

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÖNCELİK SEVİYELERİNE SAHİP
ÇOKLU YETENEK GEREKTİREN İŞLER İÇİN
EKİP OLUŞTURMA, ÇİZELGELEME VE ROTALAMA PROBLEMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gözde KUTAYER BİLGİN

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Eda YÜCEL

HAZİRAN 2017

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığımı onaylarım.

.....
Prof. Dr. Tahir HANALIOĞLU
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 131311019 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Gözde KUTAYER BİLGİN** 'in ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**ÖNCELİK SEVİYELERİNE SAHİP ÇOKLU YETENEK GEREKTİREN İŞLER İÇİN EKİP OLUŞTURMA, ÇİZELGELEME VE ROTALAMA PROBLEMİ**" başlıklı tezi **19/06/2017** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Eda YÜCEL**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Eş Danışman : **Yrd. Doç. Dr. Gültekin KUYZU**
(Varsa) TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Osman ABUL (Başkan)**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Nilgün FESCİOĞLU ÜNVER
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Vedat BAYRAM
TED Üniversitesi

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Gözde KUTAYER BİLGİN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÖNCELİK SEVİYELERİNE SAHİP ÇOKLU YETENEK GEREKTİREN İŞLER İÇİN EKİP OLUŞTURMA, ÇİZELGELEME VE ROTALAMA PROBLEMİ

Gözde KUTAYER BİLGİN

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Eda YÜCEL

Tarih: Haziran 2017

Bu çalışmada, yerinde hizmet sağlayan tüm servis operasyonlarında gözlemlenen, çoklu yetenek gereksinimi içeren işgücü rotalama ve çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Problem, gerçek hayatta enerji dağıtım şirketlerinin günlük olarak karşılaştığı operasyonel problemlerden biri olan, sahadaki çalışanların işlere daha etkin bir şekilde atanması gerekliliğinden yola çıkılarak tanımlanmıştır. Amaç, farklı coğrafi lokasyonlarda, farklı önceliklere ve yetenek gereksinimlerine sahip olan işleri, farklı yeteneklerdeki teknisyenlerden takımlar oluşturarak, bu takımlara atamak ve takımların günlük rotalarını belirlemektir. Öncelikle, iki öncelikli amaç fonksiyonu bulunan bir matematiksel model geliştirilmiştir. Birinci amaç fonksiyonu, önceliklerine göre ağırlıklandırılmış işlerin öncelikli tamamlanma süresini en küçüklemektir. İkinci amaç fonksiyonu ise, seyahat maliyetlerini, fazla mesai maliyetlerini ve geciken işlerden kaynaklanan ceza maliyetlerini içeren toplam operasyonel maliyetleri en küçüklemektir. Problemin boyutu büyüdükçe optimizasyon modelinin kabul edilebilir sürede, kabul edilebilir optimalite aralığında çözüm üretilmediği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, büyük ölçekli gerçekçi problemler için kısa sürede kaliteli çözümler üreten, çok safhalı bir sezgisel çözüm yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemin ilk safhasında ekipler oluşturulup, ikinci safhasında açgözlü bir yaklaşım

ile işlerin yetenek gereksinimleri ve ekiplerin yetenekleri doğrultusunda işlerin ekiplere atanması gerçekleştirilmiştir. Son safhasında da ekiplerin günlük rotaları belirlenmiştir. Geliştirilen yöntemin etkinliği hem rastgele türetilmiş hem de gerçekçi veri kümeleri üzerinde değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İşgücü çizelgeleme ve rotalama, Modelleme, Sezgisel yöntemler.



ABSTRACT

Master of Science

FORMING, SCHEDULING AND ROUTING FIELD SERVICE TEAMS FOR MULTI-SKILL TASKS WITH PRIORITY LEVELS

Gözde KUTAYER BİLGİN

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Industrial Engineering Science Programme

Supervisor: Asst. Prof. Eda YÜCEL

Date: June 2017

In this research, we study the multi-skill workforce scheduling and routing problem that exists in all service operations that provide services in customer premises. The problem originates from a real-life operational problem, faced by the electricity distribution companies on a daily basis, requiring efficient assignment of field service personnel to tasks. The problem aims to assign the tasks at different geographical locations with different priorities and skill level requirements to teams of technicians who have different skills. For the solution of the problem, firstly, a mathematical model that have two priority objective function is developed. At the first priority level, the objective function is minimize the makespan of the weighted jobs by priorities. At the second priority level, the objective is to minimize total daily operational costs, including travel costs, overtime costs, and penalty costs of late tasks. It has been observed that as the size of the problem grows, the optimization model can not provide a solution to the acceptable optimal range at acceptable time.

Therefore, a multi-phased heuristic is proposed that produces quality solutions in a short time for large-scale realistic problems. In the first phase of the heuristic, the teams are formed through a team building procedure. In the second phase, a greedy-

based approach is applied to assign tasks to the teams in accordance with their skills. In the last phase, the daily routes of teams are identified. The effectiveness of the heuristic is assessed using both randomly created and realistic problem instances.

Keywords: Workforce scheduling and routing, Modelling, Heuristics.



TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince bana rehberlik eden, değerli katkıları ve yardımları ile çalışmamı yönlendiren tez danışmanlarım Yrd. Doç. Dr. Eda YÜCEL ve Yrd. Doç. Dr. Gültekin KUYZU'ya, tezimi okuyarak tavsiyelerde bulunan jüri üyeleri Doç. Dr. Osman ABUL, Yrd. Doç. Dr. Nilgün FESCİOĞLU ÜNVER ve Yrd. Doç. Dr. Vedat BAYRAM'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, yüksek lisans eğitimim boyunca burs sağladığı için TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

Çalışmalarımda büyük katkısı ve desteği olan canım arkadaşım Seray ÇAKIRGİL'e, yüksek lisansım boyunca destek ve dostluklarını benden esirgemeyen can dostlarım Firdevsi Ayça DENİZ KIZILÖZ ve Merve SELÇUK ŞİMŞEK'e çok teşekkür ederim.

Maddi manevi her konuda arkamda duran, eğitim hayatım boyunca beni her zaman destekleyen, azmi ve başarılarıyla hayattaki idolüm ve yol göstericim olan canım babam'a, bugünlere gelmemi sağlayan, her zaman özverilerin en büyüğünü sergileyen, bu hayattaki şansım olan canım annem'e teşekkürü bir borç bilirim.

Teşekkürün en sonuncusu ama en büyüğü; meslektaşım, yol arkadaşım, bilgisi ve sevgisiyle en büyük destekçim eşim'e. Bana olan inancı, desteği, sabrı ve cesaretlendirmesi için sonsuz teşekkürler.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEZ BİLDİRİMİ	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	5
2.1 Problemin Literatürde Ele Alınan Karakteristik Özellikleri	6
2.1.1 Rotalama	6
2.1.2 Planlama ufku	6
2.1.3 Zaman penceresi	7
2.1.4 Ulaşım modları.....	7
2.1.5 Ekip oluşturma	8
2.1.6 Bağlantılı işler	8
2.1.7 Çoklu yetenek	8
2.1.8 Rassallık	9
2.1.9 Amaç	9
3. PROBLEM TANIMI	11
3.1 Mevcut Operasyonel Akış	11
3.2 Problem Tanımı	12
4. ENİYİLEME MODELİ	15
4.1 Eniyileme Modeli Kısıt Açıklamaları	18
5. SEZGİSEL ÇÖZÜM YÖNTEMİ	21
5.1 Sezgisel Çözüm Yöntemi Algoritma Adımları	21
5.1.1 İşlerin öncelik skorlarına göre sıralanması	21
5.1.2 Ekiplerin oluşturulması ve ilk işlerinin atanması.....	24
5.1.3 Oluşturulan ekiplere kalan işlerin atanması	28
5.1.4 Ekiplerin rotalarının belirlenmesi	30
6. TEST VERİLERİNİN OLUŞTURULMASI	33
6.1 Rastgele Türetilmiş Test Verilerinin Oluşturulması	33
6.2 Gerçekçi Test Verilerinin Oluşturulması	34
6.2.1 Gerçekçi test veri kümesi için uygulanan ön çalışmalar.....	34
6.2.1.1 İş gruplarının oluşturulması	34
6.2.1.2 İş gruplarının işlem sürelerinin belirlenmesi.....	35
6.2.1.3 İş gruplarının başlangıç öncelik ağırlıklarının belirlenmesi.....	35
7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	37
7.1 Eniyileme Modeli Deneysel Çalışmalar.....	37
7.1.1 Tek bir yetenek ve tek bir öncelik kümesi içeren küçük ölçekli problem örnekleri için model sonuçları.....	37

7.1.2 Çoklu yetenek ve tek öncelik kümesi içeren küçük ölçekli problem örnekleri için model sonuçları.....	37
7.1.3 Çoklu yetenek ve çoklu öncelik kümesi içeren küçük ölçekli problem örnekleri için model sonuçları.....	41
7.2 Sezgisel Çözüm Yöntemi Deneysel Çalışmalar	44
7.2.1 Rastgele türetilmiş problem örnekleri için sezgisel sonuçlar.....	44
7.2.2 Gerçekçi problem örnekleri için sezgisel sonuçları	45
7.3 Eniyileme Modeli ve Sezgisel Çözüm Yöntemi Karşılaştırma Sonuçları.....	49
8. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME	53
KAYNAKLAR.....	55
ÖZGEÇMİŞ.....	57



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 : Mevcut operasyonel akış 12



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 6.1 : Rastgele türetilmiş küçük ölçekli problem örnekleri kümesi için test parametre değerleri.....	33
Çizelge 6.2 : Rastgele türetilmiş büyük ölçekli problem örnekleri kümesi için test parametre değerleri.....	34
Çizelge 6.3 : Bölgeler için test parametre değerleri.....	36
Çizelge 7.1 : Tek bir yetenek ve tek bir öncelik kümesi içeren model sonuçları	37
Çizelge 7.2 : İki farklı yetenek ve tek bir öncelik kümesi içeren model sonuçları	39
Çizelge 7.3 : Üç farklı yetenek ve tek bir öncelik kümesi içeren model sonuçları....	40
Çizelge 7.4 : Çoklu yetenek ve çoklu öncelik sınıfı içeren M1 model sonuçları.....	42
Çizelge 7.5 : Çoklu yetenek ve çoklu öncelik sınıfı içeren M2 model sonuçları.....	43
Çizelge 7.6 : α ve β kriter oranları	44
Çizelge 7.7 : Sezgisel çözüm yöntemi rastgele türetilmiş küçük problem örnekleri üzerindeki sonuçları	46
Çizelge 7.8 : Sezgisel çözüm yöntemi rastgele türetilmiş büyük problem örnekleri üzerindeki sonuçları	47
Çizelge 7.9 : Mevcut ekipler ile alınan ve ekiplerin de sezgisel ile oluşturulmasıyla alınan sezgisel sonuçları	48
Çizelge 7.10 : Eniyileme modeli ile sezgisel yöntem çözüm karşılaştırılması	51

KISALTMALAR

İÇRP	: İş gücü çizelgeleme ve rotalama problemi
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
KKP	: Kurumsal Kaynak Planlama



1. GİRİŞ

Yerinde servis hizmetlerine, diğer bir deyişle, servis hizmetlerinin müşterilerin bulunduğu yerde verilmesine duyulan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Evde sunulan sağlık hizmetleri, teknisyenlerin müşteri noktalarında sundukları servis hizmetleri, güvenlik şirketlerinin sundukları kontrol hizmetleri yerinde servis hizmeti kullanım alanları arasındadır.

