



HAVAYOLU EKİP ROTASYON OPTİMİZASYONU İÇİN GENETİK ALGORİTMA KULLANIMI*

GENETIC ALGORITHM APPLICATION FOR CREW PAIR OPTIMIZATION IN AIRLINE CREW PLANNING

Mücahit Taha AZ¹

Berk AYVAZ²

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1109524>

Sorumlu Yazar / Corresponding Author
mucahittahaaz@gmail.com

Geliş Tarihi / Received
27.04.2022

Kabul Tarihi / Accepted
02.08.2022

Öz

Bu çalışmada, havayolu şirketlerinin en büyük gider kalemlerinden biri olan ekip planlama konusu ve bu sürecin ilk adımı olan ekip rotasyonlarının üretimi için genetik algoritmalar ile bir optimizasyon algoritmasının geliştirilmesi ele alınmıştır. Ekip planlama konusu havayolu şirketlerinin yakıt maliyetlerinden sonraki en büyük gider kalemidir. Ayrıca bu konu havacılık kanun ve yönetmeliklerinde yer alan kısıtlardan dolayı personellerin kullanım oranını da etkilediğinden şirketlerin bünyesinde yer alan personellerin verimli kullanımı da ekip planlaması yapılırken etkilenen önemli bir parametredir. Çalışmada ekip rotasyonu optimizasyonu konusunda literatürdeki çalışmalar incelenmiş ve pas uçuş sayısının azaltılmasıyla maliyetin minimize edilmesi konusunda geliştirilmeler yapılmıştır. Çalışmada literatürde var olan genetik algoritma operatörleri geliştirilerek daha optimize sonuçlar elde edilmiştir. Daha önce bu konuda hazırlanmış olan çözümlerin sonuçları ile karşılaştırmalar yapılmış ve değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Havayolu ekip planlama, ekip rotasyonu, genetik algoritmalar, optimizasyon, sezgisel metotlar.

Abstract

In this study, it is addressed the airline crew scheduling problem which is one of the biggest cost elements for airline companies and to develop a new method with genetic algorithms to generate crew pairings which is the first part of airline crew scheduling with better optimization. Crew scheduling topic is the biggest cost element for the airline companies after the fuel costs. Also this topic relates to worker efficiency parameter, which is one of the most important parameters for airline companies, due to its constraints about worker usage which are written on civil aviation laws. In this study, previous works about crew pairing optimization examined and upgrades developed for the cost reduction with minimizing the number of deadhead flights. Genetic algorithm operators existing in the previous studies have been upgraded and better results provided with new improved operators. Methods and the results were compared with the previous work about the topic.

Keywords: Airline crew scheduling, crew pairing, genetic algorithms, optimization, heuristic methods.

*Bu yayın Mücahit Taha AZ isimli öğrencinin İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Programındaki Lisansüstü tezinden üretilmiştir.

¹İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye.
mucahittahaaz@gmail.com, Orcid.org/0000-0002-0292-4210.

²İstanbul Ticaret Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Küçükyalı, İstanbul, Türkiye.
bayvaz@ticaret.edu.tr, Orcid.org/0000-0002-8098-3611.

1.GİRİŞ

Havayolu ekip planlama problemi, havayolu planlama problemlerinin en karmaşık ve kapsamlı olanlarından biridir. Havayolu firmalarındaki personel maliyetleri, yakıt giderlerinin ardından en büyük gider kalemini oluşturmaktadır. Bu maliyetin kontrol edilerek optimize şekildeki çözülmesi, havayolu şirketleri için giderek daha unsur haline gelmiştir.

Konu ile ilgili ilk çalışmalar 1960'lı yılların başında ortaya çıkmaya başlamıştır. Problem yöneylem araştırması alanında yer alan farklı metotlar ile çözülmeye çalışılmıştır. İlerleyen yıllarda gelişen teknolojinin yardımı ile çözüm süreleri azaltılmış, yeni yöntemler geliştirilmiştir.

Havayolu planlama problemleri kendi içinde birçok farklı alt bölüme ayrılmaktadırlar. Uçuş, stok, bakım, ekipman giderleri ve ekip eğitimlerinin planlaması bunlara örnek olarak gösterilebilir. Her planlama probleminin kendine özel ve karmaşık olan kuralları, belirlenmiş olan bir zaman periyodu ve amacı bulunmaktadır.

Ekip planlama problemlerinin farklı problemlerinden biri olan uçuş görevleri oluşturma kısmı incelenirse, büyük ölçekteki bir havayolu firması bir kalkış noktasından binlerce farklı varış noktasına uçuş yapabileceğinden milyonlarca farklı uçuş görevi ortaya çıkabilmektedir. Bu da ortaya çok fazla çözümü olabilen karmaşık bir problem çıkarmaktadır.

Problemin amacı, firma bünyesinde çalışmakta olan farklı vasıflara sahip uçuş mürettebatının, havayolu şirketinin planlamış olduğu uçuş programında eksiksiz şekilde atanmasını sağlamaktır. Uçuş maliyetine doğrudan etki eden bu problemin çözümü havayolu firmaları için yüksek öneme sahiptir. Problem Ekip Rotasyon ve Ekip Atama biçiminde iki ayrı kısımdan oluşmaktadır. Bu çalışmada Ekip Rotasyon kısmının çözülmesi üzerine yeni bir çözüm yöntemi önerilmiştir. Ekip rotasyon aşamasında havayolu firmasının uçuş çizelgesinde yer alan her uçuşun en az bir kapsanmasını sağlarken maliyeti minimize eden Ekip Rotasyonları kümesinin bulunmasını hedeflenir. Bu problemin ardından gelen Ekip Atama problemi ise Ekip Rotasyonunda belirlenmiş olan rotasyonlara ihtiyaç kadar sayıda mürettebatın atanmasını içerir.

Genetik algoritmalar, Darwin'in doğal seçim prensibini temel alan, biyolojik sistemlerin yaşam döngüsünü simüle eden, arama tarama algoritmalarıdır. Genetik algoritmalar sezgisel metotlardan biridir. Sezgisel metotlar verilen bir problem için en iyi çözüm garantisi veremezler. Ancak mevcut metotlar aşırı büyük problemlerin çözümünü bulamadığında ve çok yüksek çözüm sürelerine sebep olduğunda, bu duruma karşılık olarak en iyiye yakın çözümleri kısa sürede sunabilmektedirler.

Bu çalışmada ele alınan problemin çözümünde genetik algoritmalar kullanılarak, havayolu ekip planlama probleminin ekip rotasyonu bölümü için bir yeni çözüm önerilmiştir. Çözümde literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak yeni bir kromozom iyileştirme operatörü kullanılmıştır. Bu geliştirilmiş yeni operatör ile daha düşük maliyetli çözümler bulunması amaçlanmaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Konu hakkında literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Konuyla ilgili ilk çalışmalara 1960'lı yıllarda başlanmıştır. Bu konu üzerine yapılan ilk çalışmaların biri (Arabeyre ve ark., 1969) çalışmalarıdır. Çalışmada dünyanın önde gelen havayolu firmalarının kabin ekiplerini planlarken ve uçuşlara atarken tercih ettikleri yöntemleri, bakış açılarını, optimizasyon için kullandıkları

farklı teknikler üzerine bilgiler paylaşılmış, çalışmanın döneminde var olan çözümlerin problemi kesin bir çözüme kavuşturamadığı üzerine durulmuştur.

