısı” oranı kullanılarak gerçekleştirilmektedir. İterasyon aşağıdaki gibi çalışmaktadır.

F = Tüm uçuşların (satırların) kümesi

$\alpha_f = f$ uçuşunu kapsayan ekip rotasyonlarının kümesi, $f \in F$

$\beta_p = p$ ekip rotasyonunun kapsadığı uçuşların kümesi, $p \in P$

S = Bir çözüm kümesini oluşturan ekip rotasyonları kümesi, $S \subset P$

U = Kapsanmamış uçuşların kümesi, $U \subset F$

C = Kromozomun ilk durumdaki ürettiği maliyet değeri

C' = Kromozomun son durumdaki ürettiği maliyet değeri

L = Kromozomu uygun hale getiren ekip rotasyon kümesi

olmak üzere;

1. Kromozom için ilk maliyet değeri C yi hesapla
2. S kümesi içindeki her p için
 - a. $S = S - p$; $U = U + \beta_p$
 - b. U kümesindeki her f için
 - i. $c_{p'}/|U \cap \beta_{p'}|$ oranını minimize eden ilk $p' \in \alpha_f, p' \neq p$ ekip rotasyonunu bul.
 - ii. $S = S + p'$; $L = L + p'$; $U = U - \beta_{p'}$,
 - c. C' yeni kromozom maliyetini hesapla
 - d. Eğer $C \leq C'$ ise $S = S - L$; $S = S - p$
 - e. Eğer $C > C'$ ise $C = C'$
 - f. L ve U kümelerini boşalt.

Bu operatör, üretilmiş olan çocuk popülasyonundaki rastgele seçilen bir kromozoma, uygunluk operatörünü takiben uygulanmaktadır. Ve test sonuçlarında da görüleceği üzere bu operatörün uygulanması sayesinde, çok daha az iterasyon ile çok daha iyi noktalara ulaşılmaktadır ve aynı zamanda genetik algoritmanın rastlantısal doğasına rağmen her çalıştırmada istikrarlı sonuçlar elde edilebilmektedir.

Ayrıca 2 aşamasında, tek bir ekip rotasyonu kullanarak kromozomu iyileştirme operasyonu yapmak yerine, ekip rotasyonlarının 2 li ve 3 lü kombinasyonlarının kullanılması da denenmiştir. Fakat ekip rotasyonlarının 2 ve üstü kombinasyonlarının aranması çözüm süresini çok fazla arttırmaktadır. Bunun yerine bu operasyonu, genetik algoritmanın bitimini takiben elde edilen en iyi kromozom üzerinde uygulamak, çözüm süresini de çok etkilemeden, bazı durumlarda sonucu daha da iyiye götürebilmektedir.

7.3.9. Uygunluk Fonksiyonu (Fitness Function)

Bir kromozomun ne kadar sağlıklı ve uygun bir çözüm kümesi olup olmadığı uygunluk fonksiyonu ile hesaplanmaktadır. Bu çalışmada kullanılan uygunluk fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

c_{p_i} : i. ekip rotasyonunun maliyet değeri

g_i : 1 ise i. ekip rotasyonunun çözüm kümesi içinde 0 ise dışındadır

c_{f_j} : j. uçuşun maliyet değeridir.

d_{f_j} : j. uçuşun pas sayısıdır.

c_k : k. ikamet merkezine ait ekip rotasyonlarının toplam maliyeti

c_t : Ekip rotasyonlarının toplam maliyeti

e_k : k. ikamet merkezinde ikamet eden ekip sayısı

e_t : Toplam ekip sayısı

p_d : Pas ceza katsayısı

olmak üzere;

$$UygunlukDeğeri = \sum_i c_{p_i} g_i + \sum_j c_{f_j} d_{f_j} p_d + \sum_k c_k \left| \left(\frac{c_k}{c_t} \right) - \left(\frac{e_k}{e_t} \right) \right| \quad (7.7)$$