Gerçek hayatta bu alanlarda karşılaşılan, teknisyenlerin müşterilere ait mülkiyetlerde gerçekleştirecekleri bakım veya tamir faaliyetlerinin çizelgelenmesi, gezici sağlık ekiplerinin ya da hemşirelerin görev çizelgelerinin hazırlanması, güvenlik ekiplerinin belirlenen tüm hedef alanı rotalayacak şekilde günlük-saatlik rotalarının belirlenmesi gibi problemler, işgücü çizelgeleme ve rotalama problemleri (İÇRP) olarak ele alınmaktadır.

İşgücü çizelgeleme ve rotalama problemlerinde, farklı lokasyonlarda, çeşitli yetenek gereksinimleri ve farklı öncelikleri olan işler ve bu işleri gerçekleştirebilecek çeşitli yeteneklere sahip personeller vardır. Ancak; bir gün içinde gerçekleştirilmesi gereken iş sayısı, çalışan sayısından oldukça fazladır.

Personeller işleri gerçekleştirmek için seyahat etmektedirler. Seyahat; özel bir araç ile, toplu taşıma ile, bisiklet ile ya da yürüyerek gerçekleştirilebilmektedir. Çalışanlara ya da çalışanlardan oluşan ekiplere gün içerisinde farklı lokasyonlarda gerçekleştirilmesi gereken birden fazla iş atanması sonucu bir rotalama problemi ortaya çıkmaktadır.

Bir iş için birden fazla personel/yetenek gereksiniminin gerektiği durumlar bulunmaktadır. İÇRP'de, çalışanların yetenekleri ve bu yeteneklerle eşleşen işlerde görevlendirilmeleri önemli bir kısıttır. Dolayısıyla, İÇRP, temelde, işlerin gerektirdiği yeteneklere sahip çalışanlar tarafından gerçekleştirilmesinin sağlanması ve çalışanların verimli şekilde kullanılması amaçlarını içermektedir.

Literatürde yer alan İÇRP çalışmalarına bakıldığında, farklı uygulama alanları ile karşılaşılmaktadır. Bu alanlar arasında en fazla çalışmanın evde sağlık hizmetinde yapıldığı görülmektedir. Bu problemlerde, çalışanların çalışma saatlerindeki

kısıtlamalar, işlerin farklı yetkinlikler gerektirmesi, işler arası eş zamanlılık ihtiyacı, işlerin servis sürelerindeki farklılıklar gibi özellikler bulunmaktadır. Engelli ve yaşlı insanlara günlük aktivitelerinde yardım etmeye yönelik hizmetleri içeren ev hizmetleri alanındaki çalışmalarda ise, ulaşım modu, zaman penceresi, eş zamanlılık ele alınırken, bağlantılı işlerin olma durumu dikkate alınmamaktadır.

Literatürde yer alan gezici güvenlik hizmetleri çalışmalarında ise, zaman penceresi varlığı ve işlerin yetenek gereksinimi bulunma durumu dikkate alınmaktadır. Bu alanda, çalışanların farklı müşteri lokasyonlarına periyodik ziyaretleri söz konusudur.

Bu çalışma kapsamında ele alınan problemde, işlerin zaman pencereleri, farklı ve çoklu yetenek gereksinimleri, takım oluşturma ihtiyacı ve iş servis süreleri dikkate alınmaktadır. Bu yönleriyle çalışma, yerinde bakım, servis ve arıza hizmetleri uygulama alanında yer almaktadır.

Farklı uygulama alanlarındaki farklı İÇRP uygulamalarında çeşitli ulaşım şekilleri ile karşılaşılmaktadır. Örneğin, yerinde bakım, servis ve tamirat hizmetleri alanında çalışanlar yeteneklerine göre oluşturulan ekipler halinde ve gerçekleştirecekleri işlerde ihtiyaç duyacakları ekipmanları taşıyabilecekleri özel araçlar ile seyahat ederlerken, güvenlik sektöründe karşılaşılan problemlerde farklı yetenek gereksinimleri bulunmamakta, yapılacak iş, gezilmesi gereken yollardan oluşmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, genelde yerinde servis hizmeti sağlayan tüm servis operasyonlarında, özelde enerji dağıtım sektöründe gözlemlenen yetenek gereksinimleri varlığında işgücü çizelgeleme ve rotalama problemi ele alınmıştır. Problem, Enerji Dağıtım sektöründe faaliyet gösteren şirketlerin karşılaştığı ve günlük olarak çözülmesi gereken operasyonel problemlerden biri olan, sahadaki ekiplerin ve işlerin daha etkin bir şekilde takibi ve atanması problemidir.

Enerji dağıtım sektörünün geneline bakıldığında, iş yükünün mevcut işgücü kapasitesinden fazla oluşu (abone sayısının fazlalığı), iş tiplerinin fazlalığı (abonelik taşıma, borç kaynaklı kesme /açma işlemleri, arıza giderme faaliyetleri, vb.), Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK)'nun belirlediği regülasyon kuralları (sözleşme kuralları, iş gecikme bedelleri, iş öncelikleri vb.), iş tipleri için gereksinimlerin (yetkinlik, süre) farklılığı ve çalışanların farklı yetkinliklere sahip olması, çözüm yöntemleri geliştirilmesinin ihtiyaç duyulmasının nedenleri arasındadır. Enerji

dağıtım sektörü özelinde; günlük operasyonel problemin çözümü için, yetenek gerekliliği, iş öncelikleri ve coğrafi lokasyon gibi farklılıklarını dikkate alabilen, çalışanlardan yeteneklerine göre ekipler oluşturabilen ve bu ekiplere işler atayabilen çözüm yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu bağlamda, çalışmanın genel amacı, işlerin önceliklerini ve yetenek gereksinimlerini dikkate alacak şekilde, en az maliyet ile en çok işin gerçekleştirilmesini sağlamak için; ekiplerin oluşturulması ve bu ekiplerin günlük iş atamaları ile rotalarının belirlenmesidir.

Problemin çözümü için öncelikle bir matematiksel model geliştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada, iş sayısı ve iş yetenek gereksinimi ile teknisyen yetenek çeşitliliğinin artması sonucu matematiksel modelin makul zamanlarda çözüm üretilmediği görülmüştür. Bu nedenle daha kısa sürede kaliteli sonuçlar almak için sezgisel bir yöntem geliştirilmiştir. Yapılan analizlerde, sezgisel yöntemin, kısa sürede iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Tez çalışması 8 bölüm halinde incelenmektedir. Bir sonraki bölümde, işgücü çizelgeleme ve rotalama çalışmalarının derlendiği bir literatür çalışması ve ele alınan problemin karakteristik özellikleri yer almaktadır. 3'üncü bölümde mevcut durum ve detaylı problem tanımı anlatılmaktadır. 4'üncü bölümde geliştirilen eniyileme modeli ele alınmaktadır. 5'inci bölümde gerçekçi boyuttaki problem örneklerinin çözümü için geliştirilen sezgisel çözüm yöntemi anlatılmaktadır. 6'ncı bölümde hem matematiksel modelin hem de sezgisel çözüm yönteminin performanslarını değerlendirmek için kullanılan test verilerinin oluşturulması anlatılmaktadır. 7'nci bölümde ise matematiksel model ve sezgisel yöntemin performanslarının değerlendirildiği deneysel çalışmalar ele alınmaktadır. Son olarak, 8'inci bölümde, sonuçların değerlendirilmesi ve gelecekte yapılabilecek çalışmalardan bahsedilmiştir.



2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Literatürde, yerinde servis hizmetlerine ilişkin problemlerin birçok uygulama alanında çalışıldığı görülmektedir. Örnek olarak, evde sunulan sağlık hizmetleri (Cheng and Rich, 1998), ev hizmetleri (Eveborn and Rönnqvist, 2009), teknisyenlerin müşteri noktalarında sundukları servis, bakım veya tamirat hizmetleri (Cordeau et al., 2010), güvenlik şirketlerinin farklı müşteri konumları için sundukları kontrol hizmetleri (Misir et al., 2011) verilebilir.

Servis sektöründeki tüm alanlarda olduğu gibi, yerinde servis sektöründe de hizmet kalitesini artırarak maliyetleri düşürme ihtiyacı bulunmaktadır (Fikar and Hirsch, 2016). Bu nedenle, yerinde servis hizmetlerinin tüm uygulama alanlarında, temel amaç, rotalama ve çizelgeleme içeren operasyonel planlamayı yüksek hizmet kalitesi ve düşük maliyet ile gerçekleştirmektir. Bu amaç kapsamında, işgücü çizelgeleme ve rotalama problemleri (İÇRP) tanımlanmıştır (Salazar et al., 2016).

Literatürde yer alan İÇRP çalışmaları, farklı amaçlar içermektedir. İşlerin en kısa sürede tamamlanması (Cordeau et al., 2010; Fırat and Hurkens, 2012), atanan iş sayısının enbüyüklenmesi (Rasmussen et al., 2012), çalışan sayısının enküçüklenmesi (Allaoua et al., 2013), operasyonel (ulaşım, fazla mesai, vb.) maliyetlerinin enküçüklenmesi (Kovacs et al., 2012; Trautsamwieser and Hirsch, 2014; Zamorano and Stolletz, 2016) veya bunların birden fazlasının ağırlıklandırılmış amaç fonksiyonunun eniyilenmesi (Hiermann et al., 2015; Mısır and Smet, 2015) literatürdeki örnekler arasında yer almaktadır.

Bu çalışmada ele alınan problemde operasyonel maliyetlerin düşürülmesi amacının yanı sıra yüksek öneme sahip işlerin, düşük öneme sahip işlerden önce gerçekleştirilmesi de büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, problem kapsamında çoklu önceliklendirilmiş amaç fonksiyonları kullanılmıştır. Birinci öncelikli amaç, önceliklerine göre ağırlıklandırılmış işlerin tamamlanma sürelerini en küçüklemeektir. İkinci öncelikli amaç ise, operasyonel maliyetleri en küçüklemeektir.