IBM TPAC programının temelini olan çalışmayı yapan Rubin, bu çalışmasında (Rubin, 1973) ilk çözümü bulmaya çalışırken yerel bir optimizasyon stratejisi tercih etmiştir. Mevcut yer alan yasal kısıtların problem setini kısıtlamada yeterli olmadığını, problem setinin kısıtlanmadığı bu durumda problem setinin yönetilebilecek bir küçülmeye ulaşmadığını, bu küçülmenin sağlanması için eklenen yapay kısıtların da problem çözülürken ortaya çıkan uygun çözümlerden bazılarının reddedilmesine neden olduğu fikrini ortaya atmıştır. Ortaya çıkan bu durumu çözmek için önce problemi çok sayıda küme kapsama problemine bölmeyi, ardından da problemin çözümünde herhangi bir algoritma kullanarak ana problemin sonucuna göre ufak iyileştirmeler elde edebileceğini söylemiştir.

Etschmaier & Mathasiel (1985) yaptıkları çalışmada 1985'e kadar ortaya koyulmuş olan çalışmalardan, çalışmalarda yer alan bilgisayar – insan ilişkisinden, yönelem araştırmalarının bu konudaki yerinden bahsetmişlerdir. Geçmiş yıllarda yaşanmış olan yakıt krizi gibi olayların etkisi ile uçuş planlama felsefesinde büyük değişiklikler yaşandığını açıklamışlardır. Sektördeki yaşanan süre süratteki değişimden dolayı uçuş ajandalarının uzun zaman önceden hazırlanması durumunun ortadan kalktığını, yolcular isteklerinin etkisiyle uçuşların zaman ve mekan değişikliğine uğrayacağına, firmaların artık filolarını bir arada tutabileceği bir merkeze ihtiyacı olduğundan bahsetmişlerdir. Şirketlerin yeni uçaklar satın alırken günümüze göre değil geleceğe göre satın alım yapmaya başladığını söylemişlerdir. Bu faktörlerin etkisiyle havayolu planlama konusunda yeni bir dönemin başladığını açıklamışlardır.

Anbil ve ark. (1992) TRIP sisteminin Kuzey Amerika'da yer alan bir havayolu firması tarafından kullanımında yaşanan, sistemin daha iyi çözümleri yok sayması durumu üzerine, bu kaliteli çözümlerin sisteme nasıl entegre edilebileceği hakkında bir model hazırlamışlardır. En başta yüksek miktarda eşleşme üreterek, devamında da eşleşmelerin her biri için bir sütun üreterek doğrusal programlama ile çözüm yapmışlardır. Böylece TRIP sisteminin sorun yaşadığı yerel optimizasyon mantığının önüne geçmeyi amaçlamışlardır. Bu yeni metodolojinin büyük problemlerin çözümünde önemli bir ilerleme imkanı sunduğunu belirtmişlerdir.

Graves ve ark. (1993) çalışmalarında dinlenme süreleri, konaklama ve ek mesai giderlerini azaltmak amacıyla iki aşamalı bir optimizasyon metodu geliştirmişlerdir. Bu çalışmada veri olarak ABD'de yer alan havayolu şirketlerinin orta ve büyük seviyedeki problemlerini incelemişlerdir. Metodolojide üretici ve iyileştirici adını verdikleri iki ayrı aşamada çözüm yapmışlardır. Metodoloji tam sayılı küme bölüntüleme yöntemi ile en düşük maliyete ulaşmak üzerine kurulmuştur.

Teodorovic & Stojkovic (1995) ekip ataması ve uçak rotalama probleminin bir araya getirerek bu konuda bir ilki ortaya atmışlardır. Çalışmalarında geliştirdikleri çok amaçlı model havayolu firmalarında yaşanan aksamaların azaltılmasını amaçlamaktadır. Aksamalar birçok farklı sebepten dolayı ortaya çıkabilmektedir. Aksama durumunda planlama sorumlusunun aksamaların yol açtığı olumsuz etkiyi minimize etmek amacıyla hızlı kararlar alması beklenmektedir. Çalışmanın ilk amacı gerçekleştirilen uçuş sayısını en yüksek düzeyde tutmak, diğer amaç ise uçuşun iptal olmadığı durumlarda yolcuların zaman kaybını minimize etmektir. Bu modelde oluşturulan rotalarda ilk giren ilk çıkar kuralı tercih edilmiştir.

Rushmeier ve ark. (1995), filo atamasında yer alan çözümler hakkında açıklamalar yapmışlar ardından da ekip rotasyonlarının optimize edilmesinde kullanılan kısıtlardan bahsetmişlerdir. Coldstart ve Warmstart adlı filo ataması çözümlerinin farklarını açıklamışlardır. Pas uçuşların ekip atamasında minimize edilmesi konusunda bilgiler paylaşmışlardır. Mevcut optimizasyon

sistemlerinin en büyük eksiği olarak ekip ve filo atamalarının birbiriyle bağlantısını kurarken yetersiz kalması fikrinden bahsedilmiştir.

Ernst ve ark. (2004), özet olarak hazırladıkları çalışmalarında çizelgeleme ve personel atama problemlerinden bahsetmişlerdir. Personel çizelgelerinin optimize edilmesi ile büyük faydalar elde edilebileceği fikrini ortaya atmışlardır. Çalışmada 'belediye ve kamu hizmetleri', 'ticaret' ve 'üretim' gibi farklı alanlar ele alınmıştır ve çözümlerde de metot olarak 'matematiksel programlama', 'kısıt programlama', 'talep modelleme' gibi yaklaşımlar tercih etmişlerdir.

Elhabashy ve ark. (2004), genetik algoritmalar ile Mısır'daki bir havayolu firmasının kokpit ekibi atama probleminin çözümünü için bir metodoloji hazırlamışlardır. Uçağın hareketinden sorumlu olan pilot ve yardımcı pilotlar kabin ekibini oluşturmaktadırlar. Çalışmada kullanılan metodoloji iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşama ekip eşleşmelerinin hazırlandığı aşamadır. Bu aşamada kullanılan algoritma enine arama algoritmasıdır. Bir sonraki aşamada ise eşleşmelerin optimize edilmesi amacıyla literatürde yer alan farklı genetik operatörler denenmiş ve sonuçlar arasında kıyaslama yapılmıştır.

Gopalakrishnan & Johnson (2005), Avrupa ve ABD'deki havayolu firmalarındaki uçuş ve kabin ekibi planlamaları arasındaki farkları kıyaslamışlar, havacılık terimleri ve temel havacılık kurallarından bahsetmişlerdir. Doğrusal programlama ve tam sayılı programlama gibi modelleri kıyaslamışlardır. Yapılmış olan modellerin dayanıksızlığından dolayı kısıtlarda yaşanan ufak bir değişimin bütün modelin yapısında bozulmalara sebep olabileceği ve optimal çözümden uzaklaşmaya sebep olacağını fikrini belirtmişlerdir. Ekip üyelerinin uyku kaybı ve uyku düzeninin sürekli değişmesinden dolayı uzun vadede ortaya çıkabilecek yorgunlukların göz önünde bulundurulması gereken bir durum olduğunu söylemişlerdir.

Medard & Sawnhey (2007), ekip eşleştirme ve atama problemini ilk planlama aşamasından operasyonlar adımına kadar açıklamışlardır. Problemlerin açıklamasını yaparken üç ayrı seviyeye bölmüşlerdir. Birinci seviyede kapsanması gereken uçuşlar, ikinci seviyede ilgili ekip eşleşmelerinin hazırlanması, son seviye ise bu eşleşmelerin optimal biçimde uçuşlara atanması konuları yer almaktadır. Planlama ve atama problemlerinin çözümü dışında ekip kurtarma problemi hakkında bilgi verilmiştir. Ekip kurtarma probleminin sebebi yukarıda belirtilen üç aşamasının herhangi birinde yaşanan aksamalardır. Aksamaların ardından ortaya çıkan illegal eşleşmelerin, hatalı atamaların düzeltilmesi, mevcut ve yeni üretilen tüm uçuşların kapsanması ekip kurtarma probleminin kapsamına girer. Çalışmada ekip kurtarma probleminin çözümü için tam sayılı bir çözüm metodu önerilmiştir.