Uygunluk fonksiyonundaki maliyet terimleri bölüm 3 te de bahsedildiği üzere toplam süreyi (görev + dinlenme) ifade etmektedir ve dolayısıyla optimizasyon işlemindeki amaç toplam sürenin minimize edilmesidir. Ve fonksiyondan da görüleceği üzere eşitlikteki ilk ifade, çözüm kümesi içindeki ekip rotasyonlarının toplam maliyetini vermektedir. İkinci ifade, pas durumundaki, yani birden fazla ekip rotasyonu tarafından kapsanmış olan uçuşların toplam maliyetini ifade etmektedir. Burada ayrıca, uygunluk fonksiyonunda pas maliyeti için p_b gibi bir ceza katsayısı uygulanmıştır. Bunun sebebi, pas uçuşlarda, ekip elemanlarının uçakta işgal ettikleri koltuklardan dolayı ortaya çıkan gelir kaybının, normal uçuş maliyetinin üzerinde hesaplanmasının gerekliliğidir. Bu çalışmada $p_d = 3$ olarak alınmıştır. Uygunluk fonksiyonundaki son ifade ise ekiplerin ikamet merkezlerine göre dağılımındaki sapmayı ifade etmektedir. İkamet merkezlerinde bulunan ekip sayıları oranına göre iş dağılımı yapmak ekiplerin verimli kullanımı ve fazla mesai maliyeti açısından önemli bir konudur.

7.3.10. Populasyon Yenileme (Population Replacement)

Genetik algoritmadaki her iterasyonun son adımı populasyon yenileme aşamasıdır. Bu aşamada genetik operatörler ile üretilen ve iyileştirilen yeni çocuk kromozomların nasıl kullanılacağına karar verilmektedir. Bu çalışmada elitist yaklaşım kullanılmıştır ve aşağıdaki gibi çalışmaktadır.

1. Çocuk populasyon ile ebebeyn populasyon bir araya toplanır.
2. Uygunluk fonksiyonlarına göre dizilir.
3. En iyi ilk 20 birey bir sonraki round için saklanır kalanlar ise atılır.

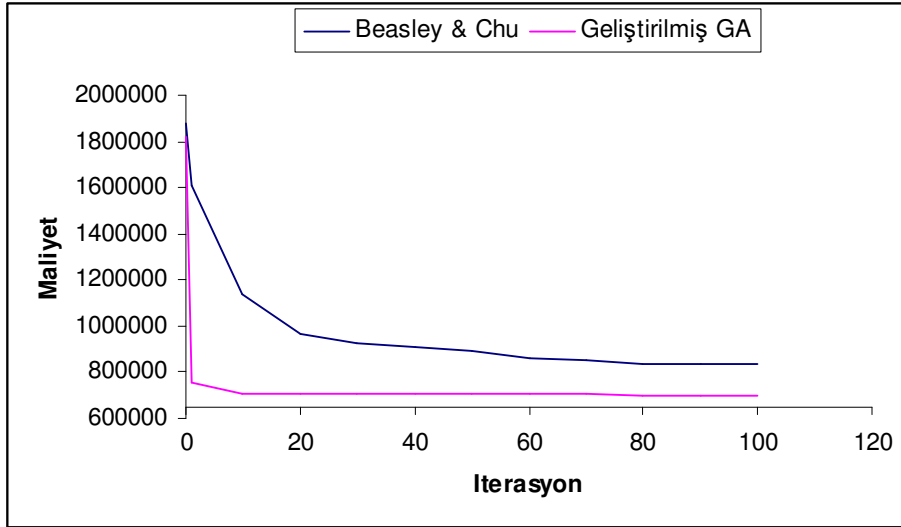
Elitist strateji dışında, tüm çocukların tüm ebebeynler ile doğrudan yer değiştirildiği nesilsel yaklaşım (generational approach) ve her çocuk kromozomun uygunluk derecelerine göre rastgele seçilen bir ebebeyn ile yer değiştirildiği steady-state yaklaşım da test edilmiştir. Fakat elitist yaklaşımın daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