2.1 Problemin Literatürde Ele Alınan Karakteristik Özellikleri

Çalışma kapsamında ele alınan problem ile literatürde yer alan, benzer nitelikler taşıyan çalışmaların genel karakteristik özellikleri ve bu çalışmada ele alınış şekilleri aşağıda yer alan 9 başlıkta incelenmiştir:

2.1.1 Rotalama

Servis sektöründeki işgücü çizelgeleme problemlerinde, etkin planlama yapılmadığında, çalışanlar gün içinde çalıştıkları süreden daha fazla zamanı seyahat ederek kaybedebilmektedir. Bunun sonucunda işlerin tamamlanmaları için gerekli olan son teslim sürelerinin aşılması söz konusu olmaktadır. Çalışanların seyahat sürelerini düşürmek büyük önem taşımaktadır (Leonid Engelson, 2010). Bu çalışma kapsamında ele alınan problemde, çalışanların seyahat sürelerinin de dikkate alındığı, işlerin son teslim tarihlerini geçirmeyecek şekilde bir rotalama yapılması hedeflenmiştir. Bu çalışmaya pek çok açıdan benzerlik gösteren Cordeau vd. (Cordeau et al., 2010) ve Fırat ve Hurkens (Fırat and Hurkens, 2012), 2007 yılında Fransa Yöneyem Araştırma Derneği tarafından düzenlenen ROADEF Challenge kapsamında işgücü çizelgeleme problemini çalışmış, ancak çalışmalarını kapsamında rotalamayı ele almamışlardır.

2.1.2 Planlama ufku

Literatürde yer alan çalışmalarda, planlama ufku, tek-periyot ve çok-periyot olmak üzere iki şekilde ele alınmaktadır. Blakeley vd. (Blakeley et al., 2003), çok yetenek seviyeleri varlığında, çok-periyotlu teknisyen çizelgeleme ve rotalama problemini çalışmış ancak bu çalışma kapsamında ele alınan probleminden farklı olarak, takım oluşturma kararlarını dahil etmemiştir. Tang vd. (Tang et al., 2007), teknisyenlerin farklı lokasyonlardaki bakım işlerine atanması ve rotalarının belirlenmesi problemini çok-periyotlu olarak çalışmış ancak teknisyenlerin hepsinin homojen yeteneklere sahip olduğunu varsaymıştır. Bostel vd (Bostel et al., 2008) de benzer şekilde homojen işgücü varsayımı ile saha ekiplerinin çok-periyotlu planlama ve rotalama problemini ele almıştır.

Çok-periyotlu İÇRP çalışmalarında, Periyodik Araç Rotalama Problemine benzer şekilde (PARP) (Francis et al., 2008), teknisyenler verilen ziyaret sıklıklarına göre oluşturulan rotalara atanmakta ve müşteriler talep ettikleri ziyaret günlerinde ziyaret edilmektedir. Tang vd (Tang et al., 2007) da ele aldığı çalışmada, çok-periyot

yaklaşımını benimsemiştir. Barrera vd. (Barrera et al., 2012) homojen işgücü varsayımı ile sağlık ekiplerinin gezici sağlık servislerinin çok-periyotlu çizelgeleme ve rotalama problemini çalışmıştır. Shao vd. (Shao et al., 2012) farklı müşteri lokasyonlarında hizmet veren terapistlerin haftalık rotalama ve çizelgeleme problemi üzerine çalışmıştır. Bard vd. (Bard et al., 2014) çok-periyot yaklaşımını kullanmıştır. Zamorano ve Stolletz (Zamorano and Stolletz, 2016) çoklu yetenek varlığında çok-periyotlu teknisyen rotalama ve çizelgeleme problemi üzerine çalışmıştır. Çok-periyotlu planlama, planlama ufkunun büyük oluşundan kaynaklı olarak, daha kapsamlı çalışma saati düzenlemelerinin dikkate alınmasını gerektirmektedir.

Optimizasyon problemlerinde, genelde, çok-periyot yaklaşımı, stratejik karar verme seviyesinde, tek-periyot yaklaşımı ise operasyonel karar verme seviyesinde kullanılmaktadır. Ancak; literatürdeki çok-periyotlu İÇRP çalışmalarının (Bard et al., 2014; Blakeley et al., 2003; Bostel et al., 2008; Shao et al., 2012; Tang et al., 2007) stratejik karar verme değil, operasyonel karar verme seviyesinde oldukları görülmektedir. Operasyonel problem çalışılmasına rağmen çok-periyotlu olarak ele alınmalarının nedeni, periyodik ziyaret gereksiniminin bulunmasıdır.

Hindle vd. (Hindle et al., 2000), Cordeau vd. (Cordeau et al., 2010), Kovacs vd. (Kovacs et al., 2012), Rest ve Hirsch (Rest and Hirsch, 2015) çalışmalarında tek bir günü içeren sürekli planlama ufkuna yer vermiştir. Bu tez kapsamında da, çoklu yetenek gereksinimlerine sahip işlerin çoklu yeteneklere sahip teknisyenlerden oluşan ekiplere, tek-periyotlu-sürekli olacak şekilde günlük planlarının atanması ve ekiplerin günlük rotalarının belirlenmesi problemi çalışılmıştır.

2.1.3 Zaman penceresi

Ele alınan çalışma, gerçek hayatta enerji dağıtım sektöründe karşılaşılan bir problem olduğundan, işlerin belirli bir zaman aralığı içerisinde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Benzer şekilde Cordeau vd. (Cordeau et al., 2010)'nin ele aldığı çalışma olan teknisyen – görev atama probleminde de, işlerin belirli bir zaman penceresinde tamamlanması gerekliliği, bu durumun gerçekleşmemesi durumunda ceza maliyetinin ortaya çıkması durumunu ele alınmıştır.

2.1.4 Ulaşım modları

Ulaşım; özel bir araç ile, toplu taşıma ile, bisiklet ile ya da yürüyerek gerçekleştirilebilir. Literatürde yer alan İÇRP problemlerinde, farklı ulaşım çeşitleri

kullanıldığı görülmektedir. Hiermann vd. (Hiermann et al., 2015) ve Fikar vd. (Fikar and Hirsch, 2016) sağlık çalışanlarının toplu taşıma ile de seyahat etme durumlarını ele almıştır. Bu problemde, ekipler, atanan işleri gerçekleştirmek için gerekli ekipmanları firmaya ait servis araçlarında taşınmakta ve bu araçlarla seyahat etmektedir. Bu nedenle, ele alınan problemde tek bir ulaşım modu olduğu varsayılmaktadır.

2.1.5 Ekip oluşturma

Literatürde, bir işi birden fazla çalışanın aynı anda yapma gerekliliği bazı çalışmalarda eş zamanlılık olarak ele alınmaktadır. Bu durum, ekip oluşturma gerekliliğini beraberinde getirmiştir. Cordeau vd. (Cordeau et al., 2010), Fırat ve Hurkens (Fırat and Hurkens, 2012), Kovacs vd. (Kovacs et al., 2012) ve Zamorano ve Stolletz (Zamorano and Stolletz, 2016) çalışanların yeteneklerine göre ekiplerin oluşturulması ve bu ekiplerin işlere atanmasını birlikte ele almaktadır. Bu çalışma kapsamında da ele alınan çalışanların farklı yetenekleri bulunmaktadır ve Cordeau vd. (Cordeau et al., 2010)'nin çalışmalarında yaptığı gibi, ekiplerin, çalışanların yeteneklerine göre oluşturulup, işlerin bu ekiplere yetenek gereksinimlerine göre atanması kararları birlikte ele alınmıştır.

2.1.6 Bağlantılı işler

Literatürde yer alan bazı çalışmalarda, işler arasında zamana bağlı ilişkiler ele alınmaktadır. Bu durum, işler arasında öncüllük – ardıllık ilişkisi olmasını beraberinde getirmektedir. Cordeau vd. (Cordeau et al., 2010) ve Meisel vd. (Goel and Meisel, 2013) çalışmalarında, atanacak işler arasında bağlı bir ilişki bulunmasını ele almaktadır. Kovacs vd. (Kovacs et al., 2012) ve Zamorano ve Stolletz (Zamorano and Stolletz, 2016)'in çalışmalarında ise, işler arasındaki ilişkileri ihmal eden veya işler arasında ilişkilerin olmadığı problemler üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada, işler arası öncüllük – ardıllık ilişkisi olmadığı varsayılmaktadır.

2.1.7 Çoklu yetenek

İşgücü çizelgeleme ve rotalama problemlerinde, çalışanlar arasında yetenek farklılıklarının olduğu durumlar bulunmaktadır. Literatürde yer alan bazı çalışmalar, bu farklılıkları ihmal etmektedir. Goel ve Meisel (Goel and Meisel, 2013), İÇRP'yi çalışmış fakat yetenek farklılıklarını gözetmemiştir. Cordeau vd. (Cordeau et al., 2010), Fırat ve Hurkens (Fırat and Hurkens, 2012), Kovacs vd. (Kovacs et al., 2012)

ve Zamorano ve Stolletz (Zamorano and Stolletz, 2016) ise, çalışanların farklı yeteneklere sahip olduğu durumları ele almıştır. Bu çalışma kapsamında ele alınan problemde, işlerin farklı yetenek gereksinimleri bulunmasından dolayı, ekiplerin farklı yeteneklere sahip olması durumu dikkate alınmıştır.

2.1.8 Rassallık

Literatürde yer alan çalışmalardan Lanzarone ve Matta (Lanzaronea and Mattab, 2014) talepte rassallığı, Yuan vd. (Yuan et al., 2015) ise servis sürelerindeki rassallığı ele almıştır. Bu çalışmada ise, belirgin veri setinin bulunduğu bir çözüm yöntemi üzerine çalışılmıştır. Çalışma kapsamında veri seti içerisinde yer almayan, daha sonra ortaya çıkan işlere yer verilmemiştir.

2.1.9 Amaç

Literatürde yer alan çalışmalarda, çalışan sayısının enküçüklenmesi (Allaoua et al., 2013), operasyonel maliyetlerin enküçüklenmesi (Kovacs et al., 2012; Trautsamwieser and Hirsch, 2014; Zamorano and Stolletz, 2016), işlerin en kısa sürede tamamlanması (Cordeau et al., 2010; Fırat and Hurkens, 2012), atanan iş sayısının en büyüklenmesi (Rasmussen et al., 2012) veya bunların birden fazlasının ve çeşitli kısıtların ihlalinin ağırlıklandırılmış amaç fonksiyonunun en iyilenmesi (Hiermann et al., 2015; Mısır and Smet, 2015) gibi birçok farklı amaç fonksiyonuna rastlanmaktadır.

Bu proje kapsamında çoklu önceliklendirilmiş amaç fonksiyonları kullanılmıştır. Ele alınan problemde, işlerin her biri eşit öncelik seviyesine sahip değildir. Yüksek öneme sahip işlerin, düşük öneme sahip işlerden daha önce gerçekleştirilmesi büyük önem taşınmaktadır. Birçok yerinde servis hizmeti sektöründe bu durum yaşanmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada ele alınan İÇRP’de birinci öncelikli amaç, Cordeau vd. (Cordeau et al., 2010) ve Fırat ve Hurkens (Fırat and Hurkens, 2012)’in çalışmalarında ele aldıkları gibi, önceliklerine göre ağırlıklandırılmış işlerin tamamlanma sürelerini en küçükmektir. Bu şekilde, yüksek ağırlıktaki işlerin, düşük ağırlıktaki işlerden daha önce yapılması hedeflenmektedir. İkinci öncelikli amaç ise, seyahat maliyetlerini, fazla mesai maliyetlerini ve geciken işlerden kaynaklanan ceza maliyetlerini içeren toplam operasyonel maliyetlerin en küçüklemevidir.