Zeren (2007) çalışmasında genelde tercih edilen ekip rotasyonu maliyetini minimize eden amaç fonksiyonları yerine ekip rotasyonları sürelerinin toplamını minimize etmeyi amaçlayan bir fonksiyon kullanmıştır. Uçuşlardaki ekip ihtiyaçları için ekip rotasyonlarının atamasını yaparken sütun temelli genetik algoritma ile küme kapsama problemi çözümü yapmıştır. Çalışmasında branch and bound yerine genetik algoritma kullanmasının temel sebebi, genetik algoritmaların daha kesin sonuçlar veremese de çözüm süresi olarak büyük ölçekli problemlerde çok daha hızlı olmasıdır.

Aydemir (2008) ekip eşleme probleminin çözümü için üç farklı yaklaşım önermiştir. Birinci yaklaşımı rastgele üretimli en iyileme algoritmasıdır. Başlangıçta kısıtlara uygun olan aday uçuşların üretilmesi, ardından da bu üretilen uçuşlardan rastgele biçimde seçim yapılması ile çözüm tamamlanmış olur. İkinci yaklaşımda ise genetik algoritmalar ile bir çözüm yapmıştır. Bu metodu kullanırken, ekip eşleme problemi için özel olarak hazırlanmış bir çaprazlama operatörü kullanmıştır. Böylece bütün kısıtları sağlayan ekip eşleşmelerini ortaya çıkararak düzeltilmeye ihtiyaç duymayan çözümler bulunmuştur. Sonucu yaklaşım ise karma sütun üretmedir. Bu

metodolojiyi Çankaya & Arıkan (2009) çalışmasına benzer şekilde küme kapsama ve en kısa yol problemi olarak iki aşamada açıklamıştır. Önerdiği üç yaklaşımı da iki farklı veri setiyle test etmiştir. Maliyet olarak en başarılısı karma sütun üretme yaklaşımı çıkmıştır anca genetik algoritma tabanlı yaklaşımda bulunan değerler ile önerdiği modelin değerleri arasında büyük bir fark yoktur. Genetik algoritma çözüm süresi olarak çok daha hızlı olduğu için bu çalışmasının sonucunda önerilmiştir.

AhmadBeygi ve ark. (2009) çalışmalarında, ekip çizelgeleme problemlerindeki uygun ekip eşleşmelerinin hazırlanması hakkında bir çözüm sunmuşlardır. Bu çalışmayı yaparken tam sayılı programlama yaklaşımını uygulamışlardır. Çalışmada önerilmiş olan bu metot kullanım kolaylığı ve etkin çözümlere kısa sürede ulaşmaktadır.

Çankaya & Arıkan (2009) çalışmalarında dinamik değişkenli bir sütun oluşturma algoritması kullanmışlardır. Çalışmada küme kapsama problemi ve en kısa yol problemi şeklinde iki farklı ana ve alt problemi çözülmüştür. Uygun bir çözüm ortaya çıkarana kadar başlangıç eşleştirmeleri oluşturulmuş, bunu yaparken de ana ve alt problem tekrarlı olarak çözülmüştür. Alt problem amaç fonksiyonu için ana problemin sonucunda ortaya çıkar uçuş seferleriyle ilgili dual değerler kullanılmıştır.

Özdemir (2009) literatürde daha önceden var olan çözüm yöntemleri üzerine bir kıyaslama yapmak ve bu yöntemlerin beraber kullanımı ile hibrit bir algoritma geliştirerek daha başarılı bir çözüm üretme fikrini ortaya atmıştır. Hibrit yöntemleri açıklarken tren ve otobüs gibi ulaşım sektörlerindeki kullanımlarından bahsetmiştir. Sprint ve Carmen hibrit metodu ile çözüm süresi çok düşürebilmeyi başarmış olsa da Carmen yönteminin değişkenleri rassal olarak seçme yönteminde dolayı bu metot bazen optimalden uzak sonuçlar verebilmektedir. Çözümleri optimize edebilmek için Sprint ve Branch on Follow-ons hibrit yaklaşımını denemiştir. Bu metot çözüm süresi olarak daha başarısız olsa da verdiği çözümler daha optimaldir.

Salazar-González (2014) karma tamsayılı doğrusal programlama modeli ile İspanya ve Portekiz’de hizmet vermekte olan bir havayolu firması için ekip eşleştirme, ekip atama, filo atama ve hava aracı problemlerinin çözümünü beraber yapmaya çalışmışlardır. Bu çalışmada tercih edilen havayolu firması uçuş sayısının çok düşük olmasından (150 uçuş / gün) dolayı bu çalışma literatürdeki diğer çalışmalardan farklılık göstermektedir. Havayolu firması gece uçuş yapmamaktadır bu yüzden de uçak bakımları için gece saatleri kullanılmaktadır. Bu sayede uçak bakımlarının modele bir kısıt olarak entegre edilmesi durumu ortadan kalkmaktadır. Bu ve benzeri durumlar sebebiyle çözüm modeli günlük problemin çözümü biçiminde hazırlanmıştır. Çalışmada yer alan model iki depolu, sürücü değişimli araç rotalama problemine benzemektedir, uçaklar araçlar, kabin ekipleri de sürücüler olarak kabul edilebilir. Çalışmada ayrıca araç rotalama problemindeki yaklaşımların sezgisel biçimde tam sayılı bir model haline getirilmesi ve ekip atamada kullanılmasından bahsedilmektedir.

Aksu & Temiz (2021) havayolu operasyonlarda yer alan düzensiz olaylar ve gecikmelerden bahsetmiş, maliyet azaltmanın ardından en önemli amacın çizelgelerin aksamaması veya belirsizliklerden etkilenmemesi olduğunu açıklamışlardır. Filo tipini ve yurt dışı uçuşları yok sayan bir metot kullanarak sadece yurt içi uçuşları dikkate almışlardır. Gecikmelerin dikkate alındığı ve alınmadığı iki farklı senaryoyu çözmüşlerdir. Gecikmesiz senaryoyu çözerken küme bölüntüleme formülasyonu kullanılmıştır. Gecikmeli senaryoda ise Pearson korelasyonu ile gecikme kavramlarının arasındaki ilişkiyi ölçmek istemişlerdir. Kalkış gecikmeleri ve blok süre aşımına sebep olan ana faktörün varış gecikmeleri olduğu ortaya çıkmıştır. Küme bölüntüleme ile klasik ekip eşleme problemi çözümlenirken çalışan sayısı arttırılırsa gecikmelerin sayısının azalacağı, dayanıklı planlamada ise yayılan gecikme ve maliyet minimizasyonun bir arada ele alınması

gerektiği, gecikme süresinin azaltılmasına ağırlık verilen durumda maliyetlerin arttığı, maliyet minimizasyona ağırlık verilen senaryoda ise gecikmelerin arttığı belirtilmiştir.

3. HAVAYOLU EKİP PLANLAMA PROBLEMİ

Havayolu ekip planlama problemi, havayolu firmalarının planlarında yer alan en karmaşık problemlerdendir. Çalışan maliyetleri yakıt maliyetinin ardından havayolu firmaları için en yüksek maliyeti oluşturmaktadır. Bu problem kontrol edilebilmesinden dolayı havayolu firmaları bu problemi optimal biçimde çözmeye önem vermektedirler. Problemin temel amacı firmada çalışan farklı vasıflara sahip uçuş mürettebatının, havayolu firmasının uçuş programında eksik uçuş bırakmayacak şekilde atanmasıdır. Problem ile havayolu firmasının uçuş maliyeti arasındaki ilişkiden dolayı bu problemin optimal bir şekilde çözülmesine firmalar çok önem vermektedir.

Havayolu ekip planlama problemi çok sayıda alt probleme bölünmektedir. Örneğin uçuş görevleri oluşturulurken, havayolu firması bir kalkış noktasından binlerce farklı varış noktasına uçuş yapabilmektedir. Bu durumda da çok büyük sayıda farklı uçuş görevi oluşabilmektedir.