8. DENEYSEL SONUÇLAR

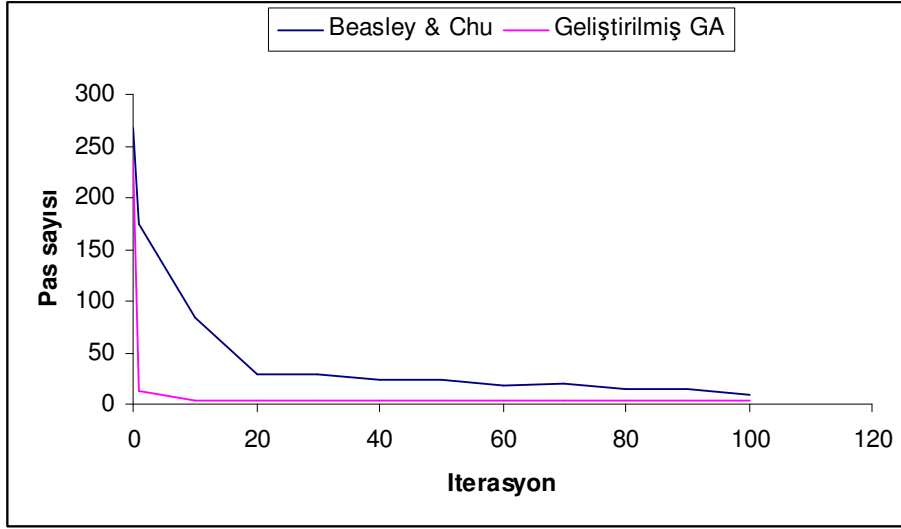
Bu çalışmada test amaçlı kullanılan uçuş verisi, mart ve nisan aylarındaki THY tarifesinden alınmıştır ve [14] referansından elde edilebilir. Sunulan test sonuçları, 714 uçuşa sahip olan 310 filosu için üretilmiş ve AMD Athlon 64 1.8 MHZ işlemcili bir makinede Java NetBeans platformunda çalıştırılmıştır. Tek merkezli ve iki merkezli olmak üzere üretilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

8.1. Tek Merkezli

Tek merkezli çalışmada, tüm ekip elemanlarının sadece İstanbul'da (IST) ikamet ettikleri varsayılarak hareket edilmiştir. Dolayısıyla burada sadece IST merkezli olmak üzere 3646 adet ekip rotasyonu üretilmiştir. Ve merkezler arası dağılım yapılmadığı için ekip dağılım maliyeti sıfır olmaktadır. Sırasıyla [3] referansındaki çalışma ve tarafımızca iyileştirilen genetik algoritma sonuçları aşağıdaki gibidir. Görüleceği üzere geliştirilmiş GA çok daha az iterasyon ile ve çok daha kısa zamanda optimum noktaya yakınsayarak yaklaşık dört kat daha iyi performans sağlamaktadır. Tek merkezli çözümde, ilk 100 iterasyon için maliyet ve pas uçuş sayısı değişimleri grafiksel olarak aşağıdaki gibidir.