Genel olarak bakıldığında, literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak, bu çalışmanın amacı, tek-periyotlu ve sürekli problem için çoklu yetenek gereksinimleri, ekip oluşturma, bu ekiplerin farklı yeteneklerinin bulunması, ekiplerin farklı yetenek

gereksinimleri gerektiren işlere atanması ve işlerin önceliklerine göre ele alınması ile birden fazla önceliklendirilmiş amaç fonksiyonu dikkate alınarak küçük ölçekli problemler için kesin çözüm yöntemleri, büyük ölçekli gerçekçi problemler için ise sezgisel yöntemler geliştirmektedir.



3. PROBLEM TANIMI

Bu bölümde, çalışmaya konu olan problem detaylı bir şekilde tanımlanmıştır. Problemin endüstride karşılaştığı ve bu çalışma kapsamında ele alınan uygulama alanının mevcut operasyonel akışı, yetersizlikleri, problemin amacı ve ele alınış şekli ile ilgili bilgiler verilmektedir.

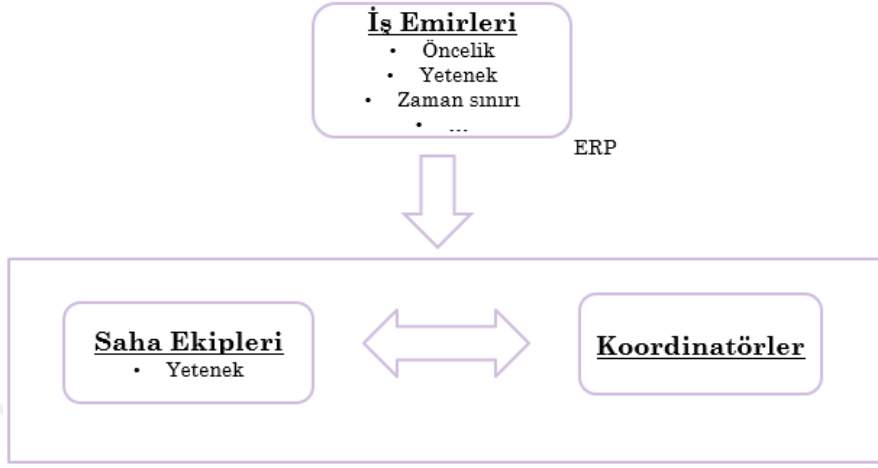
3.1 Mevcut Operasyonel Akış

Enerji dağıtım sektöründe bulunan mevcut operasyonel akış ele alındığında; müşteri dağıtım, arıza, bakım ve onarım operasyonlarına ait olan iş emirleri, kullanılan KKP (Kurumsal Kaynak Planlama) sistemi üzerinde oluşturulmakta ve takip edilmektedir. Saha ekipleri kendilerine tanımlı bölgelerdeki işleri yapmaktan sorumludur. Saha ekiplerinin sahip olduğu el terminalleri, mobil ağ üzerinden KKP sistemi ile entegre olarak kullanılmaktadır. Topluca ya da tek tek yaratılan iş emirleri, iş türü-bölge-ekip eşleşmesine göre ekiplerin el terminallerine gönderilmektedir. Ekip bazında planlama yapılmadığından iş türü-bölge eşleşmesine uyan iş emirleri tüm ekiplerin el terminallerine gönderilmektedir.

Bölgelerin operasyon merkezlerinde, saha ekiplerini yönlendiren koordinatörler bulunmaktadır. Koordinatörler, genel bir bölgesel yönlendirme yapmakta, ancak ekipler el terminalindeki listeden, yapacakları işleri kendileri seçip yapmaktadır. İşleyişin genel yapısı Şekil 3.1’de görülmektedir.

Mevcut durumdaki yetersizliklere bakıldığında, iş türü-bölge-ekip eşleşmesine uyan tüm iş emirlerinin tüm ekiplere gönderilmesi ve ekiplerin yapacakları işleri o listeden kendilerinin seçmesi, bunun sonucunda aynı işe birden fazla ekibin gitmesi veya bir işe giden hiç bir ekibin bulunmaması gibi koordinasyonsuzluk durumları ile karşılaşılmaktadır. Ekip oluşturma, koordinatörlerin bilgi ve deneyimine bırakılmakta, işlerin yetenek gereksinimlerine göre yapılmamaktadır. İş atamalarında, EPDK (Enerji Piyasaları Düzenleme Kurumu)’nın belirlediği regülasyon kurallarına uyulmamaktadır. İşler atanırken işlerin önceliklerinin dikkate alınmaması, ekiplerin

seyahat sürelerinin göz önünde bulundurulmaması ve işlerin yetenek gereksinimi ile ekiplerin yeteneklerinin örtüşmesinin dikkate alınmaması gibi yetersizlikler bulunmaktadır.



Şekil 3.1: Mevcut Operasyonel Akış

3.2 Problem Tanımı

Bu çalışmada, genelde yerinde servis sektöründe, özelde enerji dağıtım sektöründe gözlemlenen, yetenek gereksinimleri varlığında işgücü rotalama ve çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Bu problemde, günlük operasyonel problemlerin çözümü için, işlerin yetenek gerekliliği, öncelik ve coğrafi lokasyon gibi farklılıklarını dikkate alabilen, çalışanlardan yeteneklerine göre ekipler oluşturabilen ve bu ekiplere işler atayabilen çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Tamamlanması gereken n adet iş ve bu işlere atanacak m adet teknisyen bulunmaktadır. İşler farklı coğrafi lokasyonlarda yer almaktadır. Yüksek öneme sahip işlerin (örneğin, tüm bölgede elektrik kesintisine yol açan bir arıza), düşük öneme sahip işlere (örneğin, trafo bakımı) göre öncelikli gerçekleştirilmesi etkin planlama için büyük önem taşımaktadır. Bu durum, işler arası öncelik sıralaması ihtiyacını ortaya çıkartmaktadır. Bu çalışma kapsamında, işler önceliklere göre ağırlıklandırılmış, böylelikle yüksek ağırlığa sahip önemli işlerin, düşük ağırlığa sahip daha az önemli işlerden önce gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.

İşlerin farklı yetenek gereksinimleri, teknisyenlerin ise farklı yetenekleri bulunmaktadır. Teknisyenlerden oluşturulan, işlerin yetenek gereksinimlerini en iyi şekilde karşılayacak ekiplere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, iş yetenek

gereksinimlerini ve teknisyen yeteneklerini dikkate alarak ekiplerin oluşturulması, işlerin önceliklerine göre bu ekiplere atanması ve ekiplerin rotalarının belirlenmesi ele alınmıştır.

İşler farklı coğrafi lokasyonlarda yer almaktadır. Her işin işlem süresi sabittir, teknisyen sayısına bağlı olarak değişmez.

Problemin iki öncelikli amacı bulunmaktadır. Birinci öncelikli amaç, önceliklerine göre ağırlıklandırılmış işlerin tamamlanma süresini en küçükmektir. Böylelikle yüksek ağırlığa sahip işlerin, düşük ağırlığa sahip daha az önemli işlerden önce gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. İkinci öncelikli amaç ise, seyahat maliyetlerini, fazla mesai maliyetlerini ve geciken işlerden kaynaklanan ceza maliyetlerini içeren günlük operasyonel maliyetlerin en küçüklümesidir.



4. ENİYİLEME MODELİ

Hizmet verilen bölge bir çizge olarak ele alınırsa, $G(N', A)$ tüm bölgeyi ifade etmektedir. $N = \{1, \dots, n\}$ kümesi farklı coğrafi lokasyonlardaki işleri belirtmektedir. 0 ve $n + 1$ düğümleri, merkez lokasyonları temsil eden etkisiz düğümleri, $N' = N \cup \{0, n + 1\}$ ise düğüm kümesini ifade etmektedir. $A = \{(i, j) | i \in N' \setminus \{n + 1\}, j \in N' \setminus \{0\}, i \neq j\}$ kümesindeki ayrıtlar ise, işlerin bulunduğu lokasyonlar arasındaki yolları tanımlamaktadır. Her $(i, j) \in A$ ayrıtı için i işinden j işine ulaşma süresi t_{ij} , seyahat maliyeti ise c_{ij}^I olarak ifade edilmektedir. Her $i = 1, \dots, n$ için i işinin işlem süresi P_i 'dir. P_i sabittir, işe atanan teknisyen sayısına bağlı olarak değişmez. Her ekip, en fazla v adet teknisyenden oluşmaktadır. Bir teknisyen en fazla bir ekibe atanabilmektedir. Q yetenek kümesini; $q \in Q$, Q yetenek kümesinde yer alan bir yeteneği ifade etmektedir. Her iş $i \in N$ için yetenek gereksinimleri u_{iq} , teknisyenlerin yetenek seviyeleri g_{tq} 0-1 ikili parametresi ile tanımlanmaktadır. Planlama çevreninin bir gün olduğu ve $(0, \tau_{max}]$ zaman aralığına karşılık geldiği varsayılmaktadır. Planlama çevreninde her teknisyen için normal mesai $(0, \tau]$ zaman aralığına karşılık gelmekte, $(\tau, \tau_{max}]$ aralığındaki çalışmalar fazla mesai olarak nitelendirilmekte ve bu her birim fazla mesai için c^{II} fazla mesai maliyeti ödenmektedir. τ_{max} 'in tüm işlerin ekiplerce gerçekleştirilebileceği kadar büyük bir değer olarak belirlendiği varsayılmaktadır. Her bir iş i için; f_i işin tamamlanması gereken zaman sınırını belirtmektedir. İşin f_i 'den sonra tamamlanması durumunda gecikilen her birim süre için c_i^{III} gecikme maliyeti ödenmektedir. $P = \{1, \dots, \rho\}$, uyulması gereken regülasyonlara göre belirlenen öncelik sınıflarının kümesini ifade etmektedir. Her öncelik sınıfı $p \in P$ 'nin bir ağırlığı w_p bulunmaktadır. Her bir iş i için; N_{ip} 0-1 ikili parametresi, i işinin $p \in P$ öncelik sınıfına ait olup olmadığını belirtmektedir. Bir iş mutlaka bir öncelik sınıfına aittir ve bir iş birden fazla öncelik sınıfında yer alamaz. p öncelik sınıflarındaki işlerden en geç tamamlanan işin tamamlanma süresi C_p^{max} ile gösterilmektedir.