Problem çözülürken ekip rotasyon ve ekip atama altında iki adımda çözülmektedir. Bu çalışmada uygulanan metodoloji ekip rotasyonu adımı için hazırlanmıştır. Bu adım havayolu firmasının uçuş çizelgesinde yer alan her uçuş en az bir kere kapsanırken, maliyetleri de minimize eden ekip rotasyonları kümesinin bulunması amacıyla çözüm yapılır. Bu aşamanın ardından gelen ekip atamada ise ekip rotasyon kümesinde üretilmiş olan rotasyonlara, rotasyonlardaki ihtiyacı karşılayacak personellerin ataması yapılır.

İki adım çözülürken de Sivil Havacılık Kurumu tarafından paylaşılan talimatnamede yer alan kuralların ve havayolu firmasının uyguladığı kısıtların dışına çıkılmaması gerekmektedir. Kural ve kısıtların uygulanması ile problem yüksek seviyede kısıtlı bir optimizasyon problemine dönüşmektedir.

Ekip rotasyon probleminde yer alan bu kısıtlar zamansal, konumsal ve yönetmelik kaynaklı şeklinde üç bölüme ayrılmaktadır. Zamansal kısıtlamalarda rotasyonda yer alan uçuşlardan birinin kalkış saatinin kendisinden önce gelen uçuşun varış saatinden önce olamaması gibi durumları, konumsal kısıtlar birbiri ardına gerçekleşen iki uçuştan ilkinin varış yeri ile ikinci uçuşun kalkış yerinin aynı nokta olması gerekliliğini ve rotasyonun başlangıç noktası ile bittiği noktasının aynı ikamet merkezi olması kısıtını, yönetmelikten gelen kısıtlar ise molalar, dinlenme süreleri, uçuş görev süreleri gibi kuralları belirler.

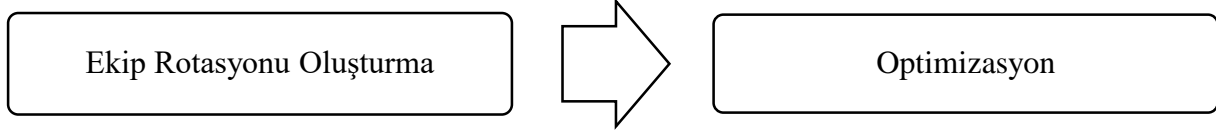
Problem çözümü için hazırlanan amaç fonksiyonu ve amaç fonksiyonunda yer alacak olan maliyetlerin temsil edilmesinde kullanılacak olan değerler de dikkat edilmesi gereken ayrı bir konudur. Literatürde yer alan çalışmalarda görülebileceği gibi, genelde amaç fonksiyonunda toplam parasal maliyet kullanılmaktadır (Rubin, 1973; Graves ve ark., 1993). Bu maliyet hesabı yapılırken öncelikle ekip rotasyonlarının maliyeti, görevi yapacak olan ekibin ilgili rotasyonu gerçekleştirirken alacağı ücret ve konaklama masrafları gibi değer toplanır.

Amaç fonksiyonunda toplam maliyetin minimizasyonu amaçlanmaktadır. Ekip rotasyonlarının maliyeti bu fonksiyonda maliyet girdisi olarak alınmıştır. Çözümün maliyeti, çözüm kümesinde yer alan ekip rotasyonlarının maliyetlerinin toplamı ile pas uçuşların sebep olduğu ceza maliyetlerinin toplanmasıyla bulunur.

Uçuş ekibinin uçakta mürettebat olarak değil de yolcu olarak seyahat ettiği duruma pas uçuş denir. Bu durum aynı uçuşu kapsayan birden fazla ekip anlamını da taşımaktadır. Uçuş ekibinin bir uçuş

görevini yapmak için ilgili uçuşun başlangıç noktasına gitmesi durumunda pas uçuş ortaya çıkmaktadır.

Ekip rotasyonu problemi, ekip rotasyonu oluşturma ve optimizasyon şeklinde iki adımda çözülmektedir (Bkz. Şekil 1). Ekip rotasyonu oluşturma kısmında, uçuş tarifesindeki veriler ile uygun ekip rotasyonları üretilir ve amaç fonksiyonu uygulanırken kullanılacak olan değerleri hesaplanır. Optimizasyon kısmında ise, her uçuşu en az bir kere kapsarken amaç fonksiyonunu da minimize edecek ekip rotasyonları kümesi bulunur.



Şekil 1. Ekip Rotasyonu Optimizasyon Probleminin Çözümü

Birinci adımda kısıtlar ve amaç fonksiyonunda kullanılacak hesaplamaların yapılması ile yüksek sayıda ekip rotasyonu üretilir. Optimizasyon kısmı da bir küme kapsama problemi şeklinde modellenir ve çözülür.

4. METODOLOJİ

Ekip rotasyonları oluşturulurken havayolu firmasının uçuş tarifesindeki uçuşların kümesi olan U , girdi olarak kullanılır. Kısıtlamalar $D:2^U \rightarrow \{0,1\}$ formülü ile belirlenmiştir. Bu kısımda r , $D(r) = 1$ geçerli, $D(r) = 0$ ise geçerli olmayan bir ekip rotasyonunu temsil etmektedir. Bu aşamada amaç, sistemin bütün kısıtlamalarına uygun olan $R = \{r \in 2^U \mid D(r) = 1\}$ ekip rotasyon kümesinin ortaya çıkarılmasıdır.

Ekip rotasyonu oluşturma iki adımda yapılmaktadır. Birinci adımda uçuş tarifesinde yer alan uçuşların kullanılması ile uçuş görevleri üretilir, ikinci adımda ise üretilmiş olan uçuş görevlerinden ekip rotasyonları üretilir. Tarifedeki uçuş kümesi, uçuş görevlerinin üretilmesi için girdi olarak kullanılır. Kısıtları sağlayan kaliteli uçuş görevleri bir sonraki adımın girdisi olması amacıyla saklanır.

4.1. Uçuş Görevi Oluşturma

Uçuş görevleri depth first search algoritması ile oluşturulmuştur. Uçuş tarifesindeki uçuşlar için uygun olan uçuş görevleri hesaplanır, devamında ise üretilmiş olan uçuş görevlerinin arkasına eklenmesi uygun olan uçuşların varlığı kontrol edilir. Bu aşamada kısıtlar kontrol edilir ve aramanın derinleştirilebilme durumu incelenir. Kısıtların dışına çıkmayan uçuş görevleri kaydedilir. Birinci uçuştan itibaren tüm uygun olan tüm uçuş görevi kombinasyonları incelenmiş olur. İşlemler her uçuş için tekrarlanır.

Bu işlemlerin sona ermesinin ardından yüksek miktarda uçuş görevi oluşturulur. Bu görevlerin tamamının kullanılması çözümün ilerleyen aşamaları için performans problemine neden olduğundan, görevler belli bir kalite oranına göre ayıklanır ve kalitesi düşük olanlar atılır.

Kalite oranı = Havada kalma süresi / (Uçuş görev süresi + dinlenme süresi)

4.2. Ekip Rotasyonu Oluşturma

Ekip rotasyonu oluşturma kısmında da depth first search algoritması kullanılmıştır. Önceki adımda üretilen uçuş görevleri burada girdi olarak kullanılmıştır. Bu aşamanın amacı elde var olan uçuş görevi kümesiyle ekip rotasyon kümesini oluşturmaktır.

Çalışmada ekip rotasyonlarının ikamet merkezinin bir tane olacağı varsayılmıştır. Bu durumdan dolayı görevlerin başlangıç ve bitiş noktaları belirlenmiş olan ikamet merkezi olmalıdır. Bu aşamada zamansal, konumsal ve yönetmelikten gelen kısıtların kontrolleri de yapılır, uygun olmayan ekip rotasyonları kayıt altına alınmaz, uygun olanlar saklanır.