Şekil 8.1: Tek merkezli çözümde maliyet değişimi



Şekil 8.2: Tek merkezli çözümde pas sayısı değişimi

Tek merkezli çözümde, çeşitli anlardaki iterasyon değerleri aşağıdaki gibidir

Tablo 8.1 : Tek merkezli optimizasyon sonuçları

İterasyon	<i>Beasley & Chu</i>					<i>Geliştirilmiş GA</i>				
	Ekip Rotasyon Sayısı	Uçuş Sayısı	Pas Sayısı	Maliyet	Süre (sn)	Ekip Rotasyon Sayısı	Uçuş Sayısı	Pas Sayısı	Maliyet	Süre (sn)
0	218	978	268	1876450	0	210	944	234	1824645	0
1	236	884	174	1609240	0	333	722	12	758335	0
10	282	794	84	1134275	0	335	714	4	707315	0
20	286	740	30	964915	0	333	714	4	702690	0
30	299	740	30	924505	1	333	714	4	702690	0
40	298	734	24	908395	1	333	714	4	702690	0
50	301	734	24	894455	1	332	714	4	702285	1
60	308	728	18	864065	1	331	714	4	701880	1
70	312	730	20	854640	1	331	714	4	701880	1
80	315	724	14	837955	2	335	714	4	697125	1
90	315	724	14	837955	2	332	714	4	695790	1
100	316	720	10	833200	2	331	714	4	695385	1
200	319	720	10	804050	4	329	714	4	694510	3
300	316	714	4	773985	5	320	714	4	690525	5
400	315	714	4	768130	7	316	714	4	688305	7
500	314	714	4	761120	8	311	714	4	685730	9
800	312	716	6	750030	13	302	714	4	682555	14
1000	308	716	6	731805	16	299	714	4	681525	18
1500	303	714	4	718470	24					
2000	299	714	4	708150	31					
3000	300	714	4	696790	46					
4000	298	714	4	686550	61					
5000	298	714	4	686550	76					

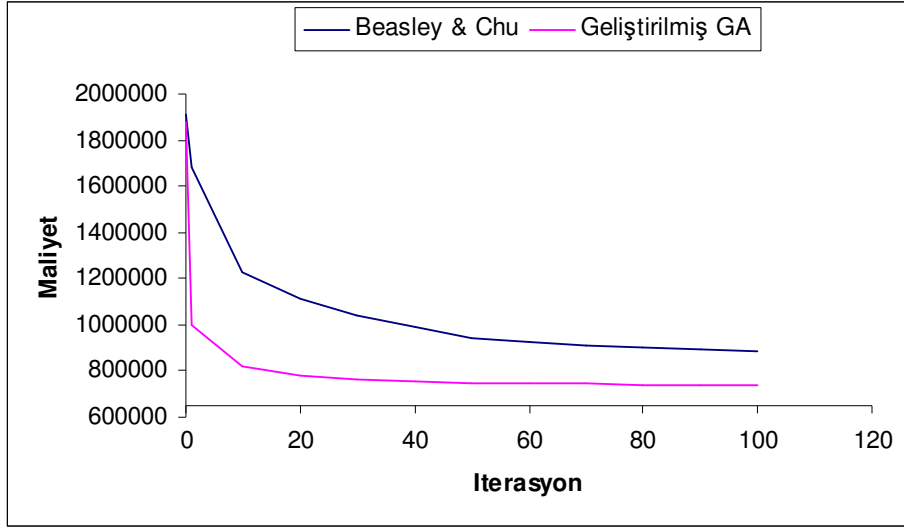
8.2. Çok Merkezli

Çok merkezli çalışmada ise ekip elemanlarının 5 / 6 sınıfın İstanbul'da (IST), geriye kalan 1 / 6 sınıfın ise Ankara'da (ESB) ikamet ettikleri varsayılarak hareket edilmiştir. Dolayısıyla burada IST ve ESB merkezli olmak üzere 8500 adet ekip rotasyonu üretilmiştir. Tek merkezli çalışmadan farklı olarak $20 * \text{Ekip Merkez Sayısı}$ formülü gereği 40 kromozumlu bir populasyon kullanılmıştır. Ve yine sırasıyla [3] referansındaki çalışma ve tarafımızca geliştirilen genetik algoritma sonuçları aşağıdaki gibidir.

