

Demiryolu Ekip Çizelgeleme Ve Ekip Atama
Problemi İçin Bir Uygulama

Yüksel Üstündağ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz 2010

A Case Study For Railway Crew Scheduling
And Crew Rostering Problem

Yüksel Üstündağ

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Industrial Engineering

July 2010

**Demiryolu Ekip Çizelgeleme Ve Ekip
Atama Problemi İçin Bir Uygulama**

Yüksel Üstündağ

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı
Yöneylem Araştırması Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Nihat YÜZÜGÜLLÜ

Temmuz 2010

ONAY

Yöneylem Araştırması Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Yüksel ÜSTÜNDAĞ'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "DEMİRYOLU EKİP ÇİZELGELEME VE EKİP ATAMA PROBLEMİ İÇİN BİR UYGULAMA" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Nihat YÜZÜGÜLLÜ

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. Nihat YÜZÜGÜLLÜ

Üye : Prof. Dr. Attila İŞLİER

Üye : Doç. Dr. Nuray GİRGİNER

Üye : Yrd. Doç. Dr. Servet HASGÜL

Üye : Yrd. Doç. Dr. Şerafettin ALPAY

<p>Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.</p> <p>Prof. Dr. Nimetullah BURNAK</p> <p>Enstitü Müdürü</p>

ÖZET

Ekip çizelgeleme ve ekip atama problemlerinin her biri, demiryolu işletim planlamasında karşılaşılan en karmaşık ve zor problemlerdendir. Personel maliyetleri demiryolu şirketinin kontrol edebileceği büyük giderlerden birisi olduğu için, ekipleri tren seferlerine etkin olarak atamak, demiryolu işletim planlamasında önemli rol oynar. Ekip çizelgeleme probleminde, her tren seferinin en az bir ekip eşleştirmesi tarafından kapsandığı en düşük maliyetli eşleştirmeler kümesi bulunmaya çalışılır. Ancak tüm olası ekip eşleştirmelerini oluşturmak oldukça zordur. Bu çalışmada, ekip çizelgeleme probleminin çözümünde sütun oluşturma algoritması ek olarak, ekip atama probleminin çözümünde ise DELPHI programlama dili ile yazılmış olan rassal atama yöntemi kullanılmıştır. Ekip atama problemi için rassal bir sezgisel kullanmanın gerekçesi, bu sezgiselin kısa sürede en iyiye yakın çözümler üretebilmesidir. Ekip çizelgelemede ana problem küme kapsama problemi, alt problem ise en kısa yol problemi olarak modellenmiştir. Ana problem ve alt problem ardıştırmalı olarak çözülmüştür. Ana problemin çözümünden elde edilen tren seferlerine ilişkin ikil değerler alt problemin amaç fonksiyonunda kullanılmıştır. Ekip çizelgeleme probleminin çözümü, rassal ekip atama probleminin girdileri olarak kullanılmıştır. Ekipler sezgisel olarak atanırken, TCDD'nin belirlediği üç farklı tren sınıfı için personellerin; eğitim durumu, yaş, hizmet süresi ve almış oldukları idari cezalar göz önüne alınmıştır. Önerilen algoritma Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryollarından alınan verilere uygulanmıştır ve sonuçlar gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Ekip çizelgeleme, Sütun türetme, Ekip atama

SUMMARY

Crew scheduling and crew assignment problems are both most complicated and hardest problems encountered in railway planning. The assignment of the crew effectively is very important for railway planning, as personnel costs are the great values that can be controlled by the railway firm. In crew scheduling problem, the goal is to find the minimum costly set of pairings in that each journey leg is covered at least by one crew pairing. However, generating all possible crew pairings are quite difficult. In this study, column generation algorithm is used for solving crew scheduling problem in addition, random assignment method that is coded by DELPHI programming language is used for solving the crew assignment problem. The reason for using a heuristic to solve the crew assignment is that this heuristic can generate solutions, which are very close to the optimum solutions. The master problem is formulated as a set covering problem while the subproblem is formulated as a shortest path problem. The master and sub-problems are solved iteratively. Dual values obtained from the solution of the master problem is used in the objective function of the sub-problem. The solutions obtained for crew scheduling are used as inputs for the crew assignment problem. While assigning crew randomly; the education, age, service time and administrative penalties of the crew are taken into account for the three different class of the trains, which are determined by TCDD. The suggested algorithm is applied to the real datas that are taken from the TCDD and the solutions are shown.

Keywords: Crew scheduling, Column generation, Crew rostering

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bana yön gösteren, değerli bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan danışmanım Prof. Dr. Nihat YÜZÜGÜLLÜ' ye ve hayatım boyunca destek ve güvenlerini benden esirgemeyen aileme çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
SUMMARY	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
TEŞEKKÜR	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. DEMİRYOLU İŞLETMECİLİĞİNDE PLANLAMA	5
2.1. Tren Seferleri Çizelgesi Oluşturma	6
2.2. Uygun Lokomotif ve Vagon Bileşimi Oluşturma.....	7
2.3. Tren Rotalama.....	8
2.4. Ekip Çizelgeleme (Eşleştirme)	8
2.5. Ekip Atama	9
3. DEMİRYOLU EKİP ÇİZELGELEME VE EKİP ATAMA	10
3.1. Problem Kategorileri.....	13
3.1.1. Günlük problem	14
3.1.2. Haftalık problem	14
3.1.3. İleri tarihli problem	14
4. EKİP ÇİZELGELEME VE EKİP ATAMADA YAKLAŞIMLAR	16
4.1. Matematiksel Programlama Yöntemleri	16
4.1.1. Dantzig-wolfe ayrıştırması	16
4.1.2. Sütun türetme algoritması	17
4.1.3. Dal-sınır algoritması	18
4.2. Sezgisel Algoritmalar	18
4.2.1. Genetik algoritmalar	19
4.2.2. Sinir ağları.....	19
4.2.3. Çok ürünlü serim akış modeli	19
4.3. Atama Problemi Yaklaşımları	20

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.3.1. Macar algoritması	20
4.3.2. Tabu arama	21
5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	22
6. SÜTUN OLUŞTURMA ALGORİTMASI VE RASSAL ATAMA UYGULAMASI.....	26
6.1. Yasal Zorunluluklar (Kısıtlar)	28
6.2. Maliyet Yapısı.....	29
6.3. Matematiksel Modelleme	31
6.4. Sütun Türetme Algoritması	33
6.4.1. Ana problem	37
6.4.2. Alt problem	37
6.5. Ekip Atama Problemi.....	39
6.6. Sütun Türetme Algoritmasının Uygulaması	41
6.7. Rassal Atama Algoritmasının Uygulaması.....	51
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	57
8. KAYNAKLAR DİZİNİ	59

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
6.1. Sütun Türetme Tekniği Uygulamaları.....	36
6.2. Tren Çizelgesi.....	42
6.3. Başlangıç Eşleştirmeleri.....	43
6.4. En iyi ekip eşleştirmeleri.....	48
6.5. En iyi ekip çizelgesi.....	49
6.6. Ekiplere Atanan Personeller.....	54

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.1. Personel Atama Programı Ara Yüzü.....	51
6.2. İterasyon Bazında İyileşmeler.....	52
6.3. Atama Programı Akış Diyagramı.....	53

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler **Açıklama**

EGU	En Düşük Garanti Ücret
GAMS	General Algebraic Modeling System
KMUGZ	Kendi Merkezinden Uzakta Geçen Zaman
IMRT	Doz yoğunluk ayarlı ışın tedavisi
TCDD	Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Ekip çizelgeleme ya da ekip planlama problemi, görevler kümesine personel gruplarının atanması problemi olarak tanımlanabilir. Bu problem havayolu, demiryolu, karayolu gibi birçok ulaştırma grubu için oldukça önemlidir. Ekip çizelgelemeyle ilgili uygulamaların her biri kendine özgü özellikler ve araştırma özelliklerine sahiptir. Bütün bu problemler için ortak bileşenler en küçük işgücü, güvenlik kuralları ve personel anlaşmalarıdır (Barnhart et al., 2002).

Personel çizelgeleme ve atama problemi havayolu, demiryolu ve karayollarında “ekip çizelgeleme” veya “ekip atama” olarak adlandırılır. Bunların çözüm yöntemleri olarak talep modelleme, yapay zeka yaklaşımları, kısıtlı programlama, meta sezgiseller ve matematiksel programlama gibi yaklaşımların kullanıldığı görülmektedir (Ernst et al., 2004).

Ekip çizelgeleme problemi, demiryolu işletim planlamasında karşılaşılan en kapsamlı problemlerden biridir. Demiryolları için tren üstü ekibini çizelgelemenin önemi oldukça fazladır. Mevcut demiryolu hatlarının büyük çoğunluğunda dizel tren işletmeciliği yapıldığı için yakıt maliyetlerinden sonra, personel maliyetleri demiryolları için en büyük maliyet faktörlerinden birisidir. Personel maliyetleri demiryolunun kontrol edebileceği en büyük giderlerden birisi olduğu için, tren seferlerine etkin personel ataması, demiryolu işletim planlaması açısından büyük önem taşımaktadır.

Ekip çizelgeleme problemi genellikle doğrusal olmayan maliyet fonksiyonuna sahip olduğu ve çok sayıda olası eşleştirmeyi içermesi nedeniyle çözülmesi zordur. NP-zor yapıda olan problemin çözümünü kolaylaştırmak için geliştirilmiş çok sayıda farklı yöntem mevcuttur. Literatürde sıkça kullanılan çözüm yöntemleri, sütun oluşturma algoritmaları, genetik algoritma, tavlama benzetimi, şebeke çözüm teknikleri ve ayrıştırma algoritmalarıdır.

Bir problemin çözümü için gereken çalışma süresi polinom denklemlerle ifade edilebiliyorsa bu tip problemler P (polynomial, polinom) problemler olarak ifade edilir. Problemin çözümü için gereken çalışma süresi böyle bir polinom denklemle ifade edilemiyorsa bu tip problemler, NP (non-deterministic polynomial, belirleyici olmayan polinom) problem olarak adlandırılır. En az her bir NP problem kadar zor olan problemlerin bulunduğu sınıfa NP-Zor (NP-hard) denir. NP-Tam (NP-complete), hem NP olup hem NP-Zor olan problemlerin sınıfıdır. Dolayısıyla bu sınıftaki problemler NP sınıfının en zor problemleridir.

Son on yılda yöneylem yöntemleri demiryolu yolcu taşıma sistemlerine başarı ile uygulanmıştır. Bunlara en iyi örneklerden birisi ise 2006 yılında Hollanda demiryolları için önerilen tren çizelgesinin Hollanda demiryollarına Franz Edelman ödülünü kazandırmasıdır (Huisman, et al., 2005). Bu yöneylem yöntemlerini kullanan paket programlarından birisi olan TURNI, yıllık planlarda standart ekip eşleştirmeleri için kullanılır (Abbink et al., 2005).

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

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

Demiryolu işletmeciliğinde planlama süreci temel olarak beş aşamadan oluşmaktadır. Bunlar;

- Tren seferleri çizelgesi oluşturmak

- Uygun lokomotif ve vagon bileşimi oluşturmak
- Tren rotalama
- Ekip eşleştirme
- Ekip atama

Bu çalışmada yukarıda yazılan planlama sürecinin dördüncü ve beşinci aşamaları ele alınmış olup ilk üç aşamaya ilişkin mevcut planlamalar kullanılmıştır. Burada istisna planlama sürecinin üçüncü aşaması olan tren rotalama için mevcut tren çizelgesi değil TCDD'nin uygulamaya koymayı düşündüğü yeni çizelge üzerinde çalışmalar yürütülmüştür. Ekip eşleştirme ve atama problemi olarak adlandırılan, TCDD Eskişehir Depo Müdürlüğü'ne ait tren seferlerine, uygun eşleştirmeleri gerçekleştirebilmek için bir sütun oluşturma algoritması kullanılmıştır. Çalışmada, her olası iyi ekip eşleştirmesine bir maliyet değeri atanarak, tüm tren seferlerini en az bir kere kapsayan en düşük maliyetli ekip eşleştirmeleri kümesi elde edilmiştir.

Sütun oluşturma algoritması ile problem ana problem ve alt problem olmak üzere iki kısma ayrılır. Ana problem, ekip çizelgeleme probleminin en yaygın modelleme türü olan küme kapsama problemidir. Alt problem ise tren seferlerinin düğümlerle, tren seferleri arasındaki seyir ve mola sürelerinin ise oklarla ifade edildiği bir şebekedeki en kısa yol problemidir. Ana problemde her bir kısıt bir tren seferine karşılık gelmektedir. Ana problem ve alt problem ardışıklı olarak çözülmüştür. Ana problemin çözümünden elde edilen kısıtlara ilişkin ikil değerler alt problemin amaç fonksiyonunda kullanılmıştır. Alt problem ile her iterasyonda en küçük indirgenmiş maliyetli eşleştirme bulunarak ana probleme eklenmiştir. En küçük indirgenmiş maliyetli bir eşleştirme bulunmadığında algoritma sonlandırılmıştır. Sütun oluşturma algoritması sonucunda elde edilen amaç fonksiyonu değeri en iyi çözümü vermektedir dolayısıyla elde edilen ekip eşleştirmesi de en iyidir.

Ekip eşleştirme sürecinde elde edilmiş olan sonuçlar çalışmanın ikinci aşaması olan ekip atama kısmında girdi olarak kullanılmıştır. Literatürde “crew assignment” yada “crew rostering” olarak isimlendirilen problemin çözümü için yöneylem

uygulamaları veya sezgisel yaklaşımlardan oluşan çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu çalışmada ekip atama problemine kısa sürede çözüm üretebilmek adına rassal atama yöntemi kullanılmıştır. Söz konusu rassal atama problemi için bir karar destek uygulaması olarak DELPHI programlama dili ile program yazılmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde demiryolu işletmeciliğinde planlama süreci ve bu süreçte alınması gereken kararlar anlatılmış, sürecin beş temel aşaması açıklanmıştır. Bu beş aşamadan ikisi olan demiryolu ekip eşleştirme ve ekip atama problemlerinin önemi ve neden seçildikleri de bu bölümde vurgulanmıştır.

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

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

Beşinci bölümde bu tez çalışması için yapılan literatür araştırmasına yer verilmiştir.

Altıncı bölümde, çalışmada problemin çözüm yöntemleri olarak kullanılan sütun oluşturma yöntemi ve rassal atama yöntemleri açıklanmış, algoritmaların çalışma mantıkları ve sağladıkları faydalar üzerinde durulmuş, uygulama alanları ve demiryolu ekip çizelgeleme problemine çözüm yöntemi olarak seçilmesinin nedenleri açıklanmıştır. Daha sonra ekip eşleştirme probleminin GAMS paket programı ve ekip atama probleminin de DELPHI programlama diliyle yazılan rassal personel atama programı ile çözümüne yer verilmiştir. Son bölümde ise sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

BÖLÜM 2

DEMİRYOLU İŞLETMECİLİĞİNDE PLANLAMA

Avrupa birliği yönergeleri çerçevesinde, Avrupa demiryolları altyapı şirketleri ve taşımacılık şirketleri olarak yeniden yapılandırılmaktadır. Altyapı şirketleri ve dolayısıyla altyapı yatırımları devlet tekelindedir. Buna karşı tren işletmeciliği ise kullanılan demiryolunun ücretinin ödenmesi kaydı ile özel şirketler tarafından da yapılabilecektir. Diğer bir ifade ile tren işletmeciliği özelleştirilmektedir (Caprara et al., 1997).

Özelleştirmelerle birlikte ulaştırma pazarındaki rekabet giderek artmaktadır. Yoğun rekabetten dolayı demiryolu şirketleri müşterilerine karşı belirli bir hizmet seviyesine erişmek zorundadırlar. Örneğin Hollanda'da özel demiryolu şirketleri hükümetle belirli bir kalitede hizmet vereceklerine ve tren seferlerinde çok aşırı gecikmelere neden olmayacaklarına dair sözleşmeler imzalamaktadırlar. Söz konusu şartları yerine getirememeleri durumunda tren işletme haklarının ellerinden alınmasına kadar uzanan çeşitli yaptırımlara maruz kalmaktadırlar. Bu yüzden şirketlerin çok iyi planlamalar yapması büyük önem taşımaktadır (Huisman and Wagelmans, 2006).