Uçuş görevi oluşturma aşamasının sonunda olduğu gibi bu aşamanın sonunda da ortaya çıkabilecek performans problemlerini azaltmak adına bir kalite oranı kullanılır. Düşük orana sahip olan rotasyonlar elenir.

Kalite oranı = Havada kalma süresi / (Toplam ekip rotasyonu süresi + dinlenme süresi)

4.3. Küme Kapsama Problemi

Küme kapsama problemi bir kombinatoriyal optimizasyon problemi olarak bilinmektedir. Küme kapsama probleminde amaç q satır ve w sütun ile 0 ve 1'lerden oluşan bir matrisin (a_{ij}) bütün satırlarının minimum maliyet ile kapsanmasıdır (Holland & Holland, J. H., 1975). Örneğin bir z vektörü için, $z_j = 1$ ise j sütunu $c_j > 0$ maliyeti ile çözüm kümesinin içinde, $z_j = 0$ ise çözüm kümesinin dışında olduğu varsayılırsa problemin formülasyonu aşağıdaki gibidir. ($j=1,2,3,\dots,n$).

$$\text{Min} \sum_{j=1}^w c_j z_j$$

$$\sum_{j=1}^w a_{ij} z_j \geq 1, \quad i = 1, 2, 3, \dots, q$$

$$z_j \in \{0,1\}, \quad j = 1, 2, 3, \dots, w$$

Bu kısımda amaç fonksiyonu evrensel kümedeki tüm elemanları kapsarken, maliyeti minimize edecek şekilde en düşük sayıda alt küme kullanmaktır. Bir sonraki satırdaki kısıt ise, U evrensel kümesinde yer alan her j elemanının kapsanması gerektiğini gösterir. İkinci kısıt ise karar değişkenlerinin ikili (binary) olduğunu, herhangi bir kümenin kapsandığını veya kapsanmadığını ifade etmektedir.

4.4. Genetik Algoritmalar

Genetik algoritmalar, Darwin'in "en iyi olan yaşar" prensibi ile çalışan, biyolojik sistemleri simüle eden, arama tarama algoritmalarıdır. Bu alandaki ilk çalışma (Holland & Holland, J. H., 1975) çalışmasıdır.

Genetik algoritmalar, sezgisel bir metoddur bu yüzden problem için en iyi çözümü bulma garantisi verilemez. Genetik algoritmalar mevcut metotların yetersiz kaldığı durumlarda veya çözüm süresinin problem büyüklüğüyle beraber üstel olarak arttığı problemlerin çözümün en iyiye çok yaklaşan sonuçlar verebilmektedir (Beasley & Chu, 1996).

Genetik algoritmalar, doğadaki biyolojik yaşam formlarının geçirdikleri evrimsel süreçlerin örnek alınmasıyla geliştirilmiştir. Evrimsel süreçte ilerlemeler oldukça, popülasyon da doğal seçim ile evrim geçirmektedir. Popülasyondaki bireylerden çevrelerine daha iyi adapte olmuş olanların hayatta kalma ve çoğalma ihtimali, kendilerine göre güçsüz ve zayıf olan bireylerden daha fazladır. Güçsüz ve zayıf olan bireyler elenirken sağlıklı olanlar hayatta kalmaya devam ederler. Bu süreç kendini tekrar ederken, sağlıklı olan bireyler genlerini alt nesillere aktarmaya devam ederler. Sağlıklı bireylerin beraber oluşturdukları gen kombinasyonlarının sonucunda kendilerinden de daha kaliteli yeni bireyler oluşabilmektedir. Böylece popülasyonda daha sağlıklı bireylerin oluştuğu görülmektedir.

Genetik algoritmalarda süreç en başta rastgele olarak ilk neslin üretilmesi ile başlar. Bu neslin devamında gelen tüm nesillerde genetik operatörlerin kullanılması ile evrimsel optimizasyonu simüle eder. Popülasyondaki bireylerin her biri, problemin mümkün olan çözümlerinden biridir, bu bireyler probleme özel olarak kodlanırlar ve kromozomlar ile temsil edilirler. Kromozomların çözüm kalitelerinin (fitness) hesabında amaç fonksiyonu kullanılır. Kaliteli bireyler fitness değerleri yüksek olanlardır. Bu bireyler, kendileri gibi yüksek fitness değerine sahip bireyler ile çaprazlama operatörü yardımıyla üreyerek kendi genlerindeki bilgileri yeni nesile aktarırlar. Bu metot ile ebeveynlerdeki genler farklı kombinasyonlar ile çocuk nesillere aktarılır ve yeni çözümler elde edilir. Lokal minimum ve maksimum değerlerine yakalanmanın önüne geçmek için bütün nesillerde, kromozomda yer alan genlerden bazılarının değiştirilmesi adına belirli bir oranda mutasyon operatörü uygulanır. Sonuçta yeni neslin eski ile tamamen yer değiştirmesi veya eski nesildeki kalitesiz bireyler ile yeni nesildeki kaliteli bireylerin yer değiştirmesi gibi iki durum yaşanır. Tatmin edici bir sonuç bulunana kadar döngü devam ettirilir.

4.4.1. Sütun temelli gösterim

Bu çalışmada genetik algoritmanın sütun temelli gösterimi kullanılmıştır. Sütun temelli gösterim biçim olarak sadedir. Ekip rotasyonu sayısını r olarak kabul ettiğimizde, kromozomlar 0 ve 1 değerlerine sahip olabilen r uzunluğunda bir dizidir. Kromozomdaki 1 değerine sahip olan indekslerdeki genler çözüm kümesinde yer alırken, 0 olan genler çözümde yer almamaktadır.

r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7	r_8	r_9	r_{10}
0	1	1	0	1	0	0	1	1	0

Şekil 2. Genetik Algoritmalarda Sütun Gösterimi

Üstte örneği verilmiş olan bir kromozomun uygunluk (fitness) değeri aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\sum_{i=1}^{10} c_i r_i$$

Bu gösterimde başlangıç popülasyonu rastgele oluşturulur. Ancak başlangıç popülasyonu üretilirken ve algoritmanın ileriki adımlarında kullanılacak olan operatörlerin sonucunda çıkan yeni kromozomların da çözüme uygun olması garanti edilemez. Algoritma çalıştığı sürece, arkada yer alan operatörler genler üzerinde değişiklik yaptıklarından tüm uçuşların kapsanması kısıtını sağlamayan kromozomlar ortaya çıkabilmektedir. Bu durumun önüne geçmek için, algoritmaya bir takım düzeltme mekanizmalarının eklenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Kullanılabilecek en basit yol, uygun olmayan bütün kromozomların çözüm kümesinin dışına çıkarılmasıdır ancak bu tarz bir yöntemin ardından elimizdeki çözümlerin hiçbirinin uygun olmaması riski ortaya çıkar. Uygun olmayan kromozomlara uygunluk fonksiyonlarında yüksek ceza değerleri eklenmesi

kullanılabilecek bir diğer mekanizmadır. Bir diğer metot ise uygun olmayan kromozomların belirli birtakım kurallar ile onarım işlemine alınmasıyla uygun hale getirilmeleridir. Beasley & Chu (1996) çalışmalarında sütun temelli gösterim için bir onarma metodu kullanarak, uygun olmayan kromozomların uygun hale gelmesi için bir uygunluk operatörü uygulamışlardır.

4.4.2. Başlangıç popülasyonu

Genetik algoritma iterasyonuna ilk girecek olan çözüm kümesi başlangıç popülasyonudur. Genetik algoritma sürecinin ilk aşaması başlangıç popülasyonunun üretilmesidir. Başlangıç popülasyonu üretilirken hiçbir uçuşu açıkta bırakmayacak bir metot kullanılmıştır.