Bu modelde yer alan kümeler aşağıdaki gibidir:

- (1) N : Farklı coğrafi lokasyonlarda bulunan işlerin kümesi
- (2) N' : Başlangıç ve bitiş yapay işlerini de içeren işler kümesi
- (3) M : İşlere atanacak teknisyenlerin kümesi
- (4) K : Ekiplerin kümesi (Maksimum ekip sayısı problem girdisi olarak, ekiplerin araçlı olması durumunda araç sayısına, herhangi bir kısıt olmadığı durumda teknisyen sayısına eşit olacak şekilde belirlenmelidir.)
- (5) Q : Yetenek kümesi
- (6) P : Öncelik kümesi

Bu modelde kullanılan parametreler aşağıdaki gibidir:

- (1) P_i : i işinin işlem süresi, ($\forall i \in N$)
- (2) t_{ij} : i düğümünden j düğümüne ulaşma süresi, ($\forall (i, j) \in A$)
- (3) u_{iq} : i işi q yeteneğine sahip bir teknisyen gerektiriyorsa 1 değerini, diğer durumlarda 0 değerini alır. ($\forall i \in N, q \in Q$)
- (4) g_{tq} : t teknisyeni q yeteneğine sahip ise 1 değerini, diğer durumlarda 0 değerini alır. ($\forall t \in M, q \in Q$)
- (5) N_{ip} : i işi p öncelik kümesindeyse 1 değerini alır, diğer durumlarda 0 değerini alır. ($\forall i \in N, p \in P$)
- (6) w_p : p iş öncelik sınıfının ağırlığı, ($\forall p \in P$)
- (7) c_{ij}^I : i işinden j işine seyahat maliyeti ($\forall (i, j) \in N$)
- (8) c^{II} : Fazla mesai birim maliyeti
- (9) c_i^{III} : Gecikme birim maliyeti ($\forall i \in N$)
- (10) f_i : i işinin tamamlanması gereken zaman sınırı ($\forall i \in N$)
- (11) τ : Normal mesai zaman sınırı
- (12) τ_{max} : Fazla mesai zaman sınırı
- (13) B : Büyük bir sayı

Bu modelde kullanılan karar değişkenleri aşağıdaki gibidir:

- (1) S_{ik} : i işinin k ekibi tarafından tamamlanma zamanı ($\forall i \in N, k \in K$), ($S_{ik} \geq 0$)
- (2) $Z_{mk} = \begin{cases} 1; & m \text{ teknisyeni } k \text{ ekibine atanmışsa} \\ 0; & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$, ($\forall m \in M, k \in K$)
- (3) $Y_{ik} = \begin{cases} 1; & i \text{ işi } k \text{ ekibine atanmışsa} \\ 0; & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$, ($\forall i \in N, k \in K$)

- (4) $X_{ijk} : \begin{cases} 1; & k \text{ ekibi } i \text{ işini } j \text{ işinden hemen önce ziyaret ederse} \\ 0; & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$,
 $(\forall (i, j) \in A, k \in K)$
- (5) $c_i : i$ işinin tamamlanma zamanı $(\forall i \in N), (c_i \geq 0)$
- (6) $L_i : i$ işindeki gecikme miktarı $(\forall i \in N), (L_i \geq 0)$
- (7) $o_k : k$ ekibinin fazla mesai süresi $(\forall k \in K), (o_k \geq 0)$
- (8) $C_p^{max} : p$ öncelik sınıfındaki işlerden en geç tamamlanan işin tamamlanma süresi $(\forall p \in P), (C_p^{max} \geq 0)$

Model kapsamında iki öncelikli amaç fonksiyonu ele alınmıştır. Önceliklendirilmiş bu amaçlara göre; birinci öncelikli amaç fonksiyonu için, önceliklerine göre ağırlıklandırılmış işlerin ağırlıklandırılmış tamamlanma süresi toplamını en küçüklemeyi hedefleyen $M1$ modeli çözülmüştür. İkinci öncelikli amaç fonksiyonu ise $M1$ modelinden elde edilen en iyi çözümdeki $C_p^{max(*)}$ optimal değerlerini kullanarak operasyonel maliyetleri en küçüklemeyi hedefleyerek çözülmüştür.

İki modelin ortak kısıtları aşağıdaki gibidir:

$$\sum_{j \in N} X_{ijk} = 1 \quad \forall i = 0, \forall k \in K \quad (4.1)$$

$$\sum_{i \in N} X_{ijk} = 1 \quad \forall j = n + 1, \forall k \in K \quad (4.2)$$

$$\sum_{k \in K} Y_{ik} = 1 \quad \forall i \in N \quad (4.3)$$

$$\sum_{j \in N} X_{ijk} = Y_{ik} \quad \forall i \in N, \forall k \in K \quad (4.4)$$

$$X_{iik} = 0 \quad \forall i \in N', k \in K \quad (4.5)$$

$$\sum_{i \in N' - \{n+1\}} X_{ihk} - \sum_{j \in N' - \{0\}} X_{hjk} = 0 \quad \forall h \in N, \forall k \in K \quad (4.6)$$

$$S_{ik} \leq c_i \quad \forall i \in N, \forall k \in K \quad (4.7)$$

$$(S_{ik} + t_{ij} + P_j - S_{jk}) \leq B * (1 - X_{ijk}) \quad \forall (i, j) \in A, \forall k \in K \quad (4.8)$$

$$\sum_{k \in K} Z_{mk} \leq 1 \quad \forall m \in M \quad (4.9)$$

$$\sum_{m \in M} Z_{mk} \leq v \quad \forall k \in K \quad (4.10)$$

$$u_{iq} * y_{ik} \leq \sum_{t \in M} (g_{tq} * Z_{mk}) \quad \forall i \in N, \forall k \in K, \forall q \in Q \quad (4.11)$$

$$c_i - f_i \leq L_i \quad \forall i \in N \quad (4.12)$$

$$S_{n+1,k} \leq \tau_{max} \quad \forall k \in K \quad (4.13)$$

$$S_{n+1,k} - \tau \leq o_k \quad \forall k \in K \quad (4.14)$$

$$c_p^{max} \geq N_{ip} * c_i \quad \forall i \in N, \forall p \in P \quad (4.15)$$

$$o_k, L_i, S_{jk}, c_i, c_p^{max} \geq 0 \quad \forall i \in N, j \in N', p \in P, k \in K \quad (4.16)$$

$$Y_{ik}, X_{ijk}, Z_{mk} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, j \in N - \{0\}, m \in M, k \in K \quad (4.17)$$

4.1 Eniyileme Modeli Kısıt Açıklamaları

- (1) Her ekibin günlük rotasının merkezde başlamasını sağlar.
- (2) Her ekibin günlük rotasını merkezde bitirmesini sağlar.
- (3) Her işin sadece bir ekip tarafından yapılmasını sağlar.
- (4) Bir iş bir ekibe atanmışsa, ekibin rotasında bu işin bulunmasını sağlar.
- (5) Her işe en fazla bir kez uğranmasını sağlar.
- (6) Bir ekibe bir iş atanmışsa, ekibin bu işe ait düğüme başka bir düğümden gelip, bu işten sonra başka bir düğüme gitmesini, yani planlanan ziyaretlerde akışın korunmasını sağlar.
- (7) Bir işe atanan ekibin, işi tamamlanma zamanının dikkate alınmasını sağlar.
- (8) Bir işe atanan ardışık işlerden, önceki bitmeden sonrakine başlanamamasını sağlar. Böylece alt turların bertaraf edilmesi sağlanmış olur.
- (9) Bir teknisyenin en fazla bir ekibe atanabilmesini sağlar.
- (10) Bir ekibe atanabilecek teknisyen sayısını sınırlar. Bir ekibe hiç bir teknisyen atanmaması mümkündür.
- (11) Bir işin atandığı ekipte çalışan teknisyenlerin sahip oldukları yetenekler ile o iş için sahip olunması gereken yeteneklerin uyumlu olmasını sağlar.
- (12) Var ise, işteki gecikme miktarını hesaplar.
- (13) Bir ekibe maksimum mesai süresini aşan bir iş planı atanmamasını garantiler.
- (14) Bir ekip, fazla mesai yapıyor ise, fazla mesai süresini hesaplar.

(15) Bir iş öncelik sınıfı için, o sınıftaki işlerden en geç biteninin tamamlanma zamanını hesaplar.

(16) Karar değişkenleri için negatif değerde olmama durumunu tanımlar.

(17) Karar değişkenleri için 0-1 ikili değişken olma durumunu tanımlar.

Daha önce de belirtildiği gibi, birinci öncelikli amaç, önceliklerine göre ağırlıklandırılmış işlerin ağırlıklandırılmış tamamlanma sürelerinin toplamını en küçükmektir. Bunun için modelde oluşturulan amaç fonksiyonu ve kısıtlar aşağıdaki gibidir:

$$M1 : \text{Enküçükle } \sum_{p \in P} W_p c_p^{max} \quad (4.18)$$

Öyle ki:

$$(1) - (17)$$

İkinci öncelikli amaç ise, seyahat maliyetlerini, fazla mesai maliyetlerini ve geciken işlerden kaynaklanan ceza maliyetlerini içeren günlük operasyonel maliyetlerin en küçüklümesidir. $M1$ modelinin çözülmesinden elde edilen en iyi çözümdeki, $C_p^{max(*)}$ optimal değerleri kullanılarak oluşturulan modelin amaç fonksiyonu ve kısıtları aşağıdaki gibidir:

$$M2 : \text{Enküçükle } \sum_{k \in K} \sum_{i, j \in N} X_{ijk} C_{ij}^I + \sum_{k \in K} o_k c^II + \sum_{i \in N} L_i c_i^{III} \quad (4.19)$$

Öyle ki:

$$(1) - (17)$$

$$c_p^{max} \leq C_p^{max(*)} \alpha_p \quad \forall p \in P \quad (4.20)$$

$M2$ modeli, yeni eklenen Kısıt (20) ile, bir iş sınıfının tamamlanma süresinin en fazla $M1$ modelinin en iyi çözümünden her $p \in P$ sınıfı için elde edilen en iyi tamamlanma süresinin α_p ($\alpha_p \geq 1$) katı kadar olmasına izin verir. Bir öncelik sınıfı için $\alpha_p = 1$ seçilmesi durumunda, o öncelik sınıfı için $M1$ modelinin çözümü ile bulunan optimal $C_p^{max(*)}$ korunması hedeflenir.

Eniyileme modelinin problemin test veri örnekleri üzerindeki analizlerine ilişkin sonuçları 7. bölümde verilmiştir. Bu analizlerde, problem boyutunun büyümesi sonucu

modelin kabul edilebilir sürede çözüm vermediği gözlenmiştir. Problemin gerçek boyutlu örnekleri için kısa sürede kaliteli sonuçlar almak amacıyla sezgisel çözüm yöntemine başvurulmuştur. Bir sonraki bölümde, geliştirilen sezgisel yöntem anlatılmaktadır.



5. SEZGİSEL ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Büyük ölçekli problemler için, matematiksel modelin kabul edilebilir sürede kabul edilebilir optimale yakınlık seviyesinde çözüm sunamadığı gözlenmiştir. Bu nedenle problem için sezgisel yöntem geliştirilmiştir.

Bu bölümde, çalışma kapsamında ele alınan problemin büyüklüğü, çözüm kalitesi ve çözüm süresi göz önüne alındığında hızlı ve kaliteli sonuçlar vermesi amaçlanarak oluşturulan sezgisel çözüm yöntemi anlatılmaktadır.