Demiryolu işletmeciliğinde planlama süreci birbirine bağımlı ve uğraştırıcı birçok planlama probleminden oluşur. Tren seferleri, personel planlama, alt yapı ve üst yapı bakımı, çeken-çekilen araç bakımı, yeni yatırımların planlanması, satın alma ve ekiplerin eğitilmesi bunlardan birkaçı olarak sayılabilir. Her planlama probleminin kendine has özellikleri, karmaşıklıkları ve amaçları vardır. Planlama sürecini desteklemek için bu problemlerin her birine ayrı çözüm yaklaşımları önerilebilir.

Çeşitli sebeplerden kaynaklanan ilave trenler, yollardaki bakım çalışmaları veya sürat sınırlamalarından dolayı her gün tren çizelgelerinde bir sürü küçük değişiklikler meydana gelebilir ancak bu değişiklikler genellikle çeken çekilen araçlar veya ekip çizelgelerini değiştirecek boyutlarda değildir (Huisman, 2007).

Demiryolu işletmeciliğinde, bir tren seferi gerçekleştirmeden önce birçok karar verilmek zorundadır. Trenlerin hangi iller arasında çalıştırılacağı, hangi tür lokomotif veya dizi kullanılacağı (elektrikli lokomotif, dizel lokomotif, elektrikli dizi), hangi ekiple (makinist, yrd. makinist), hangi tren görevlileriyle (tren şefi ve kondüktör) gerçekleştirileceği demiryolu işletmeciliği planlama aşamasında verilmesi gereken kararlardandır. Bu kararlar planlama sürecinin aşamaları olarak da dikkate alınabilmektedir.

Demiryolu çalışanları, bu planlama aşamalarında alınması gereken kararları eş zamanlı ya da bütünlük olarak çözmenin zor olduğunu farkına varmışlardır. Bu nedenle planlamayı aşamalara ayırmışlardır. Bu planlama sürecinde demiryolları ilk olarak tren seferleri çizelgesini oluşturmak için hangi iller arasında ve ne zaman tren seferi konulacağını kararlarını vermek zorundadır. Bir sonraki aşamada, ekiplerinin hangi tren seferleri sıralamasını gerçekleştireceği kararı verilir. Bu aşamada tüm tren seferlerine birer ekibin atanmış olması kısıtı önem taşımaktadır. Son aşamada ise ekiplere, hangi makinistlerin, yardımcı makinistlerin ve diğer tren görevlilerinin atanacağı kararları verilir. Tren üzerinde üç ayrı personel grubu görev yapmaktadır. Bunlar; tren şefi, makinistler ve kondüktörlerdir. Bu çalışmada sadece makinist çizelgelemesi ve ataması üzerinde durulmuş olup bunların dışında kalan personeller için herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Bundan sonraki çalışmalarda tren şefleri ve kondüktörlerin çizelgeleme ve atama problemleri de önerilen bu yöntemlerle yapılabilir. Demiryolu işletmeciliği planlama süreci aşamaları ayrıntılı olarak aşağıda açıklanmıştır.

2.1. Tren Seferleri Çizelgesi Oluşturma

Sürecin ilk aşamasında TCDD, gerçekleştireceği tüm tren seferlerini içeren bir çizelge oluşturmak zorundadır. Bu çizelgeler demiryolu terminolojisinde “livre” olarak adlandırılmaktadır. Livreler yıllık olarak hazırlanmakta olup TCDD'nin yıl içerisinde çalıştıracığı tüm trenleri, kalkış istasyonundan itibaren varış istasyonuna kadar tüm ara istasyonlardaki varış ve hareket saatleri de dahil olmak üzere hazırlanır. Ayrıca trenlerin buluşma ve öne geçmeleri de bu çizelgelerde yer almaktadır. Bir tren seferinin, kalkış

istasyonundan varış istasyonuna kadar geçen süre “tren seyir süresi” olarak adlandırılır. Dolayısıyla, bu aşamada yapılması gerekenler tren seferlerine ait bu yer ve zaman bilgilerine karar vermektir. Başlangıçta oluşturulan çizelge, planlama sürecinin sonuna kadar birçok değişikliğe uğrayabilmektedir. Ancak sene başında onaylanan livreler üzerinde değişiklik çok sık yapılmaz. Değişiklikler genellikle özel veya ihtiyati trenlerin sefere konulması veya livrede görünen bazı trenlerin seferden geçici olarak kaldırılması şeklinde gerçekleşmektedir. TCDD’de livreler SIEMENS tarafından geliştirilmiş olan ROMAN programı aracılığı ile oluşturulmaktadır.

2.2. Uygun Lokomotif ve Vagon Bileşimi Oluşturma

Birinci aşamada tren çizelgesi oluşturulduktan sonra çizelgeyi gerçekleştirebilmek için kaynakların nasıl verimli bir şekilde kullanılacağına karar vermek gerekmektedir. Bu aşamada tren seferlerine uygun lokomotif ve vagon seçimi yapılmaktadır. Trenin sefere konulacağı güzergâhın, elektrikli tren işletmeciliğine açık olup olmaması ve güzergâhın eğim durumu da bu planlamayı etkilemektedir. Elektrikli tren işletmeciliği yapılan bölgelerde hem elektrikli lokomotif hem de dizel elektrikli lokomotif ile tren teşkil edilebilir. Her iki lokomotifin de maliyeti farklıdır bu husus da planlamada dikkate alınmaktadır. Ayrıca lokomotiflerin hangi bölgede ne kadar yük çekebileceğine ilişkin uyulması ve planlamada dikkate alınması gereken kurallar vardır. Planlama sürecinde yolcu kapasiteleri de göz önünde bulundurulmaktadır. Eğer çok az talebi olan bir tren seferine yüksek yolcu kapasiteli bir katar atandıysa, bu gereksiz yere katlanılan yüksek sabit katar maliyeti ve yakıt israfı oluşturur. Diğer taraftan yüksek yolcu talebi olan bir sefere, çok küçük bir katar atanması durumunda talep karşılanamayacağından dolayı müşteri memnuniyetsizliği ve akabinde müşteri kaybı yaşanabilir.

İkinci aşama olan doğru lokomotif ve vagon bileşimi sağlamanın amacı en yüksek geliri elde edebilmek için kapasite ve talep uyumunu başarmaktır.

2.3. Tren Rotalama

Her bir sefer, uygun bir lokomotif ve vagon bileşimi atandıktan sonra, aynı dizi tarafından gerçekleştirilecek seferler belirlenmek zorundadır. Bu aşamada ilgili işyerinin envanterindeki her bir dizi gerçekleştirilmesi gereken sefer sıralaması belirlenir. Tren rotalama problemi, bakım kısıtlarını karşılayacak ve gelirleri enbüyükleyecek şekilde trenlerin rotalanmasını içerir. Bir tren rotası, genellikle aynı istasyonda başlar ve sonlanır.

2.4. Ekip Çizelgeleme (Eşleştirme)

Önceki aşamalarda elde edilen tren çizelgesi, katar atamaları ve kataradaki araç rotaları, ekip çizelgeleme aşaması için bir girdi oluşturmaktadırlar. Ekip çizelgeleme problemi, çizelgedeki her tren seferinin ekip gereksinimini karşılayacak en düşük maliyetli ekip eşleştirmeleri kümesini bulmayla ilgilidir. Bir tren seferinin gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan ekip gereksinimi, tren üzerinde olması gereken demiryolu personeli anlamına gelmektedir. Bunlar tren şefi, makinistler ve kondüktörlerdir. Bu ekip gereksinimleri, katar tipinden bağımsızdır.

Her ekip tipi ya da her genel kategorinin içindeki farklı ekip sınıfları için ekip çizelgeleme problemi ayrı ayrı çözülür. Problem, belirli bir lokomotif tipini kullanmak üzere yetkilendirilmiş makinistler için ya da belirli kıdeme sahip tren görevlileri için en düşük maliyetli ekip eşleştirmeleri kümesini bulma problemine dönüşebilir. Bu durumda sadece belirli bir lokomotif tipiyle ya da belirli kıdeme sahip tren personeli ile gerçekleştirilecek tren seferlerinin probleme dâhil edilmesi gerekmektedir. Ekip çizelgelemede amaç, önceden belirlenen bir tren seferi çizelgesindeki tüm seferleri tam olarak bir kere kapsayan en düşük maliyetli ekip eşleştirmeleri kümesini bulmaktır. Bir personel üssünde başlayan ve sonlanan, bir tren seferinin varış şehrinin bir sonraki tren seferinin kalkış şehri ile uyuştugu bir tren seferleri sıralaması, eşleştirme olarak adlandırılmaktadır. Her eşleştirmenin kendisi ile ilişkili bir maliyet değeri vardır. Her eşleştirmeye bir ekip atanacağından, her tren seferi tam olarak bir eşleştirme tarafından

kapsanmalıdır. Bir önceki aşamada olduğu gibi çok sayıda zorunluluk ve kısıt, bu aşama süresince de sağlanmalıdır.

2.5. Ekip Atama

Ekip atama aşamasında, makinistler, yardımcı makinistler, tren şefi ve kondüktörlerin bireysel olarak ekiplere atanmasıyla ilgilenilir. Ekip atama genellikle iki şekilde gerçekleşir: İlkinde sözleşme kurallarına uyan aylık eşleştirmeler oluşturulur ve makinistler bu eşleştirmeleri kıdemlerine göre sırasıyla seçebilirler. İkincisinde ise makinistler çizelgede önem verdikleri niteliklere puan ya da ağırlık verirler ve böylece her makinist için kıdemine göre en iyi çizelge oluşturulur. Makinistler, kıdemlerine ya da diğer hususlarına göre oluşturulan çizelgeler üzerinde öneri getirebilirler. Çoğu demiryolunda makinistler hangi eşleştirmeyi gerçekleştirdiklerine bakılmaksızın maaşlı olarak çalışmaktadırlar.

Bu aşamada demiryolunun aylık ihtiyaç duyduğu tren üstü personel sayısı da tam olarak hesaplanabilir. Burada oluşturulan çizelge de, önceki iki aşamaya benzer olarak, çok sayıda kısıtlı karşılamalıdır.

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

Çalışmanın bundan sonraki kısmında ayrıntılı olarak açıklanacak olan ve çalışmanın konusunu da oluşturan demiryolu ekip çizelgeleme ve ekip atama problemleri, literatürde de pek çok araştırmacının ilgisini çeken bir problem türleri olarak ortaya çıkmaktadır.

BÖLÜM 3

DEMİRYOLU EKİP ÇİZELGELEME VE EKİP ATAMA

Çizelgeleme ve atama problemi havayolu, demiryolu ve karayollarında “ekip çizelgeleme” veya “ekip atama” olarak adlandırılır. Bunların çözüm yöntemleri olarak talep modelleme (demand modelling), yapay zeka yaklaşımları, kısıtlı programlama, meta sezgiseller veya matematiksel programlama yaklaşımlarının kullanıldığı görülmektedir (Ernst et al., 2004).

Çizelgeleme problemi personelin çalışma günlerini, yasal gereklilikler ve personel/yönetim anlaşmalarıyla emredilen ve çalışan organizasyonun yedi günlük çalışma haftası boyunca hizmetin devamını sağlayacak atamalarla ilgilidir. Çizelgeleme problemi, bir personel çizelgesinde her personelin çalıştığı ya da çalışmadığı günleri gösterir ve günlük personel ihtiyacını karşılayacak gerekli işgücü miktarını sağlar. Amaç, uygun sayıda personeli en küçük işgücü maliyeti ile yerleştirmektir (Sarucan, 1999).

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

Personel çizelgeleme ve personel atama, işletmelerin mal ve hizmetlerini sağlayabilmek için çalışan personelinin çalışma zamanlaması sürecidir. Bu sürecin ilk aşaması talep edilen hizmeti sağlayacak şekilde istenilen özellikteki çalışan sayısının belirlenmesini içerir. Çok kısıtlı ve karmaşık problemlerde en iyi çözümü bulmak ayrıca, maliyetleri en küçükleyen, çalışanların tercihlerini göz önüne alan, nöbetleri

çalışanlara eşit olarak dağıtabilen ve tüm çalışanlarla ilgili artan kısıtları memnun edebilecek en iyi çözümleri belirlemek oldukça zordur (Ernst et al., 2004).

Makinelerin ya da kaynakların sayısı, yapılandırmaları ve karakteristikleri, otomasyon seviyeleri, malzeme taşıma sistemleri tipleri gibi pek çok faktör, üretim ve hizmet sistemlerini belirlemekte ve bu faktörler arasındaki farklılıklar, çok sayıda çizelgeleme modeli olarak ortaya çıkmaktadır.

Personel çizelgeleme, bir örgütün ürün ya da hizmetine olan talebi karşılayabilmek için gerekli personelin iş çizelgelerini oluşturma sürecidir. Bu sürecin ilk kısmı, hizmet talebini karşılayabilmek için gereken belirli becerilere sahip personel sayısını hesaplamayı içerir. Farklı zamanlarda gereken personel seviyelerini karşılayacak şekilde bireyler vardiyalara atanır ve sonra da personele her vardiya için görevler atanır. Süreç boyunca ilgili işyeri anlaşmalarıyla ilişkili tüm mevzuat göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu tip çok kısıtlı ve karmaşık problemlere iyi sonuçlar elde etmek zordur ve maliyeti enküçükleyen, çalışanların isteklerini karşılayan, vardiyaları çalışanlar arasında düzgün dağıtan ve tüm işyeri kısıtlarını karşılayan en iyi çözümler bulmak daha da zordur (Çankaya ve Arıkan, 2009).

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

Personel çizelgeleme ve atama yöntemleri birçok alana uygulanmıştır. Bunlardan bazıları ulaştırma sistemleri (havayolu ve demiryolu gibi), sağlık sistemleri, acil sistemler (polis, ambulans ve itfaiye hizmetleri gibi), arama merkezleri ve oteller, restoranlar ve perakende gibi hizmet organizasyonlarıdır. Literatürdeki uygulamaların

çoğu ulaşım sistemlerinde ekip çizelgeleme ve atama, sağlık sisteminde hemşire çizelgeleme ve çeşitli hizmet sistemlerinde tur çizelgeleme şeklinde olmaktadır (Ernst et al., 2004). Tüm bu uygulamaların ortak özellikleri şunlardır:

- Her görevin, başlangıç zamanı, başlangıç yeri ve bitiş zamanı, bitiş yeri ile tanımlanarak geçici ve kalıcı özellikler birlikte ele alınır.

- Çalışanlar tarafından gerçekleştirilmesi gereken tüm görevler belirli bir zaman çizelgesinden (uçak, tren, otobüs ya da metro) belirlenir. Görevler en küçük elemanlardır ve uçak, tren ya da otobüs yolculuklarının ayrışımından elde edilirler.

Bir görev, havayolunda bir uçak seferi, bir tren seyahatinde ardışık iki ya da daha fazla bölüm arasındaki yolculuk, ya da bir otobüs hattında ardışık iki ya da daha fazla durak arasındaki yolculuk olabilir.

Ekip eşleştirme problemleri şirketler ya da ülkeler açısından kurallar ve maliyetlere bağlı olarak farklılık gösterse de ana özellikleri benzerdir. Eşleştirmenin tersine ekip atama farklı pek çok yaklaşımla ele alınabilir. Amaç yaşam kalitesi ölçütünü dikkate alarak maliyetlerin enküçüklenmesidir. Havayollarında farklı atama prensipleri kullanıldığı gibi, diğer ulaştırma sistemlerinde bunları kombine eden esnek sistemler de uygulanmaktadır (Kohl and Karisch, 2004).

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

Moudani et al., (2001) ekip üyelerinin memnuniyetini arttıracak ekip atama problemi üzerine iki amaçlı yeni bir matematiksel model önermişlerdir. Ana amaç ekip operasyon maliyetlerinin azalması, ikincil amaç ekip üyelerinin memnuniyetini

arttırmak olarak alınmıştır. Sezgisel yaklaşımı genetik algoritmalarla birleştirerek maliyetleri düşürecek çözümler aramışlardır.

Eğer Atama problemi bir “Ulaştırma- Transportation” problemi olarak ele alınırsa (ki aslında Atama problemi, Ulaştırma probleminin satır sayısının sütun sayısına eşit olduğu ve sağ taraf değerlerinin 1 olduğu özel bir halidir), o zaman simplex yöntemin doğrudan maliyet matrisi üzerindeki uygulaması olan “Ulaştırma Tekniği” (Transportation Technique) ile problemi çözmek mümkündür. Bu durumda sadece $(m \times n)$ boyutlarında bir matris üzerinde işlemler yürütülecektir. Bununla beraber Ulaştırma Tekniği ile çözüm yapılırken bir sorunla karşı karşıya kalınacaktır. Bilindiği gibi Ulaştırma Tekniği’nde, önce başlangıç temel uygun çözüm bulunur. Bu amaçla Kuzey Batı Köşesi Yöntemi, Vogel Yaklaşım Yöntemi veya En Küçük Maliyet Yöntemi gibi teknikler kullanılır (Öner ve Ülengin, 2003).