F = Tüm uçuşların (sıra) kümesi

P = Tüm ekip rotasyonlarının (sütun) kümesi

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

β_p = t 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, $f \in F$

Yukarıda belirtilen indisler aşağıda verilen algoritma ile işleme alınarak ilk popülasyonu oluşturmuştur.

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. $w_f = w_f + 1$, $\forall f \in \beta_p$

Bu çalışmada $k = 5$ olarak kabul edilmiştir. k . elemandan sonraki ekip rotasyonlarının taranması ise genetik algoritmada yer alan mutasyon, onarma ve iyileştirme operatörleri ile gerçekleştirilmektedir.

Popülasyondaki kromozom sayısının belirlenmesinde $20 * \text{Ekip Merkezi Sayısı}$ formülü kullanılmıştır. Kromozom sayısı artırılarak iterasyon sayısı azaltılabilir, ancak bu durum işlem yükünde artışa sebep olacağından toplam çözüm süresinin iyileşmesi için bir fayda sağlamamaktadır. Kromozomlar yukarıda verilen adımlar ile üretildikten sonra genetik algoritma çözüme hazır hale gelmektedir.

4.4.3. Seleksiyon operatörü

Genetik algoritmaların ilk işlemi her zaman seleksiyondur. Seleksiyondaki amaç, kendisinden sonraki aşama olan çaprazlama operasyonunda yer alacak olan kromozomlara karar verilmesidir. Çaprazlama operasyonunda genetik bilgiler bir sonraki nesile aktarılır. Bu sebepten dolayı çaprazlamada kullanılacak olan kromozomların seçimi işlemi de algoritmanın yakınına hızını doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada seleksiyon yapılırken ikili turnuva seçimi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem turnuva seçimi yönteminin iki elemanlı kümelerle yapılması ile uygulanır. Yöntem ekstra bir hesaplama gerektirmemesi nedeniyle hızlı bir şekilde çalışmaktadır.

1. Popülasyondan rastgele iki kromozom seçilir.
2. Bu iki kromozom arasından 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. aşamada seçilen kromozomlar bir sonraki aşamadaki çaprazlama operasyonunda kullanılırlar.

4.4.4. Çaprazlama operatörü

Mevcut genetik bilginin sonraki nesillere aktarılarak çocuk kromozomların üretildiği aşama çaprazlamadır. Seleksiyon işleminin sonuçlanmasıyla beraber bulunan, uygunluk değeri yüksek iki kromozoma çaprazlama operatörü uygulanmasıyla bir veya iki yeni çocuk kromozom üretilir. Çaprazlama işleminde yer alacak 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 $K_1[i] \neq K_2[i]$ ise
 - 3.1. $= (u_{K1} - u_{ek}) / (u_{K1} - u_{ek} + u_{K2} - u_{ek})$ olasılığı ile $C[i] = K_1[i]$
 - 3.2. $1 - o$ olasılığı ile $C[i] = K_2[i]$
4. Eğer $i < p$ ise $i = i + 1$ ve 2. adıma dön.

İki kromozomun çaprazlama olasılıklarını dengelemesi için u_{ek} değeri kullanılmaktadır. Bu sayede algoritmanın ilerleyen aşamalarında uygunluk değerleri birbirine yaklaşırsa dahi, çaprazlama oranlarının birbirine çok yakın olmasının önüne geçilmektedir. Örnek olarak $u_{K1} = 12$, $u_{K2} = 11$, $u_{ek} = 10$ olursa $o_1 = 2 / 3$, $o_2 = 1 / 3$ değerleri bulunmaktadır.

4.4.6. Mutasyon operatörü

Mutasyon operatörü küçük bir arama mekanizması ile çocuk kromozomlarda uygulanır. Kullanım amacı algoritmanın lokal minimum ve maksimum değerlerde takılı kalmasını önlemektir. Beasley & Chu (1996) çalışmalarında, sabit sayıda gen üzerinde değişiklik yapmak yerine algoritma ilerledikçe artan mutasyon oranı kullanımının verdiği sonuçların daha başarılı olduğunu belirtmişlerdir.

Kromozomda mutasyon uğratılacak gen sayısının (n_m) hesaplanmasında aşağıdaki formül kullanılmaktadır.

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

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, (Zeren, 2007) çalışması ile karşılaştırma yapılırken anlamlı sonuçlar bulunması adına, $m_f = \text{Kromozom Uzunluğu} / 90$, $m_c = 400$, $m_g = 0.4$ kabul edilmiştir.

Bir gen mutasyona uğratılmak istendiğinde o_m olasılığı ile mutasyona uğratılmaktadır. o_m hesaplanırken (Kornilakis & Stamatopoulos, 2002) popülasyonun en sağlıklı bireyinin, 1 değerine sahip genlerinin sayısının kromozomun uzunluğuna bölünmesi oranı kullanılmaktadır. K mutasyon uğrayacak kromozom, n kromozomdaki gen sayısı olmak üzere mutasyon operatörü aşağıdaki gibi çalışmaktadır.

1. $i = 1$
2. 1'den n'ye 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.

4.4.7. Sezgisel uygunluk operatörü

Çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin uygulanmasının ardından üretilen çocuk kromozomun uygun olması garanti edilemediğinden bu tür kromozomların onarılması tercih edilmektedir. Uygun olmayan bir kromozomun onarılması için kapsanmamış uçuşlar ve bu uçuşların kapsanmasını sağlayabilecek ekip rotasyonlarının belirlenmesi gerekmektedir. Sezgisel uygunluk operatörü aşağıda gösterildiği gibi çalışmaktadır.

F = Tüm uçuşların (satırların) kümesi

P = Tüm ekip rotasyonlarının (kolonların) kümesi

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

β_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, $U \subset F$

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

- 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) $S = S + p$; $w_f = w_f + 1$, $p \forall f \in \beta_p$; $U = U - \beta_p$
 - c) $w_f = w_f + 1$, $\forall f \in \beta_p$

İlk iki adımda kapsanmayan uçuşlar belirlenir. Üçüncü adımda kromozom uygun hale getirilir.

4.4.8. Kromozom iyileştirme operatörü

Referans alınan diğer çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada yeni bir kromozom iyileştirme operatörü geliştirilmiştir. Bu operatörün uygulanma amacı kromozomda yer alan aşırı kapsamanın önüne geçmektir. Operatör aynı uçuşu kapsayan birden fazla rotasyon içinden en kaliteli olanı saklar, geri kalan tüm rotasyonları çözüm kümesi dışına çıkarır. Kullanılan kalite oranı aşağıda belirtilmiştir.

Havada kalma süresi / (Toplam ekip rotasyonu süresi + Dinlenme süresi)

Bu çalışmada örnek alınan diğer çalışmaların aksine çözümden çıkarılan rotasyonların yerine yenileri eklenmez. Tüm uçuşlar kapsanana kadar Sezgisel Uygunluk Operatörü ve Kromozom İyileştirme Operatörü birbiri ardına uygulanır. Algoritmanın akışı aşağıda belirtilmiştir.

F = Tüm uçuşların (satırların) kümesi

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

Q_{af} = f uçuşunu kapsayan rotasyonlarının kalitesinin kümesi, $a \in \alpha$

1. Çözüm kümesindeki uçuşları (F) sırayla kontrol et.
2. f uçuşunu kapsayan rotasyonların kümesini bul.
3. Bu kümede yer alan rotasyonların kalite değerlerini (Q_{af}) bul.
4. Kalite değeri en yüksek olan rotasyonu ($\text{MAX}\{Q_{af}\}$) belirle.
5. Kalite değeri en yüksek olan rotasyonun değerini 1 olarak bırak.
6. Geri kalan tüm rotasyonların değerini 0 yaparak çözüm kümesinden çıkar.