Sezgisel yöntem dört ana adımdan oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla,

1. İşlerin ağırlıkları, zaman sınırına kalan süreleri, yetenek gereksinimleri ve ihtiyaç duydukları yeteneklerin teknisyen kümesindeki mevcudiyetine göre sıralanması,
2. İşlerin yetenek gereksinimleri doğrultusunda, teknisyenlerin yetenekleri ile uyuşmasına bağlı olarak ekiplerin oluşturulması ve ekiplere ilk işlerinin atanması,
3. Ekiplerin oluşturulması aşamasında atanamayan işlerin ekiplere atanması,
4. Ekiplerin rotalarının belirlenmesi

adımlarıdır. Sezgisel çözüm yöntemi için oluşturulan algoritmanın performansı hem rastgele hem de gerçekçi veriler üzerinde test edilmiştir. Gerçekçi veriler, bilgi güvenliği sınırları içerisinde, bir enerji dağıtım şirketi tarafından oluşturulmuş dokümanlardan sağlanmıştır.

5.1 Sezgisel Çözüm Yöntemi Algoritma Adımları

5.1.1 İşlerin öncelik skorlarına göre sıralanması

İşlerin öncelik skorlarının belirlenmesi sırasında α_i ve β_i ($\forall i \in N$) olmak üzere iki kriter göz önünde bulundurulmuştur. Bunlardan α_i , işlerin ağırlıklarına ve zaman sınırlarına kalan sürelerle bağlı olarak, β_i kriteri ise, işlerin yetenek gereksinimleri ve teknisyenlerin yeteneklerine bağlı olarak değişmektedir. α_i değeri iki farklı koşula

göre iki farklı şekilde hesaplanmaktadır. i işinin zaman sınırına kalan süre günlük mesai süresine eşit ya da büyük ise, α_i değeri yalnızca işlerin ağırlıklarına göre hesaplanmaktadır. Bu durumda α_i değeri i işinin ağırlığının tüm işlerin ağırlıklarının toplamına bölümü ile elde edilmektedir. Eğer i işinin zaman sınırına kalan süre, günlük mesai süresinden küçük ise, α_i değeri işlerin hem ağırlıklarına hem de zaman sınırına kalan sürelerle bağlı olarak değişmektedir. β_i değerinin bulunması sırasında, her bir işin yetenek gereksinimlerine bakılmakta ve teknisyenler arasından o iş için gerekli olan her bir yeteneğe sahip olan teknisyen sayıları hesaplanmaktadır. Daha sonra, o iş için gereken tüm yetenekler bazında eşleşen teknisyen sayısı hesaplanmaktadır. β_i değeri, i işi için ortalama eşleşen teknisyen sayısının toplam teknisyen sayısına bölümü ile elde edilmektedir. β_i değeri bulunurken kullanılan ortalama eşleşen teknisyen sayısının bulunması bölüm 5.1.2’de anlatılmaktadır.

Sonuç olarak, bu iki kriterin ağırlıklı toplamları ile her iş için bir skor elde edilmektedir. İşler içerisinde en büyük skora sahip olan iş, en öncelikli olarak ele alınmaktadır.

İşlerin önceliklerine göre sıralaması için kullanılan algoritmanın sözde kodu Algoritma 1’de verilmiştir:

Algoritma 1 İşlerin Öncelik Skorlarına Göre Sıralanması

Girdi:

1. N : Ağırlıklarına göre sıralanmış işler kümesi
2. w_i : i işinin ağırlığı, $i \in N$
3. f_i : i işinin zaman sınırına kalan süre, $i \in N$
4. τ : Günlük mesai süre sınırı
5. M : Teknisyenler kümesi
6. r_α : α kriterinin oranı
7. r_β : β kriterinin oranı

Çıktı:

1. S : Skorlarına göre sıralanmış işler kümesi

$S = \emptyset$

Her bir $i \in N$ için yap

Eğer $(\sum_{i \in N} (w_i * (\tau - f_i))) \leq 0$ ise // $f_i \leq \tau$ ise bu koşul geçerlidir.

$$\alpha_i \leftarrow w_i / \sum_{i \in N} (w_i)$$

Değilse // $f_i > \tau$ ise bu koşul geçerlidir.

$$\alpha_i \leftarrow (w_i * (\tau - f_i)) / \sum_{i \in N} (w_i * (\tau - f_i))$$

Son eğer

$$\beta_i \leftarrow 1 - \left(\frac{isEslesmeOrani(i)}{\text{toplam teknisyen sayısı}} \right) // isEslesmeOrani(i) metodu aşağıda anlatılmıştır.$$

$$skor_i \leftarrow (r_\alpha * \alpha_i) + (r_\beta * \beta_i)$$

Son için

Koşul ($N \neq \emptyset$) **iken**

$$i \leftarrow \arg \max_{j \in N} \{skor_j\} // \text{en yüksek skor değerine sahip işi al}$$

$$S \leftarrow S + \{i\} // i \text{ işini } N' \text{in sonuna ekle}$$

$$N \leftarrow N - \{i\}$$

Son koşul

isEslesmeOrani(i) metodu için kullanılan algoritmanın sözde kodu Algoritma 2’de verilmiştir:

Algoritma 2 *isEslesmeOrani(i)* Metodu

Girdi:

1. N : İşler kümesi
2. M : Teknisyenler kümesi
3. Q : Yetenek tipi kümesi
4. u_{iq} : $\begin{cases} 1, & i \text{ işi } q \text{ yeteneğine ihtiyaç duyuyorsa} \\ 0, & \text{diğer durum} \end{cases}$
5. g_{tq} : $\begin{cases} 1, & t \text{ teknisyeni } q \text{ yeteneğine sahipse} \\ 0, & \text{diğer durum} \end{cases}$

Çıktı:

1. EO //eslesme oranı

$$EO = 0$$

Her bir $t \in M$ için yap

$$EA = 0 // \text{eslesme adedi}$$

$$YGA = 0 // \text{yetenek gereksinim adedi}$$

Her bir $q \in Q$ için yap

Eğer ($u_{iq} = 1$)

$YGA \leftarrow YGA + 1$

Eğer ($g_{tq} = 1$)

$EA \leftarrow EA + 1$

Son eğer

Son eğer

Son için

// t teknisyenin i işi için gerekli toplam yetenek gereksiniminin ne kadarına sahip olduğunu oranını verir.(yetenek sahiplik oranı)

$YSO_t \leftarrow EA/YGA$

//kaç tane teknisyenin bu orana sahip olduğunu hesaplar.

$EO \leftarrow EO + YSO_t$

Son için

$isEslesmeOrani(i) \leftarrow EO$

5.1.2 Ekiplerin oluşturulması ve ilk işlerinin atanması

Algoritmanın bu aşamasında, teknisyenlerden ekip oluşturulması ve her ekibe ilk işinin atanması gerçekleştirilmektedir.

Öncelik skorlarına göre sıralanan işler sırayla ele alınmaktadır. Ele alınan işin yetenek gereksinimlerine bakılmakta, daha sonra, işin ihtiyacı olan yeteneklerin karşılanması için en uygun teknisyen araması yapılmaktadır. Bu arama sırasında, Cordeau vd. (Cordeau et al., 2010) çalışmalarında ele aldığı gibi, iki kriterden yararlanılmaktadır. Bunlardan, teknisyenin yetenekleri ile işin yetenek gereksinimlerinin eşleşme sayısı, ve teknisyenin yetenek sayısının, işin gereksinim sayısından fazla olması sonucu israf edilen yetenek sayısıdır. Bu iki kriter doğrultusunda, yeterli sayıda teknisyen ile bir işin gereksinimlerinin karşılandığı noktada bu teknisyenlerden bir ekip oluşturulmaktadır. Kullanılan teknisyenler, teknisyen listesinden çıkarılmakta, ekibi oluştururken kullanılan iş, ekibin ilk işi olarak atanmaktadır. Bir iş için yetenek gereksinimlerine uygun teknisyen bulunamaması ya da mevcut teknisyenlerin tükenmesi durumunda ekip oluşturma işlemi tamamlanmaktadır.

Ekiplerin oluşturulması ve ilk işlerinin atanması algoritması sözde kodu Algoritma 3'te verilmiştir:

Algoritma 3 Ekiplerin Oluşturulması ve İlk İşlerinin Atanması

Girdi:

1. N : Öncelik skorlarına göre sıralanmış, atanmamış işler kümesi
2. M : Teknisyenler kümesi
3. Q : Yetenek tipi kümesi
4. P_i : i işinin işlem süresi
5. τ : Günlük çalışma süresi
6. u_{iq} : $\begin{cases} 1, & i \text{ işi } q \text{ yeteneğine ihtiyaç duyuyorsa} \\ 0, & \text{diğer durum} \end{cases}$
7. g_{tq} : $\begin{cases} 1, & t \text{ teknisyeni } q \text{ yeteneğine sahipse} \\ 0, & \text{diğer durum} \end{cases}$

Çıktı:

1. E : Ekipler kümesi
2. n_e : e ekibini oluşturan iş
3. N_k : Atanamamış, kalan işler kümesi
4. P_e : e ekibinin işlem süresi

$$N_k = \emptyset$$

$$E = \emptyset$$

Her bir $i \in N$ için yap

$$e = \emptyset, \forall e \in E$$

$$IYS = 0 \text{ //iş yetenek gereksinimi}$$

Her bir $q \in Q$ için yap

$$\text{Eğer } (u_{iq} = 1)$$

$$YGA \leftarrow YGA + 1$$

Son eğer

Son için

Koşul ($IYS > 0$) iken

$$YGA = 0$$

$t \leftarrow \text{enUygunTeknisyen}(i, M), \forall t \in M$ //Teknisyenler içerisinde i işi için en uygun teknisyeni alır. Bu metot aşağıda açıklanmıştır.