Genel olarak personel çizelgeleme süreci iki alt problemden oluşur bunlar; ekip çizelgeleme (eşleştirme) ve ekip atamadır. Ekip çizelgeleme problemi tren seferleri çizelgesindeki tüm seferleri sağlayan aynı depoda başlayan ve sonlanan en düşük maliyetli olası eşleşmelerdir. Söz konusu eşleştirmeler, ekip atama probleminin girdileridir. Atama probleminde bu girdiler kullanılarak eşleştirilen ekiplerin içerisinde hangi personellerin yer alacağı belirlenmektedir.

3.1. Problem Kategorileri

Günlük, haftalık ve ileri tarihli olmak üzere üç tip ekip eşleştirme problemi vardır. Bunlar aşağıda açıklanmıştır:

3.1.1. Günlük problem

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

3.1.2. Haftalık problem

Zaman çizelgesinin kendini haftanın her günü tekrarladığı varsayımına dayanmaktadır. Haftalık problem genellikle ilk olarak günlük problem çözüldükten sonra ele alınır. TCDD’de çoğunlukla haftalık istisnaları uydurmak için günlük problemi çözdükten sonra yeni ayarlamalar yapılır. Bu genellikle iyi bir haftalık çizelgeyle sonuçlanır. Ancak bazı yabancı demiryolu işletmelerinde haftalık istisnalar çok fazladır, bu nedenle günlük problemi değiştirerek elde edilen çözümler en iyiden uzak sonuçlar verebilmektedir.

3.1.3. İleri tarihli problem

İleri tarihli problem için zaman eksenini genellikle bir aydır. Bu problemi çözmek için öncelikle haftalar arasındaki farklılıklar dikkate alınmalıdır. Günlük çözümün haftalık çözüm için uygun bir çözüm olmama ihtimali olduğu gibi, haftalık çözümü de ileri tarihli çözüme genişletmek tatiller ya da zaman çizelgesi değişikliklerine bağlı olarak mümkün olmayabilir. Ay içerisinde bazı haftalar süresince gerçekleşen tren iptallerine ya da trenlerin ilavelerine bağlı olarak zaman çizelgesinde değişiklikler ortaya çıkabilmektedir. İleri tarihli problem hem günlük hem de haftalık probleme göre daha uğraştırıcı bir problemidir. Bu problemde günlük ve haftalık problemlerin

düzenlilik özelliği olmayabilir ve bu durum problem boyutunda bir patlama ile sonuçlanabilir. Ayrıca haftalık problemi, aylık problemin çözümünde kullanmaya çalışmak kalitesiz çözümlere götürebilir.

Ekip planlama süreci günlük ekip eşleştirme eniyileme problemiyle başlar. Daha sonra haftalık ve aylık eşleştirmeler tamamlanır. Eşleştirme bir ekip üyesi için aynı ekip üssünde başlayan ve biten seferler dizisini ifade eder. Her ay için tüm seferlerin kapsandığı eşleştirmeler bulunduktan sonra ekip üyelerinin seferlere atanma süreci tamamlanır (Ulucan ve Eryiğit, 2004; Chu et al., 1997).

Yukarıda açıklanan bu üç problem tipi arasında, en çok çözülen günlük ekip eşleştirme problemidir. Literatürde yapılan çalışmaların büyük bir kısmı da ekip eşleştirme problemini günlük olarak ele alarak çözmüştür. Planlama aşamasında oluşan aşırı maliyetlerin çoğu günlük atama probleminden kaynaklanır. Bu nedenle tasarruflar açısından, günlük eşleştirmeleri eniyilemek bu süreçteki en önemli aşamadır ve yöneylem araştırması teknikleri sayesinde ekip maliyetlerini azaltmada büyük bir fırsat sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında da günlük ekip eşleştirme problemi çözülmüştür. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ileride yapılması düşünülen diğer çalışmalarda, haftalık veya ileri tarihli problem çözümlerinde de referans olarak kullanılabilir.

BÖLÜM 4

EKİP ÇİZELGELEME VE EKİP ATAMADA YAKLAŞIMLAR

Çizelgeleme problemlerinin çözümü için kullanılan algoritmalar; kesin ve sezgisel algoritmalar olarak ikiye ayrılmaktadır. Kesin algoritmalar çok fazla bilgisayar zamanına ihtiyaç duymaktadır ve karmaşık problemlerde çözüm bulmak imkânsız hale gelebilmektedir. Literatüre bakıldığında, çizelgeleme ile ilgili çalışmaların bilgisayarın gelişmeye ve yaygınlaşmaya başladığı 1970'li yıllardan sonra yoğunlaştığı görülmektedir. Buradan anlaşılacağı üzere teorik çalışmalar pratikte bilgisayar yardımıyla çözülecek şekilde yapılmaktadır.

Bilgisayarların performansının artmasıyla birlikte ekip planlama problemlerinin çözümü için çeşitli eniyileme yaklaşımları denenmiştir. Örnek olarak; matematiksel programlama yöntemleri (büyük ölçekli doğrusal programlama ve tamsayılı programlama), yapay zeka yöntemleri (mantıksal programlama, benzetimli tavlama, yapay sinir ağları, bulanık mantık ve genetik algoritmalar), sezgisel yaklaşımlar ve bunların kombinasyonları verilebilir (Moudani et al., 2001).

4.1. Matematiksel Programlama Yöntemleri

Bu problemlerin çözümünde kullanılan genel modeller; tamsayılı programlama, 0-1 tamsayılı programlama, karışık tamsayılı programlama ve doğrusal programlamadır.

4.1.1. Dantzig-wolfe ayrıştırması

Zor doğrusal modeller için klasik çözüm yaklaşımı olan Dantzig-Wolfe ayrıştırması, büyük ölçekli modelleri çözmek için önemli bir araçtır. Büyük

ölçekli modeller, standart simpleks algoritması kullanıldığında en iyileme modellerinin kapasitesini aşabilen ve çözülemeyen problemler haline gelebilir (Erwin, 2003).

Dantzig-Wolfe yaklaşımında doğrusal model, hemen hemen bağımsız kısımlardan oluşan alt problem ve alt problemleri bağlayan temel probleme ayrıştırılır. En iyi sonucu elde edebilmek için temel ve alt problem ardışık olarak birçok kez çözülür. İlk olarak temel problem çözülür, bunun sonuçlarından yararlanılarak her alt problem için amaç fonksiyonu oluşturulur. Daha sonra bu alt problemler çözülür ve çözümlerden elde edilen yeni sütunlar temel probleme ilave edilir. Bu süreç, en iyilik koşullar sağlanıncaya kadar devam eder (Dantzig, 1963).

4.1.2. Sütun türetme algoritması

Büyük ölçekli tamsayılı ve doğrusal programlama problemlerinin çözümünde sıklıkla kullanılan yöntemlerden birisidir. Sütun türetme yaklaşımı, gerçekte tekrarlanan bir süreçtir. Bu sürecin her bir adımında problemin doğrusal gevşetmesi küçük sayıda değişkenle çözüme gitmektedir. Doğrusal programlama probleminin ikil çözümüne bağlı olarak, programdaki değişkenlere karşılık gelen yeni elverişli sütunlar sadece ve sadece mevcut çözüme anlamlı geliştirme şansı sağlayacak biçimde bu sütunlara karşılık gelen azaltılmış maliyetlerin negatif olması ile oluşur. Bu yeni sütunların oluşumu veri yapısının tüm olasılıklarının açıkça gösterilmesi, yeni elverişli olasılıkların yaratılması ve hızlı bir şekilde tanımlanmasını kolaylaştırmak için zaman ve işlemci hafızası gerektirir (Papoutsis et al., 2003).

Lavoie et al., (1988) ile Crainic and Rousseau, (1987) ekip planlama problemini küme kapsama problemi olarak ele alarak çözümünde sütun türetme yaklaşımını kullanmışlardır.

Anbil et al., (1992) ekip planlama problemini küme ayrıştırma problemi olarak ele almış ve büyük ölçekli problemlerin çözümü için sütun türetmede etkili olan SPRINT yaklaşımını geliştirmişlerdir.

4.1.3. Dal-sınır algoritması

Dal-sınır algoritması tamsayılı doğrusal programlama modellerini çözmek için geliştirilmiş bir algoritmadır (Ulucan, 2004). Dal-sınır algoritmasında sistematik bir şekilde en iyi çözüm elde edilir. Örneğin bir enküçükleme probleminde ilk basamak amaç fonksiyonuna bir üst sınır koymaktır. Bu sınırın altında bir amaç fonksiyonu değeri bulmak mümkün olmalıdır. İkinci basamakta çözüm setinin alt kümelere ayrılması yapılır. Her alt küme için bir alt sınır veya en küçük amaç fonksiyonu değeri tespit edilmek suretiyle problem çözülür.

Stojkovic et al., (1998)'de ekip planlama problemini küme ayrıştırma problemi olarak ele almış ve dal-sınır araştırma ağacı içine sokulmuş sütun türetme yöntemini geliştirmişlerdir. Çözüm süresi ve amaçlar açısından iyi sonuçlara ulaşılmıştır. Problemin büyüklüğüne bağlı olarak çözüm süresinin nasıl değişeceğini anlamak için farklı senaryolar üretilip karşılaştırmalar yapılmıştır.

4.2. Sezgisel Algoritmalar

Çizelgeleme problemleri, en iyi çözümün bulunmasının zor olduğu problemlerdendir. M makine ($m > 2$) ve n işin olduğu bir durumda $(n!)^m$ kadar atama yapılabileceği için doğrusal programlama veya benzeri en iyi sonucu veren yöntemler kullanmak ya çok zaman almakta ya da çözüm sağlayamamaktadır. Bu gerekçeden dolayı çizelgeleme problemlerinde sezgisel yöntemlerin kullanılması daha uygun olmaktadır. Bu yöntemler sayesinde en iyi çözüm bulunamasa da, uygun çözüm kümesi içinden en iyiye yakın bir çözümün seçilmesi mümkün olabilmektedir.

4.2.1. Genetik algoritmalar

Al-Sultan et al., (1996), Genetik Algoritmaları (GA) "evrim sürecini taklit eden arama teknikleri" olarak tanımlamaktadır. Bir GA, mümkün çözümlerin kodlandığı dizilerin (kromozom) bir kümesi (popülasyon) ile biyolojik özelliği taklit eden genetik operatörlerden (çaprazlama ve mutasyon, vb.) oluşur. Rassal ya da belirlenen koşullara göre elde edilen başlangıç popülasyonuna genetik operatörlerin uygulanması ile biyolojik gelişim süreci taklit edilmek sureti ile probleme çözüm aranır. GA, sezgisel bir yöntem olduğu için dikkate alınan probleme en iyi çözümü bulamayabilir, ancak makul zaman aralığında en iyi çözüme yakın çözümleri elde edebilir (Goldberg, 1989). Başlangıçta doğrusal olmayan eniyileme problemlerine uygulanan GA, son 20 yıldır çizelgeleme, şebeke tasarımı ve güvenilirliği, gezgin satıcı, kargo yükleme ve araç rotalama gibi değişik mühendislik problemlerine de başarıyla uygulanmıştır (Karaoğlan ve Altıparmak, 2005).

4.2.2. Sinir ağları

Yapay sinir ağları, insan beyninden esinlenerek geliştirilmiş, ağırlıklı bağlantılar aracılığıyla birbirine bağlanan ve her biri kendi belleğine sahip işlem elemanlarından oluşan paralel ve dağıtılmış bilgi işleme yapılarıdır. Başka bir deyişle, yapay sinir ağları, biyolojik sinir ağlarını taklit eden bilgisayar programlarıdır. Genel olarak, model seçimi ve sınıflandırması, işlev tahmini, en uygun değeri bulma ve veri sınıflandırma gibi işlerde başarılıdır (Elmas, 2003).

4.2.3. Çok ürünlü serim akış modeli

Çok ürünlü serim akış problemleri, ulaştırma, telekomünikasyon ve lojistik gibi endüstriyel alanlarda ortaya çıkan en iyileme problemlerinin modellenmesinde iyi sonuçlar verir. Çok ürünlü serim akış problemleri, bir serim boyunca en küçük maliyetle rotalanacak olan ürün kümesi tarafından tanımlanır. Pratikte ürünleri,

telekomünikasyondaki mesajlar, ulaşımdaki araçlar veya lojistikteki eşyaları temsil edebilir. Ürünler, ortak tesisleri paylaştığı için tek yalnız ürün problemleri bağımsız değildir. Bu yüzden, eniyilenmiş akışı bulmak için problem her ürünün birbiri ile ilişkisi dikkate alınarak çözülür. Her ürün bir veya birden fazla başlangıç düğümünden, bir veya birkaç varış düğümüne transfer edilebilir. Maliyet, ürün akışının dışbükey veya dışbükey olmayan fonksiyonudur ve tek akışlar tamsayı veya sürekli değer olmak üzere kısıtlandırılmış olabilir (Orhan, 2007).

4.3. Atama Problemi Yaklaşımları

Ekip eşleştirme ile karşılaştırıldığında akademik literatürde ekip atama problemine daha az önem verildiği ve gösterilen modellerin daha basitleştirilmiş olduğu görülmektedir. Ekip atamada maliyetlerin en küçüklenmesinin yanı sıra ekip üyeleri için yaşam kalitesi de önem kazanmaktadır. Amaç; etkin maliyet ve ekip memnuniyetinin birlikte iyileştirilmesidir (Kohl and Karisch, 2004; Barnhart et al., 2002; Stojkovic et al, 1998). Daha az önem verilmesine rağmen atama probleminin çözümü birçok değişik yolla elde edilebilir (Öner ve Ülengin, 2003).

4.3.1. Macar algoritması

Atama probleminin çözümünde en çok kullanılan yöntemlerden birisi Macar algoritmasıdır. Bu yöntemde maliyet matrisi her seferinde sistematik bir şekilde yeni bir indirgenmiş matrise dönüştürülerek çözüme gidilmektedir. Yöntem gereği indirgenmiş maliyet matrisindeki sıfır elemanlar en az sayıda çizgi ile kapatılmakta ve buna göre matris üzerinde işlem yapılmaktadır. Ancak problemin büyüklüğü arttıkça ve indirgenmiş maliyet matrisinde sıfır eleman sayısı çoğaldıkça, matristeki sıfır elemanlarını kapatmak üzere gereken en az sayıda çizgi sayısı ve bu çizgilerin nasıl çizilmesi gerektiği sorunu ortaya çıkar (Öner ve Ülengin, 2003).

Macar algoritması, Kuhn (1955) tarafından geliştirilmiş sade, kolayca anlaşılabilen ve son derece etkili bir çözüm yöntemidir. Macar algoritması dört adımda

çalışmaktadır. Birinci adımda, maliyet matrisinin her satırı için, satırdaki en küçük değere sahip elemanı satırdaki tüm elemanlardan çıkartılır. İkinci adımda, maliyet matrisinin her sütunu için, sütundaki en küçük değere sahip elemanı sütundaki tüm elemanlardan çıkartılır. Üçüncü adımda, matris üzerinde oluşan sıfır elemanlarını kapatmak üzere gerekli satır ve sütunların üzerine çizgi çekilir. En az sayıda çizgi kullanılmalıdır. Eğer kullanılan en az çizgi sayısı maliyet matrisinin boyutu olan (m) sayısına eşitse o takdirde en iyi çözüm bulunmuş demektir. Çizilen çizgi sayısı (m) sayısına eşit değilse dördüncü adıma geçilir. Bu aşamada, sıfır elemanlarını kapatmak için satır ve sütunlar üzerine çizilmiş çizgilerin kapatmadığı elemanlar arasından en küçük değere sahip olanı bulunur. Bu değer üzerinden çizgi geçmeyen tüm elemanlardan çıkartılır ve üzerinden iki çizgi geçen elemanlara toplanır. Yeni bir indirgenmiş matris elde edilmiştir. Tekrar üçüncü adıma dönülerek algoritma devam ettirilir.