4.4.9. Uygunluk fonksiyonu

Uygunluk fonksiyonu (fitness function) kullanılarak kromozomun uygun bir çözüm kümesi olma durumu kontrol edilir. Bu çalışmada uygunluk fonksiyonu maliyet temel alınarak tasarlanmıştır.

c_{pi} : i. ekip rotasyonunun maliyet değeri

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

c_{fj} : j. uçuşun maliyet değeridir.

d_{fj} : 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

p_d : Pas ceza katsayısı

$$\sum_i c_{pi} g_i + \sum_j c_{fj} \cdot d_{fj} \cdot p_d + \sum_i c_k \cdot |(c_k/c_t) - (e_k/e_t)|$$

Denklemdaki ilk kısım, çözüm kümesinde yer alan ekip rotasyonlarının toplam maliyetidir. İkinci kısım pas uçuşların ortaya çıkardığı maliyeti, üçüncü kısım ekiplerin ikamet merkezlerine göre dağılımındaki sapmadır.

4.4.10. Popülasyon yenileme

Popülasyon yenileme aşaması genetik algoritma iterasyonunun son adımıdır. Bu kısımda üretilmiş olan yeni çocuk kromozomların kullanım biçimi belirlenmektedir. Bu çalışmada tercih edilen yaklaşım elitist bir yaklaşımdır ve aşağıdaki gibi çalışmaktadır.

1. Ebeveyn popülasyon ile çocuk popülasyon bir araya getirilir.
2. Kromozomlar uygunluk değerlerine göre dizilir.
3. En iyi ilk 20 birey bir sonraki tur için saklanır geri kalanlar ise atılır.

Bu yaklaşımın dışında, bütün çocuk ve ebeveynlerin yer değiştirdiği nesilsel yaklaşım ve her çocuk kromozomun uygunluk değerlerine göre rassal olarak seçilmiş olan bir ebeveyn ile yer değiştirdiği steady-state yaklaşımı da denenmiştir. Bu denemelerin ardından elitist yaklaşım en iyi sonucu vermiştir.

5. UYGULAMA VE BULGULAR

Bu çalışmada sezgisel metotlardan genetik algoritmalar kullanılarak, yerel bir havayolu şirketinin uçuş tarifesindeki uçuşlara ekip rotasyonu ataması yapılmıştır. Uygulamada kullanılan algoritma metodoloji bölümü altında anlatılan genetik algoritma yöntemidir. Uygulamada tek uçuş merkezi kullanılmıştır. Aşağıda sunulan sonuçlar, 714 uçuşa sahip 310 filosu için hazırlanmış ve AMD Ryzen 5 3600 3.6GHz işlemcili bir makinede JetBrains PyCharm platformunda çalıştırılmıştır.

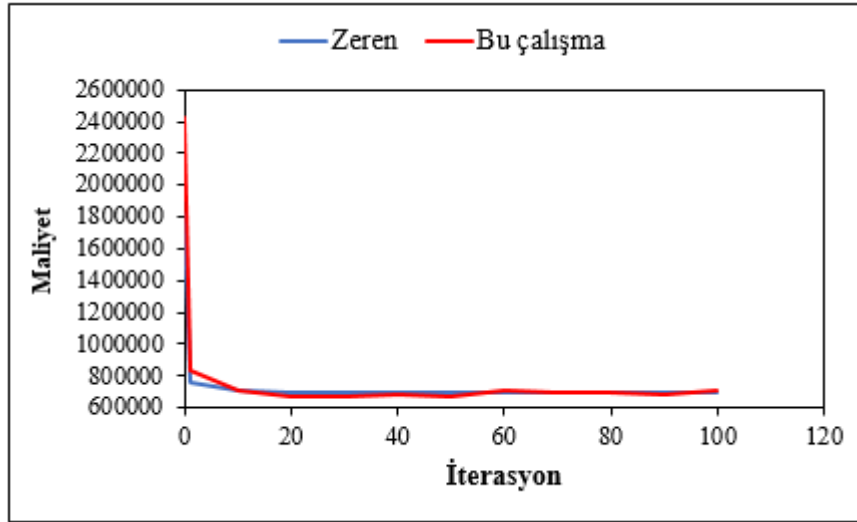
Çalışma tek merkezli olarak yapılırken, tüm ekip elemanlarının İstanbul'da ikamet ettiği varsayılmıştır. İstanbul merkezli olarak üretilen ekip rotasyonu sayısı 3646'dır. Tek bir merkez kullanıldığından merkez arası dağılım olmamaktadır bu sebepten dolayı ekip dağılım maliyeti sıfır olmaktadır.

Uygulama yapılırken seleksiyon operatörü olarak ikili turnuva seçimi yöntemi kullanılarak kromozomlar seçilmiştir. Çaprazlama operatörünün çaprazlama olasılığı dengelenerek çaprazlama oranlarının birbirine aşırı yakın olması önlenmek istenmiştir. Mutasyon operatöründe ise algoritma ilerledikçe mutasyon oranını arttıran bir yaklaşım kullanılmıştır. Sezgisel uygunluk operatörünün kullanımıyla kromozomlar onararak çözüme uygun hale getirilmiştir. Kromozom iyileştirme operatörü kullanılarak mevcut kromozomların kalitesi artırılmış ve maliyetin azaltılması sağlanmıştır.

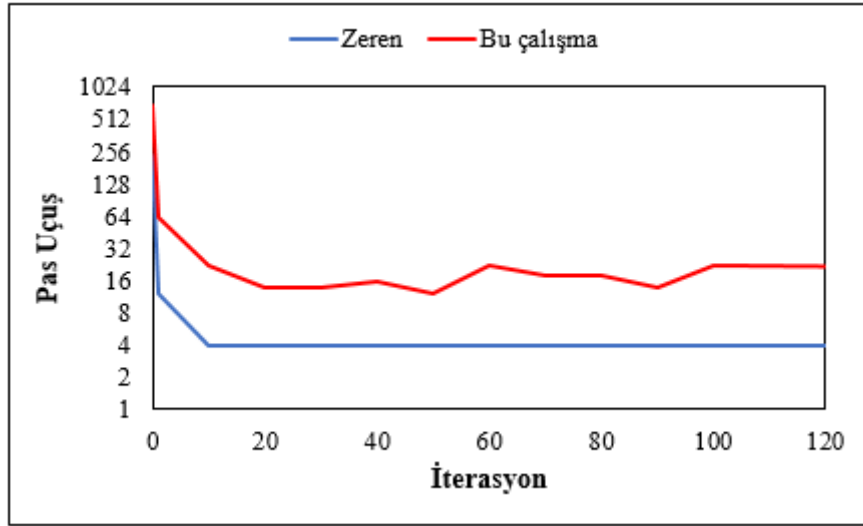
Zeren (2007) çalışmasına kıyaslandığında bu çalışmaya özel olarak geliştirilen kromozom iyileştirme operatörü sayesinde daha az iterasyonla daha düşük maliyete ulaşılmıştır. Çalışmanın amacı maliyetleri azaltmak olduğundan, referans alınan çalışmaya kıyasla daha fazla pas uçuş çıktığı halde daha düşük maliyetlerin elde edilmesi sağlanmıştır. Çözüm süreleri bakımından örnek alınan çalışma artan iterasyon sayılarında daha başarılı olsa da maliyet bakımından yeni geliştirilen algoritma daha başarılı olmuştur.

Genetik algoritmanın sezgisel yapısı ve mutasyon operatöründen dolayı bazı iterasyonlarda çıkan yanıtlar daha az iterasyonda ortaya çıkan sonuçlardan daha başarısız olsa da sonuçlar genel olarak tutarlıdır.

Referans alınan çalışma ile tarafımızca bu çalışma için geliştirilmiş olan genetik algoritmanın, tek merkezli çözümde, ilk 100 iterasyon için maliyet ve pas uçuş sayısındaki değişimler grafiksel olarak aşağıda paylaşılmıştır.