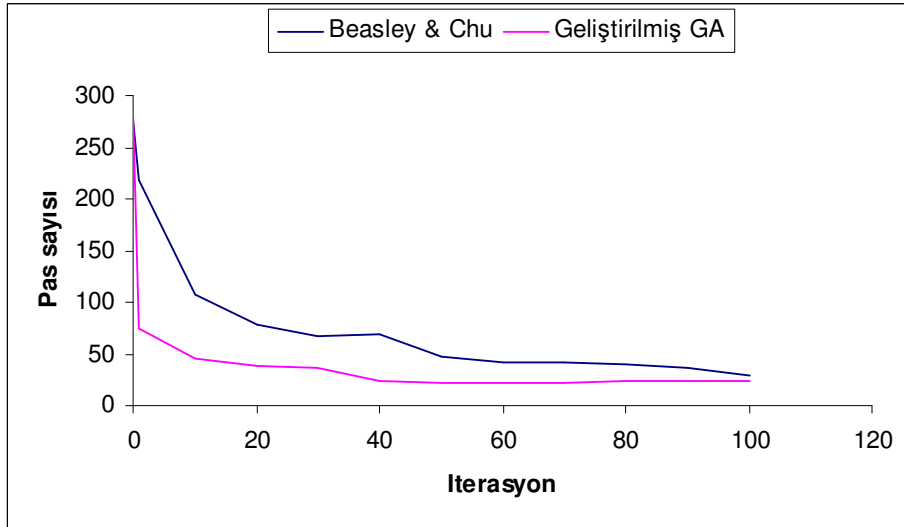
Tablo 8.2 : İki merkezli optimizasyon sonuçları

İtr	<u>Beasley & Chu</u>						<u>Geliştirilmiş GA</u>					
	Ekip Rot. Sayısı	Uçuş Sayısı	Pas Sayısı	Ekip Dağılım Maliyeti	Maliyet	Süre (sn)	Ekip Rot. Sayısı	Uçuş Sayısı	Pas Sayısı	Ekip Dağılım Maliyeti	Maliyet	Süre (sn)
0	211	986	276	16384	1912669	0	209	992	282	61335	1874065	0
1	231	928	218	19702	1684947	0	293	784	74	1826	998591	0
10	280	818	108	5315	1225515	1	320	756	46	617	821517	1
20	285	788	78	18271	1114521	2	325	748	38	313	777228	2
30	290	778	68	7565	1036810	2	325	746	36	784	761984	2
40	296	780	70	569	988289	3	315	734	24	639	752684	3
50	297	758	48	5450	938220	4	317	732	22	4552	750022	4
60	297	752	42	10199	928904	4	315	732	22	1972	747217	5
70	298	752	42	93	913288	5	315	732	22	971	742706	5
80	299	750	40	7866	904181	6	317	734	24	226	742266	6
90	299	746	36	1794	891004	6	317	734	24	226	742266	7
100	299	740	30	1986	882031	7	318	734	24	147	741512	8
200	304	736	26	87	855957	14	317	730	20	118	730838	15
300	302	730	20	1911	841361	21	313	728	18	114	728334	21
400	301	728	18	485	827675	28	310	724	14	246	722906	29
500	298	726	16	795	822975	35	308	726	16	459	721659	36
800	301	732	22	501	814506	55	297	724	14	408	717323	59
1000	297	730	20	24	809159	69	295	724	14	131	715725	74
1500	293	732	22	122	795282	104						
2000	291	726	16	136	785501	138						
3000	282	722	12	431	760366	208						
4000	282	722	12	171	744531	277						
5000	283	722	12	591	743711	348						

Çok merkezli çözümde, ilk 100 iterasyon için maliyet ve pas uçuş sayısı değişimleri grafiksel olarak aşağıdaki gibidir.



Şekil 8.3: İki merkezli çözümde maliyet değişimi



Şekil 8.4: İki merkezli çözümde pas sayısı değişimi

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada havayolu ekip planlama sürecinin ilk ve maliyetlerin büyük ölçüde belirlendiği aşama olan ekip rotasyon optimizasyonu konusunda var olan bazı çalışmalar incelenmiş ve özellikle çok merkezli çözüm ile genetik algoritmanın daha da sağlam ve efektif çalışması konusunda geliştirmeler yapılmıştır. Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere yapılan iyileştirme ile genetik algoritmanın çok daha sağlam (robust) çalışması sağlanmış ve yakınsama hızı oldukça yükseltilmiştir.