4.3.2. Tabu arama

Tabu arama yönteminin işleyişinde ilk olarak, bir başlangıç çözümü seçilir. Sonra, bu çözümün komşuları (aday çözümler) bir komşuluk yapısıyla belirlenir. Komşu çözümler bir amaç fonksiyonuna göre değerlendirilir. Tabu olmayan en iyi komşu ya da aspirasyon ölçütünü sağlayan komşu, sonraki arama için yeni başlangıç çözümü olarak seçilir, yani çözüm uzayında bir noktadan diğerine taşınılır. Yapılan taşma tabu listesine eklenir. Daha sonra, taşınılan çözüm şimdiye kadar bulunan en iyi çözümle karşılaştırılır; eğer bu çözüm en iyi çözümden daha iyi ise bu yeni en iyi çözüm olarak saklanır. Bu işlem bir durdurma ölçütü karşılanıncaya kadar tekrarlanır (Geyik ve Cedimoğlu, 2001).

BÖLÜM 5

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Demiryolu ekip çizelgeleme için, problemi bir dizi alt probleme ayrıştırarak, küme ayrıştırmayı bir şebeke üzerinde gerçekleştiren bir yordam önermişlerdir (Ball and Roberts, 1985). Gamache et al., (2007) öncelik atamalı aylık bir ekip çizelgeleme problemini çözmek için, şebeke boyama ve tabu arama algoritması tabanlı bir yöntem kullanmışlardır.

Demiryolu endüstrisi için ekip çizelgeleme süreçleri havayolu endüstrisinden kat kat daha büyük olmasına rağmen sanki bu konuda bir yasaklama varmış gibi son dönemlere kadar yöneylem teknikleri demiryolu endüstrisinde yaygın olarak uygulanmadı. Bilgi işlem sektöründeki atılımlar sayesinde ancak son zamanlarda uygulama imkanı bulabildi (Abbink et al., 2005).

Bunun yanında ekip çizelgeleme problemlerine kesin çözümler elde edebilmeyi hedefleyen çok sayıda tam sayılı programlama algoritması da geliştirilmiştir. Hoffman and Padberg, (1993) havayolu endüstrisinde ortaya çıkan büyük çaplı küme ayrıştırma problemlerinin en iyi çözümü için bir dallandır ve kes yaklaşımı önermişler ve gerçek yaşam problemleri üzerinde uygulamışlardır. Chu et al., (1997) eşleştirmelerin bir altkümesinden oluşan kısıtlı küme ayrıştırma problemine, şebeke tabanlı bir dallanma sezgiseli uygulamışlardır. Sonuçlardan elde edilen hesaplamalardan bu yöntemle ekip maliyetlerinde iyileştirme sağlanabileceğini göstermişlerdir.

Birçok işletme doğru zamanda doğru çalışanın işe alınması ve yüksek iş tatminine ulaşması için doğru ücretlerinin belirlenmesinde karar destek sistemlerine ihtiyaç duymaktadır. Genellikle farklı endüstrilerin ve işletmelerin özelliklerinden dolayı personel çizelgeleme için özel matematiksel modeller ve algoritmalar geliştirilmektedir (Ernst et al., 2004).

Abbink et al., (2005) ekip çizelgeleme konusunda “Sharing sweet&sour” adını verdikleri, adaletli iş paylaşımı anlamına gelen bir model önermişlerdir. Söz konusu model çalışanlar, sendika ve demiryolu yönetimi tarafından kabul edildi. Çalışanların memnuniyet ve iş kalitelerinin artması ile birlikte demiryolunda dakiklik ve verimlilik artmıştır.

Şehir içi toplu taşıma sistemlerinde araç ve ekip çizelgelemeyi birleştirdikleri modele ekiplerin maaş sözleşmeleri ve şirket anlaşmalarını içeren kısıtları da dâhil ederek yeni bir model oluşturmuşlardır. Bir sütun oluşturma algoritması kullanarak problemin sürekli gevşetmesini elde ettikten sonra, tamsayılı bir çözüm elde etmek için dal-sınır yaklaşımı uygulamışlardır (Friberg and Haase, 1999).

Küme ayrıştırma matrisini kullanmadan küme ayrıştırma modelinin doğrusal programlama gevşetmesinin ikiline sezgisel bir çözüm bularak, ekip çizelgeleme problemine bir alt sınır hesaplamışlardır. İkili çözümleri, problemin bir dal-sınır algoritması ile çözülebilmesi için, modeldeki değişken sayısını azaltmada kullanılmışlardır (Mingozi et al., 1999).

Büyük çaplı 0-1 tamsayılı doğrusal programları, özellikle havayolu ve demiryolu ekip çizelgeleme problemlerini, çözmek için sezgisel tabanlı bir Lagrange gevşetme yaklaşımının başarısını araştırmışlardır. Bu yaklaşım, İsviçre Carmen Systems’in üretiminde kullanılan ve problemi değişkenlere ayırmayı temel alan orijinal algoritmanın ölçeklenebilir paralelleştirilmiş bir şeklidir (Alefragis et al., 2000).

Ekip çizelgeleme problemini, olası kesintileri dikkate almaksızın belirlenimci (deterministik) olarak modellemek yerine, kesintileri dikkate alan olasılıksal (stokastik) bir model geliştirmişlerdir. Bu bilgileri kullanarak daha iyi çözümler elde etmeyi ve gecikme etkilerini enküçüklemeyi amaçlamışlardır (Yen ve Birge, 2006).

Ekip çizelgeleme problemini, durağan-durum genetik algoritma ve bir yerel arama sezgiselini birleştiren melez bir algoritma kullanarak çözmüş ve gerçek yaşam problemleri üzerinde test etmiştir. Elde edilen sonuçları, dal-sınır ve dallandır ve kes algoritmalarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırmıştır (Levine, 1996).

Park and Ryu, (2006/b) metro ekibi çizelgelemede eşleştirmelerin eniyileme problemini çözmek için özel olarak tasarlanmış yeni çaprazlama ve mutasyon operatörleri kullanan bir genetik algoritma önermişlerdir. Yeni tasarlanmış genetik operatörlerle aramanın etkinliğini artırabilmek için, bir kromozomun açıklanmış ve açıklanmamış iki parçadan oluşması sağlanmıştır. Her iki parçadaki genler de evrim geçirmesine rağmen, yeni bir birey değerlendirildiğinde sadece açıklanmış parça kullanılmıştır. Açıklanmamış parçanın amacı, genetik operatörlerin uygulanmasıyla kaybolması olası bilgileri korumak ve böylece aramanın farklılığını sağlamaktır. Aynı yazarlar ekip eşleştirme eniyilemesi için önerdikleri yaklaşımla, ilk olarak çok sayıda eşleştirme oluşturup, daha sonra açıklanmamış genleri dahil eden bir genetik algoritma kullanarak eşleştirmelerin en iyi alt kümesini bulmuşlardır (Park and Ryu, 2006/a).

Cavique et al., (1999) Lizbon metrosunun ekip çizelgeleme problemi için geliştirilen bir karar destek sisteminin parçası olan bir tabu arama algoritması kullanmışlardır.

Xu et al., (2006) çok amaçlı çizelgeleme problemini çözmek için dinamik komşuluk tabanlı bir tabu arama algoritması tasarlamışlardır. Algoritma, farklı komşuluk değişimi tiplerini kullanarak çalışmaktadır.

Emden-Weinert and Proksch, (1999) ekip eşleştirme problemine bir tavlama benzetimi algoritması uygulamışlardır. Probleme özgü bir başlangıç çözümü kullanarak, kısıtları olabildiğince gevşeterek, tavlama benzetimini probleme özel başka bir yerel sezgiselle birleştirerek ve bunları bağımsız olarak çalıştırarak, programın çalışma zamanı ve çözüm kalitesinde iyileşmeler sağlanabileceğini göstermişlerdir.

Crawford et al., (2006) ekip eşleştirme probleminin çözümünde karınca kolonisi eniyileme algoritmasının başarısını ve karınca kolonisinin kısıt programlama tekniği ile melezlenmesini incelemişlerdir.

Ayrıştırma algoritmaları ve ayrıştırma algoritmasının özel bir bileşeni olan sütun oluşturma algoritmaları da ekip çizelgeleme literatüründe önemli bir yer tutmaktadır. Desaulniers et al., (1997/b) karışık tamsayılı programlama modelleri için kullanılan Dantzig-Wolfe ayrıştırma algoritması ile, ana problemi bir küme ayrıştırma modeli, alt problemi ise görev aralıklarını ifade ettiği bir çok ürünlü akış şebekesi olarak modellemişler ve doğrusal olmayan maliyetlerin yaklaşık değil kesin olarak yer aldığı bir maliyet fonksiyonu kullanmışlardır.

BÖLÜM 6

SÜTUN OLUŞTURMA ALGORİTMASI VE RASSAL ATAMA UYGULAMASI

Ekip çizelgeleme demiryolu planlamasındaki kapsamlı problemlerden biridir. Ekonomik boyutu ve etkisi nedeniyle demiryolu ekip çizelgeleme problemi, personel çizelgeleme uygulamalarının da en kapsamlılarından biridir. Yakıt maliyetlerinden sonra, personel maliyetleri TCDD için en büyük maliyet faktörlerinden birisidir. Personel maliyetleri demiryolunun kontrol edebileceği bir gider olduğu için, tren seferlerine etkin personel ataması demiryolu işletmeciliği planlaması açısından çok önemlidir.

Çizelgeleme personeli, bu görevi elle yapmanın zorluklarını fark etmişler ve ekip çizelgelemeyi yöneylem topluluğu içinde dikkate alınması gereken bir problem olarak görmeye başlamışlardır. Gopalakrishnan and Johnson, (2005) ekip çizelgeleme problemini matematiksel olarak modellemek ve bir eniyileme problemi olarak yorumlamak göreceli olarak kolaydır. Modeli etkin bir biçimde çözmek ve pratik bir ekip çizelgesi üretmek ise oldukça uğraştırıcı olabilmektedir.

Ekip çizelgeleme demiryolu şirketinin büyüklüğüne göre değişiklik göstermektedir. Küçük ölçekli demiryolu şirketleri için ekip çizelgeleme problemini çözmek, büyük demiryolu şirketlerine oranla daha kolaydır.

Bu tren seferlerini gerçekleştirmek için, demiryolu şirketi, ekiplere ihtiyaç duyacaktır ve her ekibi bir ekip eşleştirmesine ataması gerekecektir. Eşleştirme bir ekibin çizelge süresi boyunca gerçekleştirmesi gereken tren seferleri sıralamasıdır. Demiryolu ekip çizelgeleme probleminin amacı, tüm tren seferlerini tam olarak bir kere kapsayan en düşük maliyetli ekip eşleştirmeleri kümesini oluşturmaktır.

Çalışmanın bundan sonraki bölümlerinde sıklıkla kullanılacak olan bazı terimlerin açıklaması aşağıdaki gibidir.

Bir tren seferi; belirli bir şehirden başka bir şehre giden, kalkış ve varış zamanı ile seyir süresi belirli olan aralıksız bir tren seferini ifade eder.

Bir görev; personel için günlük iş değeridir.

Depo merkezi; Çizelgeleme yapılacak depo makinistlerinin ikâmet ettiği şehirdir. Tren seferlerini gerçekleştirecek olan ekiplerin, göreve Eskişehir'den başlayıp yine aynı şehirde görevlerinin son bulması gerekmektedir.

Bir görev süresi; birbirinden kısa dinlenme süreleri ile ayrılan birden fazla tren seferinin toplam süresini ifade eder.

Görev süresine dahil olan iş alma ve iş bırakma süresi; sırasıyla, makinistin görev aldıktan sonra trenin hareket saatine kadar geçen süre ile trenin varış saatinden itibaren makinistin görevi bırakmasına kadar geçen süreleri ifade eder.

Tren kullanım süresi; lokomotif kullanılan toplam saatlik değeridir.

Toplam görev süresi; kısaca iş alma ile iş bırakma süresi arasında geçen zamanların toplamıdır.

$$\text{Toplam Görev Süresi} = \sum(\text{Toplam Görev Süreleri} + \text{Toplam Kısa Dinlenme Süreleri} + \text{İş Alma ve İş Bırakma Süreleri}) \quad (6.1)$$

Bir eşleştirme; aralarında uzun (gece) dinlenme süreleri bulunan birden fazla görev süresi toplamı olarak tanımlanabilir. Her eşleştirme, personelin konumlandığı depo veya atölyede başlar ve biter. Ayrıca eşleştirmenin içerdiği, bir tren seferinin varış şehri, bir sonraki tren seferinin kalkış şehri ile uyuşmak zorundadır.

Kendi merkezinden uzakta geçen zaman (KMUGZ); bir eşleştirmedeki görev süreleri arasında bulunan gece dinlenmelerini içeren toplam zaman olarak tanımlanır. Başka bir deyişle eşleştirmede depodan veya atölyeden uzakta geçen toplam zamanı ifade eder (Park and Ryu, 2006).

$$KMUGZ = \sum \text{Toplam görev süreleri} + \sum \text{Uzun dinlenme süreleri} \quad (6.2)$$

Eşleştirme içinde ardışık iki görev süresi arasında gerçekleşen dinlenme süreleri uzun dinlenme, bir görev süresi içerisindeki ardışık iki tren seferi arasında gerçekleşen dinlenmeler ise kısa dinlenme olarak adlandırılmaktadır.

Bazı durumlarda eşleştirmede makinist lokomotif kullanan kişi olarak değil de yolcu olarak ta seyahat edebilir. Literatürde bu durum havayolu terminolojisinde “deadheading” demiryolu terminolojisinde ise “bilâ dönmek” olarak adlandırılmıştır. Genellikle bir personeli bir trende görevlendirilmek üzere ihtiyaç duyulduğu bir şehre götürmek ya da personelin kendi merkezine geri dönmelerini sağlamak için bu duruma başvurulur.

6.1. Yasal Zorunluluklar (Kısıtlar)

TCDD, ekip çizelgelerini oluştururken resmi yordamlara ve personel yönetmeliklerine uymak zorundadır.

Bu kısıtlayıcı kurallar, problemin boyutunun azalmasına yardımcı olmaktadır. Ancak en iyi ekip çizelgesini elde etmek problemini karmaşıklştırmaktadırlar. Bir ekip çizelgesinin geçerli bir çizelge olabilmesi için, içerdiği eşleştirmelerin ve eşleştirmelerin içerdiği görev sürelerinin yönetmeliklere uyması gerekmektedir.

Bir görev süresinin kanunlara uygun bir görev süresi sayılabilmesi için sağlaması gereken kısıtlar, genel olarak dinlenmeler ve toplam görev sürelerine ilişkin sınırlandırmalardır. Toplam görev süresi, tren kullanım süresi ve bir görev periyodunda

gerçekleşen tren seferi sayısı belirli bir üst sınırı aşmamalıdır. Her görev süresinin başlamasından önce ve her görev süresinin bitişinden sonra geçen süreler olan iş alma ve bırakma süreleri için de belirli bir en küçük ve en büyük değer söz konusudur. Bir eşleştirmenin uygun bir eşleştirme olarak adlandırılabilmesi için içerdiği görev süresi sayısı TCDD tarafından belirlenen bir en uzun görev süresi sınırını aşmamalıdır. Benzer şekilde eşleştirme, görev süreleri arasında gerçekleşen uzun dinlenme süreleri de belirli bir alt sınır değerinden büyük olmak zorundadır.

Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları personel yönetmeliği ve genel müdürlük emirlerine göre, bir görev süresi içerisinde harici merkezde en fazla istirahat süresi 720 dk. Bir görev süresi en fazla 15 saat 40dk. (940 dk.) olmalıdır. Bir görevde gerçekleşen toplam tren kullanım süresi ise en fazla 12 saat (720 dk.) olmalıdır. Günlük ekip eşleştirme probleminde eşleştirmeler bir görev periyodundan oluştuğu için, görev periyodu kısıtları aynı zamanda ekip eşleştirme kısıtları olmaktadır.

6.2. Maliyet Yapısı

Yasalar ve personel yönetmelikleri maliyetleri belirlemektedir. Ekip eşleştirme modeli sadece ekibin kendi merkezinden uzakta olduğu zamanın uzunluğuyla ve personelin yolcu olarak taşınmasıyla ilgili artan maliyetleri dikkate alır. Bu maliyetler, tren kullanım süresine ek maliyetlerdir. Yönetmeliklere uygun her eşleştirme için sabit olan yakıt masraflarının yanı sıra eşleştirmelerin ek maliyetlerinin temel sebepleri; görev süreleri içerisinde gerçekleşen kısa dinlenme sürerlinin sıklığı, uzun dinlenme süreleri ve personeli yolcu olarak taşıma maliyetleridir.