Eğer ($t = \text{null}$) ise

$$IYG = 0$$

Eğer ($P_i < \tau$) ise

$$N_k \leftarrow N_k + i$$

Son eğer

Değilse

$e \leftarrow e + t$ // t teknisyenini e ekibine ekle

$M \leftarrow M - t$ // t teknisyenini teknisyenler listesinden çıkart

Her bir $q \in Q$ için

Eğer ($u_{iq} = 1$ & $g_{tq} = 0$) ise

$$YGA \leftarrow YGA + 1$$

Son eğer

Son için

$$IYG \leftarrow YGA$$

Son eğer

Son koşul

Eğer ($P_i < \tau$) ise

Eğer ($e \neq \emptyset$) ise

$E \leftarrow E + e$ //e ekibini ekip kümesine ekle

$n_e \leftarrow i$ //e ekibini oluşturan iş olarak i işini ata

$P_e \leftarrow P_i$ //e ekibini oluşturan işin işlem süresini, e ekibinin işlem süresi olarak ata

Son eğer

Son eğer

Son için

i işini yapabilecek en uygun teknisyeni döndüren $enUygunTeknisyen(i, M)$ metodu için kullanılan algoritmanın sözde kodu Algoritma 4'te verilmiştir:

Algoritma 4 $enUygunTeknisyen(i, M)$ Metodu

Girdi :

1. M : Teknisyenler kümesi
2. Q : Yetenek tipi kümesi
3. y : Toplam yetenek tipi sayısı

$$4. u_{iq}: \begin{cases} 1, & i \text{ işi } q \text{ yeteneğine ihtiyaç duyuyorsa} \\ 0, & \text{diğer durum} \end{cases}$$

$$5. g_{tq}: \begin{cases} 1, & t \text{ teknisyeni } q \text{ yeteneğine sahipse} \\ 0, & \text{diğer durum} \end{cases}$$

Çıktı:

$$1. t, \quad \forall t \in M$$

$EUEA = -1$ //en uygun eşleşen adedi

$EUIA = y$ //en uygun israf adedi

Her bir $t \in M$ için yap

$EA = 0$ //İşin yetenek gereksinimleriyle teknisyenin yeteneklerinin eşleşme adedi

$IA = 0$ //Boşa harcanan teknisyen yetenek sayısı, israf adedi

Her bir $q \in Q$ için yap

Eğer $(u_{iq} = 1 \ \& \ g_{tq} = 1)$ ise

$$EA \leftarrow EA + 1$$

Son eğer

Eğer $(a_{iq} = 0 \ \& \ g_{tq} = 1)$ ise

$$IA \leftarrow IA + 1$$

Son eğer

Son için

Eğer $((EA \neq 0) \ \& \ (EA \geq EUEA) \ \& \ (IA \leq EUIA))$ ise

$$EUEA \leftarrow EA$$

$$EUIA \leftarrow IA$$

Son eğer

Son için

$$enUygunTeknisyen(i, M) \leftarrow t$$

5.1.3 Oluşturulan ekiplere kalan işlerin atanması

Sezgiselin bu aşamasında, ekiplerin oluşturulması sırasında atanamayan işlerin, oluşturulmuş ekiplere atanması gerçekleştirilmektedir.

Kalan işler teker teker ele alınmakta, ele alınan işin yetenek gereksinimlerine bakılmaktadır. İşin ihtiyacı olan yeteneklerin karşılanması için en uygun ekip araması yapılmaktadır. Bir ekibin yetenekleri belirlenirken, kendisini oluşturan teknisyenlerin yeteneklerinin birleşimi kullanılmaktadır. Bir iş için en uygun ekibin bulunması sırasında iki kriterden yararlanılmaktadır. İlk kriter olarak, işin ihtiyacı olan fakat ekipte bulunmayan yetenek sayısına bakılmaktadır. Diğer kriter için ise, işin ekibe atanması durumunda israf edilen yetenek sayısına bakılmaktadır. Bu kriterlerin ağırlıklı toplamı ile her bir ekip için bir skor belirlemesi yapılmakta, iş, en küçük skora sahip olan ekibe atanmaktadır. Ekiplerin gün içerisinde yapabilecekleri maksimum iş sayısını sınırlamak için 'günlük mesai süre limiti' dikkate alınarak iş ataması yapılmaktadır. Bunun için, bir ekibe atanan işlerin işlem süreleri toplamının, ekibin günlük mesai süresini aşmamasına dikkat edilmektedir. Bir işin yetenek ihtiyacını karşılayacak hiç bir ekip bulunamaması durumunda iş ekip ataması gerçekleştirilmemektedir.

Kalan işlerin ekiplere atanması algoritması sözde kodu Algoritma 5'te verilmiştir:

Algoritma 5 Oluşturulan Ekiplere Kalan İşlerin Atanması

Girdi:

1. N_k : Ekiplerin oluşturulma aşamasında atanmamış, kalan işler kümesi
2. E : Ekipler kümesi
3. Q : Yetenek tipi kümesi
4. P_i : i işinin işlem süresi
5. P_e : e ekibinin işlem süresi
6. n_e : e ekibini oluşturan iş
7. $u_{iq} = \begin{cases} 1, & i \text{ işi } q \text{ yeteneğine ihtiyaç duyuyorsa} \\ 0, & \text{diğer durum} \end{cases}$
8. $g_{eq} = \begin{cases} 1, & e \text{ ekibi } q \text{ yeteneğine sahipse} \\ 0, & \text{diğer durum} \end{cases}$

Çıktı:

1. N_e : e ekibinin içerdiği işler kümesi, $\forall e \in E$

$N_e = n_e, \forall e \in E$ //Başlangıçta tüm ekipler kendilerini oluşturan işleri içerir.

Her bir $i \in N_k$ için yap

$IYG = 0$ //iş yetenek gereksinimi

Her bir $q \in Q$ için yap

Eğer ($u_{iq} = 1$) ise

$IYG \leftarrow IYG + 1$

Son eğer

Son için

Koşul ($IYG > 0$) iken

$YGA = 0$ //yetenek gereksinim adedi

$e \leftarrow enUygunEkip(i, E), \forall e \in E$ //Ekipler içerisinde i işi için en uygun ekibi alır. Bu metod aşağıda açıklanmıştır.

$P_e \leftarrow P_e + P_i$ //e ekibinin işlem süresine i işinin işlem süresinin eklenmesi

Her bir $q \in Q$ için yap

Eğer ($u_{iq} = 1$ & $g_{eq} = 0$)

$YGA \leftarrow YGA + 1$

Son eğer

Son için

$IYG \leftarrow YGA$

$N_e \leftarrow N_e + \{i\}$

Son koşul

Son için

i işini yapabilecek en uygun ekibi döndüren $enUygunEkip(i, E)$ metodu için kullanılan algoritmanın sözde kodu Algoritma 6'da verilmiştir:

Algoritma 6 $enUygunEkip(i, E)$ Metodu

Girdi:

1. E : Ekipler kümesi
2. Q : Yetenek tipi kümesi
3. w_e : Eşleşmeyen yetenek kriteri skor oranı
4. w_i : İsrar edilen yetenek kriteri skor oranı
5. P_e : e ekibinin işlem süresi

6. P_i : i işinin işlem süresi
7. τ : Günlük çalışma süresi
8. B : Büyük bir sayı
9. u_{iq} : $\begin{cases} 1, & i \text{ işi } q \text{ yeteneğine ihtiyaç duyuyorsa} \\ 0, & \text{diğer durum} \end{cases}$
10. g_{eq} : $\begin{cases} 1, & e \text{ ekibi } q \text{ yeteneğine sahipse} \\ 0, & \text{diğer durum} \end{cases}$

Çıktı:

1. e , $\forall e \in E$

$ES = 0$ //Ekip skoru

$EIES = B$ //En iyi ekip skoru

Her bir $e \in E$ için yap

$NEA = 0$ //İşin yetenek gereksinimleri arasında olan ama ekipte bulunmayan yetenek sayısı, eşleşmeyen adedi

$IA = 0$ //Boşa harcanan ekip yetenek sayısı, israf adedi

Her bir $q \in Q$ için yap

Eğer ($u_{iq} = 1$ & $g_{eq} = 0$) ise

$$NEA \leftarrow NEA + 1$$

Son eğer

Eğer ($u_{iq} = 0$ & $g_{eq} = 1$) ise

$$IA \leftarrow IA + 1$$

Son eğer

Son için

$$ES \leftarrow (NEA * w_e) + (IA * w_i)$$

Eğer ($(ES \leq EIES) \& (P_e + P_i \leq \tau)$) ise //en iyi ekip skoru

$$EIES \leftarrow ES$$

Son eğer

Son için

$$enUygun ekip(i, E) \leftarrow e$$

5.1.4 Ekiplerin rotalarının belirlenmesi

İşlerin ekiplere atanması sonucunda her bir ekibin o gün gitmesi gereken işler belirlenmiştir. Ekiplerin gün içerisinde farklı lokasyonlarda bulunan işlere gitmesi gerektiğinden, ortaya rotalama problemi çıkmaktadır. Rotalama sırasında en önemli

kriterlerden biri, işlerin zaman sınırını geçirmemektir. Diğer kriter ise, işlerin öncelik dereceleridir. Önceliği yüksek olan işin diğerlerinden daha önce yapılması gerekmektedir. Bu kriterlerin yanında, işlerin konum ve işlem süresi faktörleri de bulunmaktadır.

Ekibin içerisindeki işler arasındaki rotanın belirlenmesi için zaman sınırına en az zaman kalan ve önceliği en fazla olan işi alma hedefi benimsenmiştir. Bunun için yapılan hesaplamalar sırasında, işlerin konumları arasındaki mesafeler de hesaba katılmıştır. Her bir iş için belirli bir enlem ve boylam konumu bulunmaktadır. Bu konumlar kullanılarak doğrusal (rectilinear) bir hesaplama ile atanan işlerin konumları arasındaki mesafe ve süreleri belirlenmiştir.

Her ekip için rotalarının belirlenmesi algoritması sözde kodu Algoritma 7’de verilmiştir:

Algoritma 7 Ekiplerin rotalarının belirlenmesi

Girdi:

1. E : Ekipler kümesi
2. N_e : e ekibine atanan işler kümesi
3. t_{ij} : i işinin bulunduğu konumdan j işinin bulunduğu konuma gitmek için gereken süre
4. P_i : i işinin işlem süresi, $\forall i \in N$
5. w_i : i işinin öncelik katsayısı, $\forall i \in N$
6. d_i : i işinin zaman sınırı, $\forall i \in N$
7. τ : Günlük çalışma süresi

Çıktı:

1. O_e : e ekibine atanan işlerin sıralaması, $\forall e \in E$

Her bir $e \in E$ için yap

$t = 0$ //Zaman

$O_e = \emptyset$

$k \leftarrow 0$ //e ekibinin T anındaki konumu

Koşul ($N_e \neq \emptyset$) **iken**

$i \leftarrow \arg \min_{j \in N_e} \{(d_j - p_j - t) / w_j\}$ //e ekibine atanan işlerden şuna

kadar atanmamış olan, zaman sınırına en az zaman kalan ve en öncelikli işi al

$O_e \leftarrow O_e + i$ // i işini O_e 'nin sonuna ekle

$t \leftarrow t + t_{ki} + P_i$ // T zamanını güncelle

$k \leftarrow i$ // e ekibinin T zamanındaki konumunu güncelle

$N_e \leftarrow N_e - i$

Eğer ($t \geq \tau$) ise

Break

Son eğer

Son koşul

Son için

Geliştirilen sezgisel yöntemin performansının analizi 7. bölümde bulunmaktadır. Matematiksel model ile optimal sonuçlar elde edilen veriler üzerinde yapılan testlere bakıldığında, sezgisel çözüm yöntemi ile optimale yakın sonuçlar elde edildiği gözlenmiştir. Problem boyutunun büyüdüğü ve model ile kabul edilebilir sürede sonuç elde edilemediği durumlarda, sezgisel yöntem sonuçlar vermiştir.

6. TEST VERİLERİNİN OLUŞTURULMASI

Problem kapsamında geliştirilen çözüm yöntemlerinin performanslarını değerlendirmek amacıyla hem rastgele türetilmiş veriler hem de gerçekçi veriler üzerinde testler gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, kullanılan test verilerinin oluşturulma yöntemleri ve gerçekçi veriler üzerinde yapılan analizler anlatılmaktadır.