Şekil 3. Tek merkezli çözüm için maliyet değişimi



Şekil 4. Tek merkezli çözüm için pas uçuş sayıları

Tek merkezli çözümün farklı iterasyonlarındaki değerler aşağıdaki gibidir.

Tablo 1. Farklı iterasyon sayıları için elde edilen sonuçlar

İterasyon	Zeren					Bu çalışma için geliştirilmiş GA				
	Ekip Rotasyon Sayısı	Uçuş Sayısı	Pas Sayısı	Maliyet	Süre (sn)	Ekip Rotasyon Sayısı	Uçuş Sayısı	Pas Sayısı	Maliyet	Süre (sn)
0	210	944	234	1824645	0	355	1384	706	2426555	0
1	333	722	12	758335	0	328	772	62	832715	3
10	335	714	4	707315	0	326	732	22	705335	22
20	333	714	4	702690	0	318	724	14	673525	39
30	333	714	4	702690	0	322	724	14	675295	44
40	333	714	4	702690	0	330	726	16	688670	67
50	332	714	4	702285	1	312	722	12	673845	58
60	331	714	4	701880	1	327	732	22	703195	59
70	331	714	4	701880	1	328	728	18	691170	77
80	335	714	4	697125	1	313	728	18	694300	103
90	332	714	4	695790	1	317	724	14	685700	90
100	331	714	4	695385	1	325	732	22	705500	111
200	329	714	4	694510	3	323	730	20	690370	180
300	320	714	4	690525	5	326	736	26	718520	315
400	316	714	4	688305	7	328	728	18	680200	367
500	311	714	4	685730	9	328	726	16	684070	448
800	302	714	4	682555	14	321	722	12	672300	730
1000	299	714	4	681525	18	318	718	8	658005	752

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada havayolu ekip planlama sürecinin başlangıç adımı ve maliyetlerinin de büyük ölçüde belirlendiği bölüm olan ekip rotasyonu optimizasyonu hakkında literatürde mevcut olan çalışmalar incelenmiş ve tek merkezli çözümde genetik algoritmanın daha başarılı çalışması üzerine geliştirmeler uygulanmıştır. Sonuçlarda da görülebildiği üzere, geliştirilen yeni kromozom iyileştirme operatörü sayesinde algoritma daha düşük maliyetli çözümler vermiştir.

Süreç en başta şirketin uçuş tarifesi incelenerek, uygun uçuş görevlerinin üretilmesi ile başlamıştır. Bir sonraki aşama ise ekip rotasyonu oluşturma aşamasıdır. Bu aşamada bir önceki aşamada hazırlanmış olan uçuş görevlerine uygulanacak, kurallara uygun olan ekip rotasyonları üretilmiştir. Sonrasında ise optimizasyon aşamasına geçilmiş ve problem bir küme kapsama problemi olarak tasarlanmıştır. Devamında ise bu problem için bir genetik algoritma hazırlanmış ve operatörleri sırayla uygulanarak çözümler elde edilmiştir.

Ekip atama aşaması, havayolu ekip planlama sürecinin ikinci adımıdır. Yapılan bu çalışma, ekip atama aşaması için bir ön hazırlık anlamı taşımaktadır. Bunun sebebi olarak da ekip rotasyon aşamasında üretilmiş ekip rotasyon kümelerinin kalitesinin ekip atama aşamasının başarısıyla doğrudan ilişkili olması söylenebilir.

Algoritmanın ilerleyen iterasyonlarda yaşadığı çözüm süresi yavaşlığının giderilmesi, mutasyon operatörünün sebep olduğu şans faktöründen dolayı ortaya çıkan daha başarısız kromozomların düzeltilmesi, bu bozukluğa sebep olduğu öngörülen mutasyon operatörü ve kromozom iyileştirme operatörlerinin çalışma mantığı üzerindeki iyileştirmeler bir sonraki çalışmalarda üzerinde durulabilecek konulardır. Ayrıca problemin tek merkezli yerine çok merkezli şekilde çözümünün yapılması da gelecekte yapılabilecek olan çalışmalardan biridir.

Yazarların Katkısı

Yazarların makaleye katkıları eşit orandadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

- AhmadBeygi, S., Cohn, A., & Weir, M. (2009). An integer programming approach to generating airline crew pairings. *Computers & Operations Research*, 36(4), 1284-1298.
- Aksu, E. Ö., & Temiz, İ. (2021). Havayolu operasyonlarında dayanıklı ekip eşleme için eniyileme yaklaşımı: bir havayolu şirketi uygulaması. *Politeknik Dergisi*, 24(2), 417-429.
- Anbil, R., Tanga, R., & Johnson, E. L. (1992). A global approach to crew-pairing optimization. *IBM Systems Journal*, 31(1), 71-78.
- Arabeyre, J. P., Fearnley, J., Steiger, F. C., & Teather, W. (1969). The airline crew scheduling problem: A survey. *Transportation Science*, 3(2), 140-163.
- Aydemir, A. A. (2008). *Havayolu ekip eşleme problemi: Genetik ve karma algoritmalar* [Yüksek lisans tezi]. Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara.
- Beasley, J. E., & Chu, P. C. (1996). A genetic algorithm for the set covering problem. *European journal of operational research*, 94(2), 392-404.
- Çankaya, G., & Arıkan, M. (2009). Sütun oluşturma yaklaşımı ile bir havayolu ekip çizelgeleme uygulaması. *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 24(1).

- Elhabashy, A. E., Elwany, M. H., Fors, M. N., & Abouelseoud, Y. (2014, Ekim, 14-16). Solving the airline crew pairing problem using genetic algorithms. *CIE44 & IMSS'14 Proceedings. Istanbul*. 2167-2181
- Ernst, A. T., Jiang, H., Krishnamoorthy, M., & Sier, D. (2004). Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models. *European journal of operational research*, 153(1), 3-27.
- Etschmaier, M. M., & Mathaisel, D. F. (1985). Airline scheduling: An overview. *Transportation Science*, 19(2), 127-138.
- Graves, G. W., McBride, R. D., Gershkoff, I., Anderson, D., & Mahidhara, D. (1993). Flight crew scheduling. *Management science*, 39(6), 736-745.
- Gopalakrishnan, B., & Johnson, E. (2005). Airline crew scheduling: State-of-the-art. *Annals of Operations Research*, 140(1), 305-337.
- Holland, J. H., & Holland, J. H. (1975). Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. *University of Michigan press. USA*.
- Kornilakis, H., & Stamatopoulos, P. (2002). Crew pairing optimization with genetic algorithms. In Hellenic conference on artificial intelligence (pp. 109-120). *Springer, Berlin, Heidelberg*.
- Medard, C. P., & Sawhney, N. (2007). Airline crew scheduling from planning to operations. *European Journal of Operational Research*, 183(3), 1013-1027.
- Özdemir, U. (2009). Methodology for crew-pairing problem in airline crew scheduling. [Yüksek lisans tezi]. *Boğaziçi Üniversitesi. İstanbul*.
- Rubin, J. (1973). A technique for the solution of massive set covering problems, with application to airline crew scheduling. *Transportation Science*, 7(1), 34-48.
- Rushmeier, R. A., Hoffman, K. L., & Padberg, M. (1995). Recent advances in exact optimization of airline scheduling problems. *Dept. of Operations Research and Operations Engineering, George Mason University, Working Paper*.
- Salazar-González, J. J. (2014). Approaches to solve the fleet-assignment, aircraft-routing, crew-pairing and crew-rostering problems of a regional carrier. *Omega*, 43, 71-82.
- Teodorović, D., & Stojković, G. (1990). Model for operational daily airline scheduling. *Transportation Planning and Technology*, 14(4), 273-285.
- Zeren, B. (2007). *Genetik Algoritmalar ile Havayolu Ekip Planlamada Ekip Rotasyon Optimizasyonu* [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.