Eşleştirmenin maliyeti genellikle şu model kullanılarak hesaplanır:

$$Eşleştirme\ Maliyeti = Enb\{ Eşleştirme\ Görev\ Sayısı * EEGU, KMUGZ\ Faktör * KMUGZ, Toplam\ Görev\ Maliyeti\} \quad (6.3)$$

EEGU (eşleştirme en düşük garanti ücret); görev süresinin uzunluğuna bakılmaksızın bir eşleştirmedeki her görev için personele ücret ödenmesinin garantilendiği en az saat sayısı,

KMUGZ Faktör; kendi merkezinden uzakta geçen toplam zaman (KMUGZ) ile ilişkili bir katsayı,

Toplam Görev Maliyeti; eşleştirmedeki tüm görev sürelerinin maliyetleri toplamıdır.

Görev maliyeti eşleştirme maliyetininkine benzer bir model ile hesaplanır.

$$\text{Görev Maliyeti} = \text{Enb}\{\text{EGU}, \text{Toplam Görev Süresi Faktörü} * \text{Toplam Görev Süresi}, \text{Tren Kullanım Süresi}\} \quad (6,4)$$

Burada;

EGU (en düşük garanti ücret); bir görevdeki personel için ücretin garanti edilmiş en az saat sayısını,

Toplam Görev Süresi Faktörü; tren görev süresiyle ilişkili bir katsayısı,

Tren Kullanım Zamanı ise görev süresinde gerçekleşen gerçek tren kullanım süresinin toplam saatlik değerini ifade eder.

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

Görev süresinin maliyeti, toplam görev süresinin belirli bir yüzdesi kadardır. Eğer bir görev süresinde gerçekleşen gerçek tren kullanım süresi bu değerden büyükse, bu ekstra bir maliyet getireceğinden, görev süresinin maliyeti de bu değer kadar alınır. Bu değer ise her bir görev süresi için belirlenen bir en kısa süreden az olmamalıdır. Bu nedenle görev süresinin maliyeti hesaplanırken bu üç değerden en büyük olanı alınır. Bundan dolayı eşleştirmelerin maliyetleri doğrusal değildir.

Çizelgedeki toplam tren saati, verilen bir çizelgenin maliyeti açısından bir alt sınır olacaktır. Eşleştirmedeki toplam tren kullanım süresine oranla yüksek

KMUGZ'lara sahip eşleştirmeler pahalı eşleştirmelerdir. Bununla birlikte çizelgedeki tüm tren seferlerini en düşük maliyetle gerçekleştirebilmek için birkaç pahalı eşleştirme gerekli olabilmektedir. Ekip eşleştirme eniyilemesinde esas amaç, tüm tren seferlerini tam olarak bir kere kapsayan ve çizelgenin toplam tren kullanım süresine mümkün olduğunca yakın maliyete sahip eşleştirmeler kümesini bulmaktır.

Bu çalışmada günlük ekip eşleştirme problemi dikkate alındığı için ve günlük eşleştirmeler bir görev periyodundan oluştuğu için, eşleştirme maliyetleri, görev periyodu maliyetlerine eşit olacaktır. Dolayısıyla;

$$\text{Toplam Görev Süresi} = \text{KMUGZ} \quad (6.5)$$

olmaktadır. Parametrelerin aldığı değerler şöyledir:

$$\text{Toplam Görev Süresi Faktörü} = \text{KMUGZ Faktör} = 0,6$$

$$\text{EGU} = 4 \text{ saat} = 240 \text{ dk.}$$

$$\text{Eşleştirme Maliyeti} = \text{Enb}\{240, \text{KMUGZ} * 0.6, \text{Tren Kullanım Süresi}\} \quad (6.6)$$

Eşleştirmenin maliyeti, eşleştirmede kendi merkezinden uzakta geçen toplam zamanın %60'ı kadardır. Eğer bir eşleştirmedeki toplam tren kullanım zamanı bu değerden büyükse, bu fazladan bir maliyet getireceğinden, eşleştirmenin maliyeti de bu değer kadar alınır. Bu değer ise her eşleştirme için belirlenen dört saatlik alt sınır değerinden az olmamalıdır. Bu nedenle eşleştirmenin maliyeti hesaplanırken bu üç değerden en büyük olanı alınmalıdır.

6.3. Matematiksel Modelleme

Ekip eşleştirme problemi genellikle iki aşamada çözülür: İlk aşamada tüm eşleştirmeler oluşturulur ve maliyetleri hesaplanır ve daha sonra bu eşleştirmelerin iyi bir altkümesi tüm tren seferlerini kapsayacak şekilde seçilir. Demiryolu ekip

çizelgeleme problemi literatürde genellikle bir küme ayrıştırma ya da küme kapsama modeli olarak modellenmektedir.

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

Küme ayrıştırma ve küme kapsama modelinde olası tüm eşleştirmelerin oluşturulduğu ve maliyetlerinin hesaplandığını varsayılmaktadır. Pratikte, sayıları çok fazla olduğundan tüm eşleştirmeleri uygun olarak oluşturmak mümkün değildir. Genellikle eşleştirmelerin tam üretimi için bir sütun oluşturma algoritması uygulanır. Demiryolu ekip çizelgeleme probleminin küme kapsama ve küme ayrıştırma olarak modellenmesi aşağıda gösterilmiştir. Kullanılan simgeler şu şekildedir;

- i : Tren seferi ($i = 1, 2, \dots, m$)
- j : Eşleştirme ($j = 1, 2, \dots, n$)
- $c(j)$: j eşleştirmesinin maliyeti
- n_t : t . iterasyondaki eşleştirme sayısı
- t : mevcut iterasyon
- $x(j)$: j eşleştirmesinin en iyi çözümde yer alıp almayacağını gösteren 0-1 değişken
- $a(i, j)$: i . tren seferinin j eşleştirmesi tarafından kapsanıp kapsanmadığını gösteren 0-1 parametre

Küme ayrıştırma modeli

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

$$x(j) \in \{0, 1\} \quad \forall j = 1, \dots, n_t \quad (6.7)$$

k.a.

$$EnkZ = \sum_{j=1}^{n_t} c(j) * x(j)$$

Küme kapsama modeli

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

$$x(j) \in \{0, 1\} \quad \forall j = 1, \dots, nt \quad (6.8)$$

k.a.

$$EnkZ = \sum_{j=1}^{nt} c(j) * x(j)$$

Küme ayrıştırma modeli ile tüm tren seferleri tam olarak bir ekip eşleştirmesi tarafından kapsanacak şekilde toplam eşleştirme maliyetini enküçüklemek amaçlanır. Diğer bir ifade ile bir tren seferi için birden fazla eşleşmeye izin verilmemektedir.

Küme kapsama modeli ise, tüm tren seferleri en az bir ekip eşleştirmesi tarafından kapsanacak şekilde toplam eşleştirme maliyetini enküçüklemeyi amaçlamaktadır. Küme kapsama probleminde tren seferlerinin tam olarak bir eşleştirme tarafından kapsanması kısıtı küme ayrıştırmaya göre gevşetilmiştir. Sonuç yine tamsayı bir çözümdür. Sadece en iyi çözümde aynı tren seferi birden fazla eşleştirme tarafından kapsanabilmektedir. Bu da problemin çözümünü kolaylaştırmaktadır. Küme ayrıştırma ile modellendiğinde tüm eşleştirmelerin tam olarak bir eşleştirmede yer alacağı ve tüm eşleştirme kısıtlarını karşılayan uygun bir çözüm bulmak, özellikle büyük boyutlu problemlerde, oldukça zordur.

6.4. Sütun Türetme Algoritması

Sütun oluşturma yönteminin en etkin kullanılabildiği alanlardan biri demiryolu ekip çizelgeleme problemidir. Literatürde sütun oluşturma algoritmasını ekip eşleştirme problemine uygulayan ilk çalışma Minoux, (1984) tarafından yapılmıştır. Ekip çizelgeleme problemi daha önce de açıklandığı gibi genellikle bir küme ayrıştırma ya da küme kapsama modeli ile modellenmektedir. Ancak problemi bu modellerde

çözebilmek için temel varsayım, olası tüm eşleştirmelerin oluşturulduğudur. Çünkü model, tüm eşleştirmeler oluşturulduktan sonra bu eşleştirmelere bir maliyet değeri atayarak, tüm tren seferlerini tam olarak bir defa kapsayan en düşük maliyetli ekip eşleştirmeleri kümesini bulmayı amaçlamaktadır.

Sütun oluşturma algoritmasının demiryolu ekip çizelgeleme problemine uygulanması fire problemine uygulanmasına göre daha uğraştırıcıdır. Bu zorluk, demiryolu ekip çizelgelemede sütun oluşturma algoritmasının ana problem ve alt probleminin doğrusal programlama modeli olmamasından kaynaklanmaktadır. Demiryolu ekip çizelgeleme probleminde ana problem bir küme kapsama ya da küme ayırıştırma modeli, alt problem ise genellikle bir en kısa yol problemi olarak modellenmektedir. Ana problemde belirli sayıda başlangıç eşleştirmesi arasından tüm tren seferlerini tam olarak bir kere kapsayan en düşük maliyetli ekip eşleştirmeleri kümesini bulmak amaçlanır. Alt problem ise, ana problemin amaç fonksiyonu değeri olan toplam eşleştirme maliyetini azaltacak yeni eşleştirmelerin oluşturularak ana probleme gönderilmesini sağlar. Eşleştirmeler, değişkenlere yani simplex tablosundaki sütunlara, tren seferleri ise kısıtlara yani simplex tablosundaki satırlara karşılık gelmektedir. Ana problem ve alt problem, en iyi çözüm bulunana kadar tekrarlamalı olarak çözülür.

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

Sütun oluşturma algoritması büyük boyutlu doğrusal programları çözmek için kullanılan etkili bir algoritmadır. Bazı doğrusal programlarda, değişkenlerin ya da bir başka deyişle simplex algoritmasındaki sütunların sayısı milyonları bulabilmektedir. Algoritma, “büyük boyutlu doğrusal programlarda değişkenlerin çoğu simplex algoritmasında temelde olmayacağı ve en iyi çözümde sıfır değerini alacağı için, problemi çözerken değişkenlerin sadece bir alt kümesinin dikkate alınmasının yeterli

olduğu” düşüncesine dayanmaktadır. Algoritma, bir doğrusal program çözülrken işe sadece temelde olan değişkenlerle başlayıp, daha sonra temele girmesi gereken diğer değişkenleri belirlemek için indirgenmiş maliyeti kullanır.

Sütun oluşturma algoritmaları, iki aşamadan oluşur:

- Ana problemin çözülmesi
- Alt problemin çözülmesi

Ana problem, değişkenlerin sadece bir alt kümesini dikkate alan gerçek problemdir. Alt problem, ana probleme gönderilmek üzere yeni bir değişken tanımlamak için oluşturulan yeni bir problemdir. Alt problemin amaç fonksiyonu, yeni değişkenin mevcut ikil değişkenlere göre oluşturulan indirgenmiş maliyetinin enküçüklenmesidir ve alt problemde üretilen bu yeni değişkenin, tüm gerekli kısıtları karşılaması sağlanır.

Algoritma şu şekilde çalışır:

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

Sütun oluşturma'nın başarılı bir biçimde uygulandığı en tanınmış problem fire problemidir. Sütun oluşturma algoritması ayrıca, ekip çizelgeleme, ekip eşleştirme problemi, filo atama, araç rotalama, zaman pencereli gezgin satıcı problemi, personel çizelgeleme problemleri, hemşire çizelgelemede öncelik atama, esnek imalat sistemlerinde iş gruplama, uydu iletişim sistemlerinde trafik atama, genel atama problemi, serim boyama, serim ayırıştırma, paralel makineli tam zamanında çizelgeleme problemleri ve kapasiteli p-medyan problemi gibi birçok tamsayılı kısıtlı probleme de uygulanmaktadır (Çankaya ve Arıkan, 2009). Sütun türetme tekniğinin bazı başarılı uygulamaları Çizelge 6.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1. Sütun Türetme Tekniği Uygulamaları*

Yıl	Uygulama Alanı
1960	Kesme problemleri (Cutting stock problems)
1980	Hava yolu ekip (mürettebat) çizelgeleme (Air crew scheduling)
	Hava yolu taşımacılığı filo ve rotalama problemleri (Aircraft fleet and routing)
	Vardiya çizelgeleme (Crew rostering)
	Araç rotalama problemleri (Vehicle routing)
	Küresel deniz yolu taşıma problemleri (Global shipping)
	Yükleme problemleri (Multi-item lot-sizing)
2000	Optik iletişim ağı tasarımı işlemlerinde (Optical telecommunications network design)
	IMRT kullanılarak kanserin radyasyon ile tedavisi işlemlerinde (Cancer radiation treatment using IMRT)

*Kaynak: www.or.ms.unimelb.edu.au/handouts/ORSUM_NB.ppt

6.4.1. Ana problem

Ana problemde amaç, toplam eşleştirme maliyetlerini enküçükmektir. Kısıt ise, her tren seferinin tam olarak bir eşleştirme tarafından kapsanmasını sağlamaktır.

$$\sum_{j=1}^{nt} a(i, j) * x(j) \geq 1 \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (6.9)$$

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

k.a.

$$EnkZ = \sum_{j=1}^{nt} c(j) * x(j) \quad (6.10)$$

Modelde kullanılan simgeler aşağıdaki gibidir:

- $x(j)$: j eşleştirmesinin en iyi çözümde yer alıp almayacağını gösteren 0-1 değişken
 $a(i,j)$: i tren seferinin j eşleştirmesi tarafından kapsanıp kapsanmadığını gösteren parametre
 $c(j)$: j eşleştirmesinin maliyet değeri
 m : Tren seferlerinin sayısı
 n_t : t . iterasyondaki eşleştirme sayısı
 t : Mevcut iterasyon

6.4.2. Alt problem

Ana problem küme kapsama modeli ile çözüldükten sonra, ana problemdeki her bir tren seferi için oluşturulan kısıtlara ilişkin ikil değerler alt probleme gönderilir. Alt problem serim modellerinden biriyle modellenir. En çok kullanılan alt problem tipi ise en kısa yol problemidir. Çünkü alt problem, tren çizelgesindeki tren seferinin her birinin bir düğüm olarak yer aldığı, tren seferleri arasındaki tren kullanım süresi ve

dinlenme sürelerinin oklarla gösterildiği, personelin ikâmet ettiği depoda başlayan ve burada sonlanan bir tren serimindeki en kısa yolları bulmayla ilgilenmektedir. Serimindeki her yol bir eşleştirmeye karşılık gelmektedir.