Bu çalışma aynı zamanda ekip planlama sürecinin ikinci aşaması olan ekip atama (crew rostering) aşaması için de bir ön çalışma mahiyetindedir. Çünkü ekip atama sürecinin başarısıda tamamen ekip rotasyon aşamasında üretilen ekip rotasyon kümelerinin kalitesine bağlıdır.

Algoritmanın daha da efektif hale gelebilmesi, daha büyük populasyonlar kullanılarak sağlanabilir. Fakat bu durumda artan işlem yükü sebebiyle, çözüm süresi de artmaktadır. Algoritmada çözüm süresini arttırmadan daha büyük populasyonlar kullanabilmek için dağıtık (distributed) genetik optimizasyon konusu, ileriki aşamalarda çalışılabilecek iyi bir alternatif olabilir. Ve aynı zamanda küme kapsama problemleri konusunda iyi performans değerleri yayınlayan [11] referanslı çalışma da değerlendirilmesi gereken bir çalışmadır.

10. KAYNAKLAR

- [1] <http://www.shgm.gov.tr/doc3/sht6a50.doc>
- [2] **Claude P. Medard, Nidhi Sawhney**, 2005. Airline crew scheduling - from planning to operations. Technical report, Carmen Systems AB. http://www.carmen.se/research_development/research_reports.htm
- [3] **Beasley J. E., Chu P. C.**, 1996. A Genetic Algorithm for the Set Covering Problem, *European Journal of Operational Research*, **94**:392–404.
- [4] **Harry Kornilakis, Panagiotis Stamatopoulos**, 2002. Crew Pairing Optimization with Genetic Algorithms. *Lecture Notes In Computer Science* **2308**:109-120.
- [5] **H. Timucin Ozdemir, Chilukuri K. Mohan**, 2001. Flight graph based genetic algorithm for crew scheduling in airlines. *Information Sciences* **133**:165-173
- [6] **F. M. Zeghal, M. Minoux**, 2004. Modeling and solving a Crew Assignment Problem in air transportation. *European Journal of Operational Research*, **175**:187–209.
- [7] **Mitsuo Gen, Runwei Cheng**, 2000. *Genetic Algorithms and Engineering Optimization*. Wiley-Interscience.
- [8] **J.H.Holland**, 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. MIT Press.
- [9] **Cynthia Barnhart, Amy M. Cohn Ellis L. Johnson, Diego Klabjan George L. Nemhauser, Pamela H. Vance**, 2003. *Handbook of Transportation Science*. Springer.
- [10] **Luis Francisco Gonzales Hernandez**, 1995. Evolutionary Divide and Conquer for the Set-Covering Problem. *Lecture Notes In Computer Science* **1143**:198-208.
- [11] **Uwe Aickelin**, 2002. An Indirect Genetic Algorithm for Set Covering Problems, *Journal of the Operational Research Society*. **53**:1118-1126
- [12] http://en.wikipedia.org/wiki/Delayed_column_generation
- [13] http://en.wikipedia.org/wiki/Depth-first_search
- [14] http://www.thy.com/tr-TR/online_services/schedule/time_table.aspx

11. ÖZGEÇMİŞ

Bahadır Zeren 1978 yılında İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini sırasıyla Fatih Gazi İlköğretim Okulu, Çapa Ortaokulu ve Şehremini lisesinde tamamladı. 1996 yılında İTÜ Uçak Mühendisliği Bölümüne girdi ve 2001 yılında mezun oldu. 2004 yılında ise İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Uçak ve Uzay Mühendisliği Disiplinlerarası Programında Yüksek Lisans öğrenimine başladı.