Alt problemin amacı, bu serimde yasalara uygun eşleştirme olma kısıtlarını sağlayan en düşük indirgenmiş maliyetli eşleştirmeyi bulmaktır. En düşük indirgenmiş maliyetli eşleştirme aynı zamanda ana problemin amaç değerini iyileştirebilme potansiyeli yüksek olan bir eşleştirme anlamına gelmektedir. Alt problemin ana problemle olan bağlantısını ise ikil değişkenler sağlamaktadır. Ana problemde her bir tren seferine karşılık gelen kısıtlara ilişkin ikil değerler, alt problemin amaç fonksiyonunda eşleştirmelerin indirgenmiş maliyetlerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Alt problemde her bir eşleştirmeye karşılık gelen değişkenlere ilişkin indirgenmiş maliyetler, o eşleştirmenin maliyetinden kârını çıkartarak elde edilir. Ana problemde gelen ikil değerler kullanılarak eşleştirmelerin kârları hesaplanır. Eşleştirmelerin maliyetleri ise günlük ekip eşleştirmeleri göz önünde bulundurulacağı için;

$$M \geq \left(\sum_{i,j=1}^n f(i,j) * x(i,j) + \sum_{i,j=1}^n r(i,j) * x(i,j) \right) * KMUGZ \quad (6.11)$$

$$M \geq \sum_{i,j=1}^n f(i,j) * x(i,j) \quad (6.12)$$

$$M \geq EEGU \quad (6.13)$$

$$\sum_{i=1}^n x(i,j) = \sum_{i=1}^n x(j,i) \quad \forall j = 2 \dots n-1 \quad (6.14)$$

$$\sum_{i=1}^n x(1,j) = 1 \quad (6.15)$$

$$\sum_{i=1}^n x(i, n) = 1 \quad (6.16)$$

$$\sum_{i,j=1}^n f(i, j) * x(i, j) \leq \text{Toplam Tren Kullanım Süresi} \quad (6.17)$$

$$\sum_{i,j=1}^n f(i, j) * x(i, j) + \sum_{i,j=1}^n r(i, j) * x(i, j) \leq KMUGZ \quad (6.18)$$

k.a.

$$\text{Enk } z = M - \sum_{i,j=1}^n d(i, j) * x(i, j) \quad (6.19)$$

$f(i, j)$: i ve j şehirleri arasındaki tren kullanım periyodu

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

$d(i, j)$: Ana problemden alt probleme gönderilen seferlere ilişkin ikil değerler

$x(i, j)$: i ve j değişkenin modelde yer alıp almadığını gösteren 0,1 tam sayı değişken

M : Her bir eşleştirmeye ait Eşleştirme Maliyeti

n : Eşleştirme sayısı

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

6.5. Ekip Atama Problemi

Yöneylem Araştırması'nda en çok tanınan problemlerden biri "Atama" (Assignment) problemidir. Atama probleminde yapılması gereken (m) adet görev vardır. Bu görevleri yapmaları için de (m) ayrı kişi bulunmaktadır. Herhangi bir (i) kişinin (j) görevine verilmesi durumunda (c_{ij}) maliyeti oluşmaktadır. Her göreve mutlaka bir kişinin verilmesi ve bir kişinin sadece tek bir göreve atanması koşuluyla en

küçük toplam maliyetle bir görevlendirme planı yapılması amaçlanmaktadır. Diğer bir deyişle, en küçük toplam maliyeti doğuracak birebir kişi-görev eşleşmesinin bulunması istenmektedir (Öner ve Ülengin, 2003).

Atama işleminde birbiriyle çelişen çeşitli ölçütleri aynı anda göz önünde bulundurup, en iyi atamayı yapmak zor bir iştir ve dikkate alınması gereken pek çok ölçüt olması sebebiyle, atama gibi çok kistaslı problemleri tam olarak çözebilmek çoğu zaman insan kapasitesinin sınırları dışındadır. Bunu yapabilme kabiliyetine sahip bir matematiksel çözümün probleme dahil edilmesi, karar vericiler için faydalı bir bakış açısı sağlamakta ve bütün olarak personel atama sürecinde tarafsızlığı arttırmaktadır.

Kişisel aylık çizelge, çalışanın bir aylık standart faaliyetlerdir. Bu faaliyetler eşleştirmeler, dinlenme süresi, yıllık tatiller, bağlantı faaliyetleri (bir önceki ayın sonunda başlayıp mevcut ayda bitmesi beklenen faaliyet), aylık çizelge yapılmadan önceki personel isteklerini kapsar. Aylık atama çizelgesi yapılırken her bir ekip üyesinin nitelikleri ve önceki dönemdeki atamaları her bir personelin dinlenmesi gereken zaman aralıkları gibi kısıtlar dikkate alınmalıdır (Stojkovic et al., 1998).

Doğramacı and Surkis, (1979) çizelgeleme için sezgisel bir algoritma geliştirmeye çalışmışlardır. Oluşturdukları doğrusal programlama modeli ile istedikleri en iyi çizelgeyi elde etmeyi başarmışlar ancak hem çözüm süresinin çok uzun olması hem de büyük sistemlerde pratikte kullanımın zor olmasından dolayı doğrusal programlamanın uygun bir yöntem olmadığını belirtmişlerdir. Ancak daha sonra doğrusal programlama modeli ile elde edilen sonuçlar sezgisel algoritmanın performansını kıyaslamak için kullanılmıştır. Toplamda 560 farklı durum için doğrusal programlama, sezgisel algoritma ve rastgele çizelgeleme yöntemleri ile işleri çizelgelemişler ve her bir yöntemin ortalama toplam gecikmesini hesaplamışlardır. Bunun akabinde sezgisel algoritmanın doğrusal programlama modeline göre ortalama ne kadar süre daha fazla geciktiğini, rastgele çizelgeleme yönteminin doğrusal programlama modeline göre ne kadar süre daha fazla geciktiğine oranlamışlar ve 0,15 gibi düşük bir değer bulmuşlardır. Bu sonucun sezgisel algoritmanın doğrusal

programlama modelinin en iyi sonucuna yakın bir sonuç verebildiğini gösterdiğini ve algoritmanın pratikte kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Sezgisel algoritmalar iyi çözüm sunarlar fakat çoğunlukla en iyi çözümü değil de en iyiye yakın uygun bir çözüm sağlarlar. Sezgisel algoritmalar en iyi çözüm sunan algoritmalarından daha hızlı çözüm verirler. Matematiksel algoritma kullanan çoğu karar destek sistemleri sezgisel algoritmaları kullanmaktadır. Çünkü iyi bir sezgisel algoritma çok hızlı bir şekilde en iyiye yakın bir çözüm sağlayacaktır.

Yukarıda anlatılanlar ışığında ekip eşleştirme probleminin sonuçlarını kullanarak makinist atama problemi için sezgisel bir algoritma geliştirildi. Algoritmada personelin eğitim durumu, yaşı, hizmet süresi ve meslek hayatı boyunca idari ceza alıp almaması ölçütleri dikkate alınmıştır. Bu ölçütlere çeşitli ağırlıklar verilmek sureti ile bir puanlama sistemi oluşturulmaya çalışılmıştır TCDD personel ataması yapılacak yolcu trenlerini üç farklı grupta sınıflandırmıştır. Bunlar; süper ekspres, mavi tren ve ekspres trendir. Bu sınıflandırmada birinci öncelik yolculuk süresinin kısalığıdır. Başka bir ifadeyle yolculuk süresi ne kadar kısa ise tren o derece önceliklidir. Rassal atama programında tren öncelikleri de dikkate alınmış olup TCDD için öncelikli olan trenlere daha yüksek puanlı atamalar yapılmıştır. Atama problemi için program, DELPHI programlama dili kullanılarak yazılmıştır.

6.6. Sütun Türetme Algoritmasının Uygulaması

Bu tez kapsamında, TCDD'nin planladığı yeni tren çizelgesi için günlük ekip eşleştirme problemi sütun oluşturma algoritması kullanılarak çözülmüştür. TCDD yetkilileri Çizelge 6.2'de ki mevcut tren çizelgesinde verilen tren parkurlarını göz önünde bulundurarak daha fazla sayıda tren seferinden oluşacak yeni bir tren çizelgesi için ekip eşleştirme probleminin çözülmesini istemişlerdir. Sefere yeni konulması planlanan trenlerle birlikte tüm tren seferlerinin hareket ve varış saatleri Çizelge 6.2'de verilmiştir. Çalışmada 62 tren seferi seçilmiştir ve sadece Ankara, İstanbul ve Kütahya'ya yapılan yolcu treni seferleri dikkate alınmıştır. Yük treni seferleri, yük

trenlerinin ekip planlamasının yolcu treni ekip planlaması ile beraber yapılmıyor olmasından dolayı dikkate alınmamıştır. Afyon, Konya ve Balıkesir'e yapılan tren seferlerine ilişkin olarak yeni planlama ile söz konusu şehirlere yapılacak tren seferlerinin Eskişehir Depo Müdürlüğü tarafından yapılmayacağı bildirildiği için çizelgede yer almamıştır. Haftanın her günü tekrar eden bu tren seferleri dışında haftanın belirli günleri ya da sadece bir gün gerçekleştirilen tren seferleri de vardır. Burada bir temel oluşturması açısından günlük ekip eşleştirme probleminin çözülmesi amaçlanmıştır.

TCDD'nin resmi internet sayfasından alınan Eskişehir Depo Müdürlüğü için mevcut tren seferlerini ve hareket saatlerini gösteren veriler Çizelge 6.2'de, planlanan tren seferlerini de içine alan yeni veriler ise Çizelge 6.3'de gösterilmiştir. Merkez konumundaki şehir Eskişehir olduğu için, eşleştirmeler oluşturulurken kalkış ve varış şehrinin, Eskişehir olması gerekmektedir. Ayrıca tren seferleri sıralanırken zaman öncelikleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Birinci tren seferinin varış zamanı, ikinci tren seferinin kalkış zamanından daha küçük olmalıdır.

Çizelge 6.2. Mevcut tren çizelgesi

Sefer Sayısı	Tren Adı	Ankara Kalkış	Eskişehir Varış
1	Anadolu Ekspresi	22.00	01.17
2	Ankara Ekspresi	22.30	01.55
3	Fatih Ekspresi	23.30	02.29
4	Boğaziçi Ekspresi	08.00	11.27
5	Doğu Ekspresi	12.54	16.52
6	Güney-Van G. Ekspresi	12.10	15.44
7	İzmir Mavi Ekspresi	19.00	22.09
8	9 Eylül Ekspresi	20.50	23.51
9	Karesi Ekspresi	16.00	19.41
		Eskişehir Kalkış	Ankara Varış
10	Anadolu Ekspresi	03.11	06.38
11	Ankara Ekspresi	03.35	07.06
12	Fatih Ekspresi	04.00	07.23
13	Boğaziçi Ekspresi	17.37	21.05
14	Doğu Ekspresi	13.15	16.48
15	Güney- Van G. Ekspresi	04.34	08.03

16	İzmir Mavi Ekspresi	06.10	09.29
17	9 Eylül Mavi Ekspresi	07.12	10.15
18	Karesi Ekspresi	03.15	06.55
		Eskişehir Kalkış	H.Paşa Varış
19	Anadolu Ekspresi	01.27	07.00
20	Ankara Ekspresi	02.09	07.07
21	Fatih Ekspresi	02.43	07.13
22	Eskişehir Ekspresi	08.42	12.32
23	Boğaziçi Ekspresi	11.37	16.46
24	Başkent Ekspresi	12.55	16.50
25	Doğu Ekspresi	16.52	22.02
26	Cumhuriyet Ekspresi	16.45	20.42
27	Güney-Van G. Ekspresi	16.00	21.14
28	Sakarya Ekspresi	19.44	23.38
29	Meram Ekspresi	01.10	06.35
30	İç Anadolu Mavi	04.36	08.58
		H.Paşa Kalkış	Eskişehir Varış
31	Anadolu Ekspresi	22.00	02.58
32	Ankara Ekspresi	22.30	03.25
33	Fatih Ekspresi	23.30	03.50
34	Güney Ekspresi	22.55	04.24
35	Doğu Ekspresi	08.00	13.15
36	Boğaziçi Ekspresi	12.00	17.27
37	Cumhuriyet Ekspresi	14.00	17.56
38	Eskişehir Ekspresi	07.10	10.56
39	Sakarya Ekspresi	17.50	21.38
40	Başkent Ekspresi	11.00	14.54
41	Meram Ekspresi	19.40	00.50
42	İç Anadolu Mavi	23.50	04.53

Çizelge 6.3. Planlanan tren çizelgesi

Sıra No	Hareket Saati	Variş Saati	Kalkış Şehri	Variş Şehri
1	10	217	Eskişehir	Ankara
2	410	607	Ankara	Eskişehir
3	250	466	Eskişehir	Ankara
4	800	1005	Ankara	Eskişehir
5	500	703	Eskişehir	Ankara
6	900	1079	Ankara	Eskişehir
7	800	1008	Eskişehir	Ankara
8	1200	1407	Ankara	Eskişehir
9	650	863	Eskişehir	Ankara
10	1150	1388	Ankara	Eskişehir
11	100	309	Eskişehir	Ankara
12	350	539	Ankara	Eskişehir
13	200	399	Eskişehir	Ankara
14	500	681	Ankara	Eskişehir
15	700	883	Eskişehir	Ankara
16	1000	1220	Ankara	Eskişehir
17	900	1100	Eskişehir	Ankara
18	1238	1438	Ankara	Eskişehir
19	115	313	Eskişehir	Ankara
20	460	667	Ankara	Eskişehir
21	300	505	Eskişehir	Ankara
22	600	803	Ankara	Eskişehir
23	825	1027	Eskişehir	Ankara
24	1100	1308	Ankara	Eskişehir
25	20	353	Eskişehir	İstanbul
26	450	748	İstanbul	Eskişehir
27	150	448	Eskişehir	İstanbul
28	900	1195	İstanbul	Eskişehir
29	300	570	Eskişehir	İstanbul
30	800	1060	İstanbul	Eskişehir
31	500	730	Eskişehir	İstanbul
32	1000	1329	İstanbul	Eskişehir
33	650	959	Eskişehir	İstanbul
34	1115	1430	İstanbul	Eskişehir
35	800	1035	Eskişehir	İstanbul
36	1204	1440	İstanbul	Eskişehir
37	550	860	Eskişehir	İstanbul
38	80	317	Eskişehir	İstanbul
39	400	727	İstanbul	Eskişehir
40	220	534	Eskişehir	İstanbul
41	580	806	İstanbul	Eskişehir
42	400	634	Eskişehir	İstanbul

43	780	1006	İstanbul	Eskişehir
44	650	975	Eskişehir	İstanbul
45	1075	1303	İstanbul	Eskişehir
46	850	1112	Eskişehir	İstanbul
47	1180	1414	İstanbul	Eskişehir
48	1000	1300	İstanbul	Eskişehir
49	150	448	Eskişehir	İstanbul
50	520	815	İstanbul	Eskişehir
51	300	530	Eskişehir	İstanbul
52	630	890	İstanbul	Eskişehir
53	550	820	Eskişehir	İstanbul
54	1025	1323	İstanbul	Eskişehir
55	420	495	Eskişehir	Kütahya
56	550	625	Kütahya	Eskişehir
57	700	775	Eskişehir	Kütahya
58	850	925	Kütahya	Eskişehir
59	1000	1075	Eskişehir	Kütahya
60	1150	1225	Kütahya	Eskişehir
61	1250	1325	Eskişehir	Kütahya
62	1365	1440	Kütahya	Eskişehir

Problemin çözümünde kullanılan sütun oluşturma yönteminin, ana problem ve alt probleminin matematiksel modelleri aşağıda gösterilmiştir. Başlangıç eşleştirmeleri, ana problem ve alt problem, GAMS eniyileme programı kullanılarak kodlanmış ve ardışıklı olarak çözülmüştür. Sütun oluşturma algoritmasına ait GAMS programı kodları EK-1’de sunulmuştur.

Ana problem

$$\sum_{j=1}^{nt} a(i, j) * x(j) \geq 1 \quad \forall i = 1, \dots, 62$$

$$x(j) \in \{0, 1\} \quad \forall j = 1, \dots, nt \quad (6.20)$$

k.a.

$$EnkZ = \sum_{j=1}^{nt} c(j) * x(j)$$

Alt problem

$$M \geq \left(\sum_{i,j=1}^n f(i,j) * x(i,j) + \sum_{i,j=1}^n r(i,j) * x(i,j) \right) * 0,6 \quad (6.21)$$

$$M \geq \sum_{i,j=1}^n f(i,j) * x(i,j) \quad (6.22)$$

$$M \geq 240 \quad (6.23)$$

$$\sum_{i=1}^n x(i,j) = \sum_{i=1}^n x(j,i) \quad \forall j = 1 \dots 62 \quad (6.24)$$

$$\sum_{i=1}^n x(1,j) = 1 \quad (6.25)$$

$$\sum_{i=1}^n x(i,n) = 1 \quad (6.26)$$

$$\sum_{i,j=1}^n f(i,j) * x(i,j) \leq 720 \quad (6.27)$$

$$\sum_{i,j=1}^n f(i,j) * x(i,j) + \sum_{i,j=1}^n r(i,j) * x(i,j) \leq 940 \quad (6.28)$$

k.a.

$$Enk Z = M - \sum_{i,j=1}^n d(i,j) * x(i,j) \quad (6.29)$$

$f(i)$: i seferi periyodu

n_t : t . iterasyondaki eşleştirme sayısı

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

$d(i)$: Ana problemden alt probleme gönderilen tren seferlerine ilişkin ikil değerler

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

değişkeni

M: Her bir eşleştirmeye ait $Enb \{240, KMUGZ * 0.6, Toplam Tren Kullanım Süresi\}$ modeline göre hesaplanan maliyet değeri

(6.20)'de 62 adet tren seferi için en düşük maliyeti verecek olan ana model kurulmuştur. Kısıt (6.21)'de eşleştirme maliyetleri için $KMUGZ*0,6$ alınacağını gösteren satırdır. (6.22) kısıtı toplam tren kullanım süresi maliyetini gösterir. (6.23) makinistin tren kullanmasa bile alacağı ücretin günlük ortalama saatini gösteren kısıttır. Bu değer makinistlerin maaşlarına hiçbir ek tazminat eklenmeden aldıkları ücretin aylık çalışma gününe bölünmesi sonucunda çıkan rakamın makinistlerin kilometre saat ücretine bölünmesi sonucunda elde edilmiş ortalama bir değerdir. (6.24) kısıtı bir şehre gelen ve giden tren sayısının eşit olmasını sağlar böylece trenlerin ve personelin bir döngü halinde çalışabilmesi sağlanmış olur. (6.25) ve (6.26) kısıtları çizelgenin Eskişehir'de başlayıp sonlanmasını garanti etmektedir. (6.27) ve (6.28) kısıtları ise sırasıyla en fazla tren kullanılacak süreyi ve en fazla tren kullanma süresi artı dinlenme süresini gösterir. (6.29) kısıtı ise alt problemin amaç fonksiyonu olan en küçük indirgenmiş maliyet değeridir.

Problem, GAMS 21.5 eniyileme programının CPLEX karma tamsayı doğrusal program çözücü yazılımı kullanılarak çözülmüştür. Yukarıda bahsi geçen çözücü paket program C (C++, C# ve Java) programlama dili ve simplex algoritmasından esinlenerek CPLEX adıyla 1997 yılında piyasaya çıkmıştır. 2009 yılı başında IBM tarafından satın alınmıştır. AIMMS, AMPL, GAMS, MPL, OPL Development Studio, ve TOMLAB gibi eniyileme paket programlarının tam sayılı doğrusal programlama modelleri için kullandığı çözücülerden birisidir.

Sütun oluşturma algoritmasının EK-1'de verilen GAMS modeli ile çözümü sonucunda elde edilen en iyi maliyet değeri 14072'dir. Çözüm kümesi ise 27 değişkenden oluşmaktadır. En iyi ekip eşleştirmeleri Çizelge 6.4'te gösterilmiştir. Çizelge 6.4 incelendiğinde X8 ve X20 değişkenlerinin 57 ve 58 eşleştirmelerini iki sefer kapsadığı görülmektedir aynı durum X43 ve X55 değişkenlerinin 55 ve 56 eşleştirmelerini iki sefer kapsamında da görülmektedir. Bunun anlamı problemin

çözümünde 55, 56, 57 ve 58 numaralı tren seferleri için birden fazla çözüm bulunmuştur. Problem küme kapsama olarak çözüldüğü için çözüm kümesinde aynı eşleştirmelerin birden fazla defa bulunmasına izin verilmiştir. Diğer bir ifade ile Eskişehir – Kütahya, Kütahya – Eskişehir arasında aynı tren seferleri için kısıtları sağlayan birden fazla eşleştirme olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Bir tren seferinin aynı anda birden fazla ekip tarafından gerçekleştirilemeyecek olmasından dolayı 57, 58 eşleştirmesi X8 veya X20 ekibi tarafından gerçekleştirilecektir. Aynı durum 56, 57 numaralı tren seferleri için de geçerlidir. Bu iki tren seferi de ya X43 ya da X55 ekibi tarafından gerçekleştirilecektir.

Çizelge 6.4. En iyi ekip eşleştirmeleri

Değişken	Eşleştirme				Maliyet
X3	10	17			438
X4	3	14			397
X8	2	11	57	58	556
X17	18	23			402
X20	1	20	57	58	564
X21	12	19			387
X23	7	8			415
X24	35	45			463
X31	4	21			423
X32	5	6			382
X33	30	31	61	62	640
X34	13	22			402
X36	32	42			563
X37	34	37			625
X40	48	53			570
X41	36	46			498
X43	15	24	55	56	541
X44	43	49			524
X46	33	54			607
X47	25	39			660
X49	28	29			565
X50	41	51	59	60	606
X51	27	50			593
X52	40	52			574
X55	9	16	55	56	583
X60	26	38			535
X64	44	47			559

Çözüm kümesinde yer alan 27 adet değişken Çizelge 6.4'te görülmektedir. 27 değişken, tren seferleri çizelgesindeki tüm seferlerine makinist atanabilmesi için 27 adet ekibe ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Aynı problem küme ayrıştırma modeli olarak çözüldüğünde gerekli olan ekip sayısı 28 olarak hesaplanmıştır. Daha büyük bir ekip gerektirdiği için küme ayrıştırma modeli çözüm olarak benimsenmemiştir. Çizelge 6.5'te en iyi ekip çizelgesi görülmektedir. Çizelgede ekiplerin hangi trenleri yapacağı bilgisi ve trenlerin kalkış, varış saatleri verilmiştir. Problemin çözümü Intel Core2Duo 2.20 GHz. işlemci ve 3 GB Ram'e sahip bir bilgisayarda 18 dk. sürmüştür.

Çizelge 6.5. En iyi ekip çizelgesi

Ekip No	Sıra No	Hareket Saati	Varış Saati	Kalkış Şehri	Varış Şehri
Ekip 1	17	900	1100	Eskişehir	Ankara
	10	1150	1388	Ankara	Eskişehir
Ekip2	3	250	466	Eskişehir	Ankara
	14	500	681	Ankara	Eskişehir
Ekip 3	11	100	309	Eskişehir	Ankara
	2	410	607	Ankara	Eskişehir
	57	700	775	Eskişehir	Kütahya
	58	850	925	Kütahya	Eskişehir
Ekip 4	23	825	1027	Eskişehir	Ankara
	18	1238	1438	Ankara	Eskişehir
Ekip 5	1	10	217	Eskişehir	Ankara
	20	460	667	Ankara	Eskişehir
Ekip 6	19	115	313	Eskişehir	Ankara
	12	350	539	Ankara	Eskişehir
Ekip 7	7	800	1008	Eskişehir	Ankara
	8	1200	1407	Ankara	Eskişehir
Ekip 8	35	800	1035	Eskişehir	İstanbul
	45	1075	1303	İstanbul	Eskişehir
Ekip 9	21	300	505	Eskişehir	Ankara
	4	800	1005	Ankara	Eskişehir
Ekip 10	5	500	703	Eskişehir	Ankara
	6	900	1079	Ankara	Eskişehir
Ekip 11	31	500	730	Eskişehir	İstanbul
	30	800	1060	İstanbul	Eskişehir
	61	1250	1325	Eskişehir	Kütahya
	62	1365	1440	Kütahya	Eskişehir
Ekip 12	13	200	399	Eskişehir	Ankara

	22	600	803	Ankara	Eskişehir
Ekip 13	42	400	634	Eskişehir	İstanbul
	32	1000	1329	İstanbul	Eskişehir
Ekip 14	37	550	860	Eskişehir	İstanbul
	34	1115	1430	İstanbul	Eskişehir
Ekip 15	53	550	820	Eskişehir	İstanbul
	48	1000	1300	İstanbul	Eskişehir
Ekip 16	46	850	1112	Eskişehir	İstanbul
	36	1204	1440	İstanbul	Eskişehir
Ekip 17	15	700	883	Eskişehir	Ankara
	24	1100	1308	Ankara	Eskişehir
	55	420	495	Eskişehir	Kütahya
	56	550	625	Kütahya	Eskişehir
Ekip 18	49	150	448	Eskişehir	İstanbul
	43	780	1006	İstanbul	Eskişehir
Ekip 19	33	650	959	Eskişehir	İstanbul
	54	1025	1323	İstanbul	Eskişehir
Ekip 20	25	20	353	Eskişehir	İstanbul
	39	400	727	İstanbul	Eskişehir
Ekip 21	29	300	570	Eskişehir	İstanbul
	28	900	1195	İstanbul	Eskişehir
Ekip 22	51	300	530	Eskişehir	İstanbul
	41	580	806	İstanbul	Eskişehir
	59	1000	1075	Eskişehir	Kütahya
	60	1150	1225	Kütahya	Eskişehir
Ekip 23	27	150	448	Eskişehir	İstanbul
	50	520	815	İstanbul	Eskişehir
Ekip 24	40	220	534	Eskişehir	İstanbul
	52	630	890	İstanbul	Eskişehir
Ekip 25	9	650	863	Eskişehir	Ankara
	16	1000	1220	Ankara	Eskişehir
Ekip 26	38	80	317	Eskişehir	İstanbul
	26	450	748	İstanbul	Eskişehir
Ekip 27	44	650	975	Eskişehir	İstanbul
	47	1180	1414	İstanbul	Eskişehir

6.7. Rassal Atama Algoritmasının Uygulaması

Ekip eşleştirme probleminin çözümünde, TCDD Eskişehir Depo Müdürlüğü'nün bir günlük yolcu tren seferlerini gerçekleştirebilmek için 27 ekibe ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir. Her ekip iki adet personelden oluşmaktadır. Yönetmelikler gereği bir ekibe atanacak personelden en az birisi makinist olmak zorundadır. Her iki personelin de makinist olması konusunda herhangi bir sınırlama yoktur. DELPHI programlama dili ile yazılan rassal atama programında bu kısıtta dikkate alınmış olup aynı ekipte en fazla bir yardımcı makinist olmasına izin verilmiştir. Rassal personel atama programının ara yüzü Şekil 6.1'de gösterilmiştir.

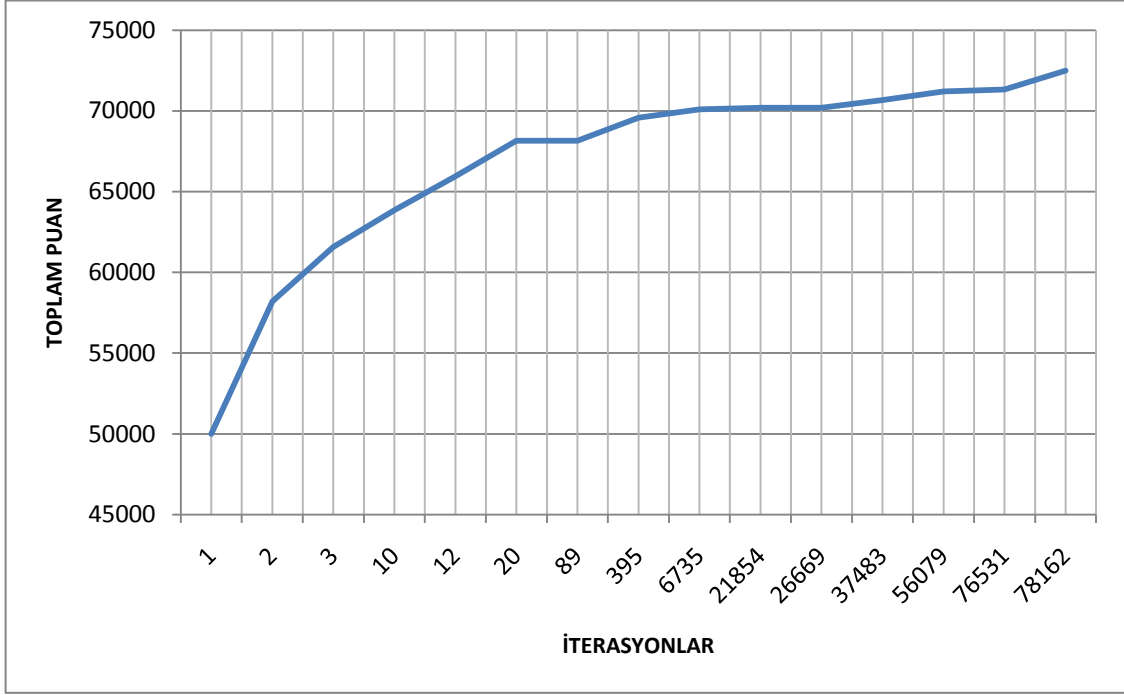
Şekil 6.1. Personel atama programı ara yüzü

Rassal atama probleminin çözümü için temel olarak personelin dört farklı özelliğine göre hesaplama yapılmıştır. Bu özellikler; eğitim durumu, yaş, hizmet süresi ve idari ceza alıp almaması durumudur. Eğitim durumu için personel eğer üniversite mezunu ise 4 puan, lise mezunu ise 1 puan (lise eğitiminden daha düşük tahsilli kişilerin makinist olmasına izin verilmiyor) verilmektedir. Personel eğer 45 yaşından küçük

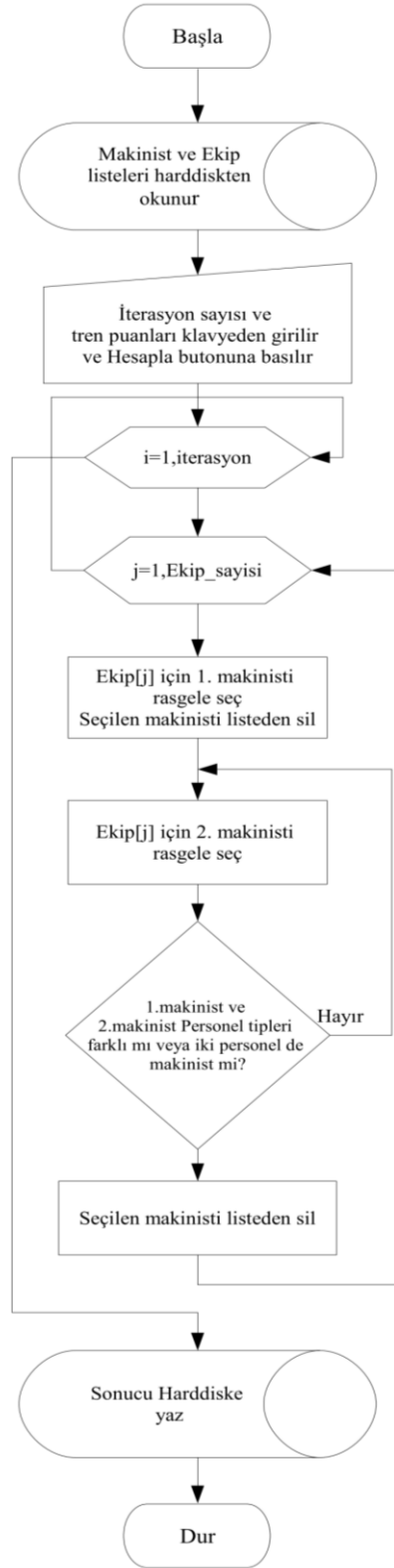
veya eşit ise 4 puan büyük ise 1 puan verilmektedir. Hizmet süresi 6 yıldan küçük ise 1 puan, 6 yıldan büyük 18 yıldan küçük ise 7 puan, 18 yıl ve üzeri ise 4 puan verilmektedir. Son olarak personelin aldığı her uyarma ve kınama cezası için -1 puan, aylıktan kesme cezalarının her biri için ise -2 puan kesilmektedir. TCDD’de yolcu trenlerini üç sınıfa ayırmıştır. Bunlar; süper ekspresler, mavi trenler ve ekspres trenlerdir. Bu trenler için de farklı puanlar belirlenmiştir.

Puan hesaplama işleminde makinist listesinden bir personel rassal olarak seçilir, seçilen personelin belirlenen dört ölçüte göre puanı hesaplanır daha sonra kişinin hesaplanan puanı atama yapılacak tren puanı ile çarpılır son olarak kişi geçici olarak makinist listesinden silinir, program yine rassal olarak listeden başka bir personel seçer. Seçilen ikinci kişi için program “aynı trene atanacak her iki personelin de yardımcı makinist olmaması” kontrolünü yapar. Kriterler uygunsa geri kalan atamaların puan hesaplamaları da yapılır. Tüm ekiplere personel ataması yapıldıktan sonra bu atamaların toplam puanı hesaplanır ve ikinci iterasyona geçilir. İkinci iterasyonda da toplam puan hesaplandıktan sonra, iterasyonun toplam puanı bir önceki iterasyondaki puandan daha büyük ise bu puan iyileşme olarak kabul edilir ve bir önceki değer silinerek yüksek puana sahip olan atamalar saklanır. Tüm iterasyonlar için puanlar hesaplandıktan sonra sadece toplam puanı yükselten atama sonuçları CSV uzantılı bir dosya olarak kayıt edilir.

Sütun oluşturma algoritması ile çözülmüş olan TCDD Eskişehir Depo Müdürlüğü’nde bir günlük çizelgeleme probleminin sonucu olan 27 ekip ihtiyacı için rassal atama ile 100.000 iterasyon yapılarak personel atamaları gerçekleştirilmiştir. İterasyon bazında iyileştirmeyi gösteren grafik Şekil 6.2’te gösterilmiştir. Personel atamalarını gösteren tablo Çizelge 6.6’da gösterilmiştir. Geliştirilmiş olan programın akış diyagramı Şekil 6.3’de program kodu ise EK-3’te gösterilmiştir.



Şekil 6.2. İterasyon Bazında İyileşmeler



Şekil 6.3. Atama programı akış diyagramı

Çizelge 6.6. Ekiplere atanan personel listesi

Ekib No	Atanan Personeller		Hareket Saati	Variş Saati	Kalkış Şehri	Variş Şehri
Ekib 1	Y170	M57	900	1100	Eskişehir	Ankara
			1150	1388	Ankara	Eskişehir
Ekib2	Y191	M81	250	466	Eskişehir	Ankara
			500	681	Ankara	Eskişehir
Ekib 3	Y179	M88	100	309	Eskişehir	Ankara
			410	607	Ankara	Eskişehir
			700	775	Eskişehir	Kütahya
			850	925	Kütahya	Eskişehir
Ekib 4	Y166	M135	825	1027	Eskişehir	Ankara
			1238	1438	Ankara	Eskişehir
Ekib 5	M131	M28	10	217	Eskişehir	Ankara
			460	667	Ankara	Eskişehir
Ekib 6	M87	M110	115	313	Eskişehir	Ankara
			350	539	Ankara	Eskişehir
Ekib 7	M5	M128	800	1008	Eskişehir	Ankara
			1200	1407	Ankara	Eskişehir
Ekib 8	Y149	M80	800	1035	Eskişehir	İstanbul
			1075	1303	İstanbul	Eskişehir
Ekib 9	M55	M68	300	505	Eskişehir	Ankara
			800	1005	Ankara	Eskişehir
Ekib 10	Y6	M112	500	703	Eskişehir	Ankara
			900	1079	Ankara	Eskişehir
Ekib 11	M31	M108	500	730	Eskişehir	İstanbul
			800	1060	İstanbul	Eskişehir
			1250	1325	Eskişehir	Kütahya
			1365	1440	Kütahya	Eskişehir
Ekib 12	M17	M7	200	399	Eskişehir	Ankara
			600	803	Ankara	Eskişehir
Ekib 13	M115	M139	400	634	Eskişehir	İstanbul
			1000	1329	İstanbul	Eskişehir
Ekib 14	M124	M132	550	860	Eskişehir	İstanbul
			1115	1430	İstanbul	Eskişehir

Ekip 15	M22	M89	550	820	Eskişehir	İstanbul
			1000	1300	İstanbul	Eskişehir
Ekip 16	M126	M4	850	1112	Eskişehir	İstanbul
			1204	1440	İstanbul	Eskişehir
Ekip 17	M102	M25	700	883	Eskişehir	Ankara
			1100	1308	Ankara	Eskişehir
			420	495	Eskişehir	Kütahya
			550	625	Kütahya	Eskişehir
Ekip 18	Y184	M125	150	448	Eskişehir	İstanbul
			780	1006	İstanbul	Eskişehir
Ekip 19	M100	M133	650	959	Eskişehir	İstanbul
			1025	1323	İstanbul	Eskişehir
Ekip 20	M27	Y8	20	353	Eskişehir	İstanbul
			400	727	İstanbul	Eskişehir
Ekip 21	Y181	M19	300	570	Eskişehir	İstanbul
			900	1195	İstanbul	Eskişehir
Ekip 22	Y10	M97	300	530	Eskişehir	İstanbul
			580	806	İstanbul	Eskişehir
			1000	1075	Eskişehir	Kütahya
			1150	1225	Kütahya	Eskişehir
Ekip 23	M136	M1	150	448	Eskişehir	İstanbul
			520	815	İstanbul	Eskişehir
Ekip 24	M96	M75	220	534	Eskişehir	İstanbul
			630	890	İstanbul	Eskişehir
Ekip 25	M117	Y151	650	863	Eskişehir	Ankara
			1000	1220	Ankara	Eskişehir
Ekip 26	M44	Y118	80	317	Eskişehir	İstanbul
			450	748	İstanbul	Eskişehir
Ekip 27	M127	M33	650	975	Eskişehir	İstanbul
			1180	1414	İstanbul	Eskişehir

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, günlük demiryolu ekip çizelgeleme problemi ve ekip atama problemi çözülmüştür. TCDD Eskişehir Depo Müdürlüğü'nün planlamasını yaptığı yeni tren çizelgesinde yer alan 62 adet tren seferi için ekip çizelgeleme problemi çözülmüştür. Sütun oluşturma algoritmasında, ana problem bir küme kapsama problemi, alt problem ise bir en kısa yol problemi olarak modellenmiştir. Sütun oluşturma algoritmasının ana problemi ve alt problem bütünleşik olarak GAMS eniyileme programında kodlanmış ve bu bütünleşik model ardıştırmalı olarak çözülmüştür. Bu tür bir kodlama yapısı, algoritmanın uygulanabilirliği açısından oldukça büyük yarar sağlamaktadır. Problemin sütun oluşturma algoritması ile 75 iterasyonda çözülmesi sonucunda en düşük maliyet değeri olan 14072 değerine ulaşılmıştır. Problemin tüm eşleştirmeleri incelenecek olursa 27 sayısından çok daha fazla sayıda eşleştirme ile karşılaşılacağı kesindir, sütun oluşturma algoritması sayesinde tüm eşleştirmeleri bulmak ve bunlar arasından en iyilerini seçilmesine gerek kalmadan çok daha kısa sürede sonuca ulaşmak mümkün olmuştur. Bu çalışmada günlük eşleştirme problemine uygun bir çözüm elde edilmiştir, bu veriler ışığında haftalık istisnalar ve diğer tren seferleri de modele eklenerek, ileri tarihli versiyonlar elde edilebilir.

Mevcut durumda ekip çizelgeleri TCDD Eskişehir Depo Müdürlüğünde elle hazırlanmaktadır. Bu nedenle bu konuda görevli personelin oluşturduğu ekip çizelgeleri sezgisel olup, en iyilikten uzaktır. Çalışmada kullanılan sütun oluşturma algoritmasıyla ekip çizelgeleri, GAMS programı aracılığıyla 18 dakikalık sürede oluşturulmuştur.

Ekip eşleştirme problemi için, en iyi ekip eşleştirmeleri oluşturulmuş ve etkin bir ekip çizelgesi elde edilmiştir. Günlük çizelgelemedeki tren seferlerini gerçekleştirebilmek için toplam 27 adet ekibe ihtiyaç olduğu belirlenmiştir.

Ekip atama problemi için rassal bir sezgisel kullanılmıştır bunun gerekçesi, bu sezgiselin kısa sürede en iyiye yakın çözümler üretebilmesidir. Geliştirilen program iterasyon adedi 100.000 olacak şekilde çalıştırıldı. Program 78.162'ci iterasyonda 72.500 toplam atama puanına ulaşmıştır. Toplam atama puanı 100.000 iterasyon boyuca 15 defa iyileştirilmiştir. Şekil 6.2. incelendiğinde programın başlangıçta daha büyük bir eğim ile iyileştirmeler yaptığı iterasyon sayısı arttıkça eğimin azaldığı görülmektedir. Bu konu literatürde sezgisel algoritmaların avantajı olarak anlatılmaktadır.

Sonuç olarak bu tez kapsamında demiryolu planlama sürecinin son iki aşaması olan ekip çizelgeleme ve ekip atama problemleri ele alınmış olup her iki problemin çözümünde farklı yöntemler kullanılmıştır. Mevcut durumda elle çözülmeye çalışılan problemler için başarılı sonuçlar üreten matematiksel ve sezgisel algoritmalar önerilmiştir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abbink, E., Fischetti, M., Kroon, L., Timmer, G., Vromans, M., “Reinventing crew scheduling at Netherlands Railways” Erasmus Research Institute of Management 35, 393–401 (2005).
- Al-Sultan, K. S., Hussain, M. F. and Nizami, J. S., “A genetic algorithm for the set covering problem”, Journal of the OR Society, 47: 702-709 (1996).
- Alefragis, P., Goumopoulos, C., Housos, E., et al., “Parallel Crew Scheduling in PAROS”, Lecture Notes in Computer Science, 1470: 1104-1113 (1998).
- Anbil, R., Tanga, R., Johnson E.L.,” A Global Approach to Crew Pairing Optimization”, IBM System Journal, 31(1): 71-78 (1992).
- Ball, M., Roberts, A ., “A Graph Partitioning Approach to Airline Crew Scheduling”, Transportation Science, 19 (2): 107-126 (1985).
- Barnhart, C., Shenoi R.G., “An Approximate Model and Solution Approach for The Long-Haul Crew Pairing Problem”, Transportation Science, 32(3): 221-231 (1998).
- Caprara, A., Fischetti, M., Guida, P.L., Toth, P., and Vigo, D., “Solution of large scale railway crew planning problems: the Italian experience” In N.H.M. Wilson (ed.), Computer Aided Transit Scheduling, Springer-Verlag, 1999.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

Cavique, I., Rego, C., Themido, I., “Subgraph Ejection Chains and Tabu Search for The Crew Scheduling Problem” , Journal of The Operational Research Society, 50 (6): 608-616 (1999).

Çankaya, G., Arıkan, M. “Sütun Oluşturma Algoritması ile Bir Havayolu Ekip Çizelgelemesi Uygulaması”, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. 24:1 43-50 (2009)

Chu, H., Gelman, E., Johnson, E., L., “Solving Large Scale Crew Scheduling Problem”, European Journal of Operational Research, 97 (2): 260-268 (1997).

Crainic, T.G., Rousseau, J.M., “The Column Generation Principle and The Airline Crew Scheduling Problem”, INFOR, 25: 136-151 (1987).

Dantzig, G. B., “Linear Programming and Extensions”, Princeton University Press, New Jersey, 65-68 (1963).

Doğramacı, A., Surkis J., “Evaluation of a Heuristic Scheduling Independent Jobs on Parallel Identical Processors”, Management Science, Vol. 25(1979).

Elmas Ç., “Yapay Sinir Ağları (Kuram, Mimari, Eğitimi Uygulama)”, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 23-24 (2003).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

- Emden-Weinert, T., Proksch, M., “Best Practice Simulated Annealing for The Airline Crew Scheduling Problem” , Journal of Heuristics, 5 (4): 419-436 (1999).
- Ernst, A. T., Jiang, H., Krishnamoorthy , M., Sier D., “Staff Scheduling and Rostering: A Review of Applications, Methods and Models”, European Journal of Operational Research, 153: 3–27 (2004).
- Erwin, K. “Solving Multiobjective Models With GAMS”, GAMS Dökümanı, A.B.D. (2002).
- Friberg, C., Haase, K., “An Exact Branch and Cut Algorithm for The Vehicle and Crew Scheduling Problem” , Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, 471: 63-80 (1999).
- Gamache, M., Hertz, A., Ouellet, J. O., “A Graph Coloring Model for A Feasibility Problem in Monthly Crew Scheduling with Preferential Bidding”, Computers & Operations Research, 34 (8): 2384-2395 (2007).
- Geyik, F. ve Cedimoğlu, İ.H., “Komşuluk Arama Yöntemleriyle Atölye Tipi Çizelgeleme İçin Kullanılan Komşuluk Yapıları”, YA/EM XXII. Ulusal Kongresi, (2001).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

Goldberg, D.E., “Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning”, Addison Wesley Publishing Company, USA (1989).

Gopalakrishnan, B., Johnson, E. L., “Airline Crew Scheduling: State-of-The-Art”, Annals of Operations Research, 140 (1): 305-337 (2005).

Gopalan, R., Talluri, K. T., “Mathematical Models in Airline Schedule Planning: A Survey”, Annals of Operations Research, 76: 155-185 (1998).

Hoffman, K.L., Padberg, M., “Solving Airline Crew Scheduling Problems by Branch-and-Cut” , Management Science, 39 (6): 657-682 (1993).

Huisman, D., Kroon, L.G., Lentink, R.M., Vromans, M.J.C.M., “Operations research in passenger railway transportation” Statistica Neerlandica, 59: 467–497 (2005b).

Huisman, D., and Wagelmans, A., “A Solution Approach for Dynamic Vehicle and Crew Scheduling”, European Journal of Operational Research, 172: 453-471 (2006).

Huisman, D., “A column generation approach for the rail crew re-scheduling problem” , European Journal of Operational Research, 180:163–173 (2007).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

- Karaoğlan, İ. ve Altıparmak, F., “Konkav maliyetli ulaştırma problemi için genetik algoritma tabanlı sezgisel bir yaklaşım”, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 20(4): 443-454 (2005).
- Kuhn, H. W., “The Hungarian Method for the Assignment Problem”, Naval Research Logistics Quarterly, 2: 1-2 (1955).
- Kohl, N., Karisch S.E., “Airline Crew Rostering: Problem Types, Modeling, and Optimization”, Annals of Operations Research, 127: 223-257 (2004).
- Kornilakis, H., Stamatopoulos, P., “Crew Pairing Optimization with Genetic Algorithms” , Lecture Notes in Artificial Intelligence, 2308: 109-120 (2002).
- Lavoie, S., Minoux, M., Odier, E., “A New Approach For Crew Pairing Problems By Column Generation with An Application to Air Transportation”, European Journal of Operations Research, 35(1): 45-58 (1988).
- Levine, D., “Application of A Hybrid Genetic Algorithm to Airline Crew Scheduling” , Computers & Operations Research, 23 (6): 547-558 (1996).
- Mingozi, A., Boschetti, M. A., Ricciardelli, S., Et Al., “A Set Partitioning Approach to The Crew Scheduling Problem” , Operations Research, 47 (6): 873-888 (1999).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

Moudani, El. W., Cosenza, C.A.N, Mora-Camino, F., “An intelligent approach for solving the airline crew rostering problem”, Computer Systems and Applications, ACS/IEEE International Conference , 73-79 (2001).

Orhan, İ., “Uçak bakım planlamasının en iyilenmesine yönelik bir karar destek tasarımı” , Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi, 56-57 (2007).

Öner, A., Ülengin , F., “Atama problemi için yeni bir çözüm yaklaşımı” , İTÜ dergisi, 2(1):73-79(2003).

Papoutsis K., Valouxis C. and Housos E., “Column Generation Approach For The Timetabling Problem of Greek High Schools”, The Journal of Operational Society, 54(3): 230-238 (2003).

Park, T., Ryu, K. R., “Crew Pairing Optimization by A Genetic Algorithm with Unexpressed Genes” , Journal of Intelligent Manufacturing, 17 (4): 375-383 (2006/a).

Pinedo, M., “Workforce Scheduling”, Operations Scheduling with Applications in Manufacturing and Services, Mcgraw-Hill, Singapur, 186-207 (1999).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

Sarucan, A., “Bir Raylı Ulaşım Sisteminde Personel Çizelgeleme Problemine Bütünleşik Yaklaşım”, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, (1999).

Stojkovic, M., Soumis F., “An Optimization Model For The Simultaneous Operational Flight and Pilot Scheduling Problem”, Management Science, 47(9): 1290-1305 (2001).

Ulucan, A., Eryiğit M., “Hava Taşımacılığı Planlamasında Yöneylem Araştırması Modellerinin Kullanımı”, Ankara Üniversitesi SBF Dergisi, 59(4): 227-248 (2004).

Xu, J., Sohoni, M., McCleery, M., Bailey, T. G., “A Dynamic Neighborhood Based Tabu Search Algorithm for Real-World Flight Instructor Scheduling Problems”, European Journal of Operational Research, 169: 978–993 (2006).

Vance, P.H., Barnhart, C, Johnson, E.L., Et Al., “Airline Crew Scheduling: A New Formulation and Decomposition Algorithm” , Operations Research, 45 (2): 188-200 (1997).

Vanderbeck, F., Savelsbergh, M. W. P., “A Generic View of Dantzig-Wolfe Decomposition in Mixed Integer Programming”, Operations Research Letters, 34: 296-306 (2006).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

Winston, W. L., “Using Column Generation to Solve Large-Scale LPs”,
Operations Research: Applications and Algorithms, 3rd edition, Duxbury Press,
Belmont, California, 570-574 (1994).

Yen, J. W., Birge, J. R., “A Stochastic Programming Approach to The Airline
Crew Scheduling Problem”, Transportation Science, 40 (1): 3-14 (2006).