6.1 Rastgele Türetilmiş Test Verilerinin Oluşturulması

Öncelikle, matematiksel modelin geçerlenmesi ve sezgisel yöntemin performansının değerlendirilmesi amacıyla küçük ölçekli problem oluşturulmuştur. Küçük ölçekli problem örneklerinde, problemin boyutunu belirleyen iş sayısı, teknisyen sayısı, Çizelge 6.1’de verilen iş öncelik kümesi sayısı ve yetenek sayısı, farklı değerleri alacak şekilde belirlenmiştir.

Çizelge 6.1 : Rastgele türetilmiş küçük ölçekli problem örnekleri kümesi için test parametre değerleri

İş sayısı	Teknisyen sayısı	Yetenek sayısı	Öncelik küme sayısı
3	6	1,3	1,2,3,4
	9		
10	6	1,3	1,2,3,4
	9		
15	6	1,3	1,2,3,4
	9		
20	6	1,3	1,2,3,4
	9		

Çizelge 6.1’de görüldüğü gibi, küçük ölçekli problem örneklerinde iş sayıları 3 ile 20 arasında, öncelik kümesi sayısı 1 ile 4 arasında, teknisyen sayısı 6 ile 9 arasında değişirken, yetenek sayısı 3 olarak belirlenmiştir.

Sezgisel çözüm yönteminin performansının test edilmesi için türetilen büyük ölçekli problem örneklerine ilişkin parametre değerleri Çizelge 6.2’de verilmiştir. Büyük ölçekli test örnekleri için, sayıları 200 ile 500 arasında değişen işler ile sayıları 100 ile

300 arasında değişen teknisyenler oluşturulmuştur. Yetenek sayısı ve öncelik küme sayısı sırasıyla 5 ve 4 olacak şekilde sabit tutulmuştur. Bunun sebebi, gerçek problem örneklerinde yetenek sayısı ve öncelik küme sayısının bu şekilde olmasıdır.

Çizelge 6.2 : Rastgele türetilmiş büyük ölçekli problem örnekleri kümesi için test parametre değerleri

İş sayısı	Teknisyen sayısı	Yetenek sayısı	Öncelik küme sayısı
200	100	5	4
300			
400			
300	200	5	4
400			
500			
300	300	5	4
400			
500			

6.2 Gerçekçi Test Verilerinin Oluşturulması

6.2.1 Gerçekçi test veri kümesi için uygulanan ön çalışmalar

Bir enerji dağıtım şirketi tarafından sağlanan gerçekçi verilerden test amaçlı problem örneklerinin türetilmesi için aşağıdaki ön işlemlerin sırasıyla yapılması gerekmiştir:

1. İşlerin gruplandırılarak iş gruplarının oluşturulması,
2. İş gruplarının işlem sürelerinin belirlenmesi,
3. İş gruplarının başlangıçtaki öncelik ağırlıklarının belirlenmesi.

6.2.1.1 İş gruplarının oluşturulması

Kullanılan gerçekçi veri kümesinde, her bir işin belirli yetenek gereksinimleri ve birimleri bulunmaktadır. Bu durumdan yola çıkılarak, aynı yetenek gereksinimine sahip olan ve aynı birimde bulunan işler aynı iş grubunda olacak şekilde eşleştirilmiştir. Böylece işlerin, yetenek gereksinimi ve birimlerine göre tek bir iş grubuna atandığı şekilde yeni bir iş kümesi elde edilmiştir. Örnek ele alınırken kullanılan iş kümesi, bu iş gruplarının oluşturduğu kümedir.

6.2.1.2 İş gruplarının işlem sürelerinin belirlenmesi

Örnek veride her bir işin işlem süresi bulunmaktadır. Bir iş grubunda bulunan işlerin işlem sürelerinden yola çıkılarak iş gruplarının işlem süreleri hesaplanmıştır. Bunun için o iş grubunda bulunan işlerin işlem süreleri ile işlerin birim içerisinde katedecekleri yol süreleri kullanılarak aşağıdaki hesaplama yapılmıştır.

$$\text{Sipariş grubu işlem süresi} = \sum_{\text{gruptaki tüm işler}}(\text{işlem süreleri}) + ((\text{gruptaki iş sayısı}) \\ * (\text{birim içindeki yol süresi}))$$

6.2.1.3 İş gruplarının başlangıç öncelik ağırlıklarının belirlenmesi

Örnek veride, her bir iş için başlangıç ağırlığı bulunmaktadır. Bu başlangıç ağırlıklarına eklenecek olan ağırlık artırma miktarları ise iki kriterle bağlı olarak değişmektedir. Bu kriterlerden biri 'Geçen süre', diğeri ise 'Borç miktarı'dır. Çalışma kapsamında, 'Borç miktarı' kriteri ele alınmamıştır. Her bir iş için planlanan bir başlangıç zamanı bulunmaktadır. Bundan yola çıkılarak, 'Geçen süre' miktarı hesaplanırken, o anki güncel zaman ile planlanan başlangıç zamanı arasındaki fark kullanılmıştır. 'Geçen süre' kriteri için, alt limit ve üst limit olarak adlandırılan limit aralıkları belirlenmiştir. Bu iki limitin eşit olduğu durumlar ele alınmış ve bu limitler eşik değer olarak kullanılmıştır. Hesaplama sırasında bulunan fark değerinin, bu eşik değeri aşması durumunda, başlangıç ağırlığına, o iş için belirlenen artırma miktarı eklenmiştir. Eşik değerin aşılmaması durumunda, işlerin ağırlık miktarları, başlangıç ağırlıkları olarak belirlenmiştir.

Bu şekilde, her bir iş için güncel başlangıç ağırlık belirlenmesi yapıldıktan sonra, aynı iş grubunda bulunan işlerin ağırlıkları toplanarak iş grupları başlangıç ağırlıkları elde edilmiştir.

$$i \text{ işinin güncel başlangıç ağırlığı} = w_i = \text{başlangıçAğırlığı}_i + (\text{varsa}) \text{ artırma miktarı}$$

$$\text{Sipariş grubu ağırlığı} = \sum_{\text{gruptaki tüm işler}}(\text{güncel başlangıç ağırlığı})$$

Gerçekçi problem örnekleri, bir enerji dağıtım şirketi tarafından değiştirilerek verilen verilerden elde edilmiştir. Bu verilerde, 4 farklı enerji dağıtım bölgesi bulunmaktadır. Gerçekçi verilerde her bir bölge için ele alınan yetenek sayısı 5, öncelik küme sayısı

ise her bölge için farklılık göstermektedir. Parametrelerin bölgeler için değerleri Çizelge 6.3'te verilmiştir.

Çizelge 6.3 : Bölgeler için test parametre değerleri

Parametreler	Bölge 1	Bölge 2	Bölge 3	Bölge 4
İş sayısı	40	52	335	403
Teknisyen sayısı	31	38	68	96
Ekip sayısı	7	7	41	45
Yetenek sayısı	5	5	5	5
Öncelik küme sayısı	14	17	57	75

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

7.1 Eniyileme Modeli Deneysel Çalışmalar

Oluşturulan eniyileme modeli, Intel core I7 2.5 GHz 4GB 64 bit özelliklerindeki bir bilgisayarda, CPLEX OPL 12.4 çözücüsü kullanılarak çözdürülmüştür. Modelin geçerlenmesi sırasında küçük ölçekli problem örnekleri kullanılmıştır.

7.1.1 Tek bir yetenek ve öncelik kümesi içeren küçük ölçekli problem örnekleri için model sonuçları

Başlangıçta, amaç fonksiyonu işlerin tamamlanma zamanını en küçükleme olarak geliştirilen model, tek bir yetenek ve bir öncelik kümesi içeren küçük ölçekli problem örnekleri için çalıştırılmıştır. Çizelge 7.1’de gösterilen örnekler üzerinde alınan sonuçlara bakıldığında, teknisyen sayısı sabit tutularak iş sayısının artırılması sonucu tamamlanma zamanının büyüdüğü ve çalışma süresinin arttığı gözlenmiştir. Belli bir değerden sonra çalışma süresi 4 saat olarak sınırlandırılmış, kabul edilebilir optimale yakınlık seviyesinden (gap) uzaklaşmış sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 7.1 : Tek bir yetenek ve tek bir öncelik kümesi içeren model sonuçları

İş sayısı	Teknisyen sayısı	Ekip sayısı	Ekipteki teknisyen sayısı	Cmax	Süre	Gap
3	6	3	2	13	00:00:01:50	-
3	9	3	3	13	00:00:01:49	-
10	6	3	2	30	00:12:58:82	-
10	9	3	3	30	00:19:50:70	-
15	4	2	2	51	04:00:01:87	80.39%
15	9	3	3	39	04:00:01:99	75.56%
20	9	3	3	55	04:30:45:08	85.45%

7.1.2 Çoklu yetenek ve tek öncelik kümesi içeren küçük ölçekli problem örnekleri için model sonuçları

Model, işlerin yetenek gereksinimleri ve teknisyenlerin yetenek seviyeleri olan küçük ölçekli problem örnekleri üzerinde çalıştırılmıştır. Yetenek seviyeleri;

- Çoklu iş yetenek gereksinimi – tek teknisyen yeteneği

- Tek iş yetenek gereksinimi – çoklu teknisyen yetenekleri
- Çoklu iş yetenek gereksinimleri – çoklu teknisyen yetenekleri

olmak üzere üç farklı şekilde ele alınmıştır.

Her üç durum için; Çizelge 7.2’de, iki yetenek kümesi ele alınarak çözdürülen örneklerin sonuçları, Çizelge 7.3’te ise, üç farklı yetenek kümesi ele alınarak elde edilen örneklerin sonuçları bulunmaktadır. İş sayısı değeri arttıkça çalışma sürelerinde artış gözlenmiş, 4 saatlik çalışmanın sonunda kabul edilebilir optimale yakınlık seviyesinden (gap) uzaklaşmış sonuçlar elde edilmiştir.



Çizelge 7.2 : İki farklı yetenek ve tek bir öncelik kümesi içeren model sonuçları

İş sayısı	Teknisyen sayısı	Ekip sayısı	Ekipteki teknisyen sayısı	Yetenek sayısı	İş yetenek gereksinimi	Teknisyen yeteneği	Cmax	Süre	Gap
3	6	3	2	2	+	-	13	00:00:01:45	-
10	6	3	2	2	+	-	30	00:02:40:00	-
15	6	3	2	2	+	-	45	04:00:27:47	75,07%
20	6	3	2	2	+	-	52	04:00:12:85	85,62%
3	6	3	2	2	-	+	13	00:00:01:41	-
10	6	3	2	2	-	+	31	00:05:19:69	-
15	6	3	2	2	-	+	40	04:00:06:74	72,50%
20	6	3	2	2	-	+	56	04:00:05:01	84,42%
3	6	3	2	2	+	+	13	00:00:01:38	-
10	6	3	2	2	+	+	30	00:02:48:14	-
15	6	3	2	2	+	+	47	04:00:04:83	79,29%
20	6	3	2	2	+	+	46	04:00:03:58	84,38%

Çizelge 7.3 : Üç farklı yetenek ve tek bir öncelik kümesi içeren model sonuçları

İş sayısı	Teknisyen sayısı	Ekip sayısı	Ekipteki teknisyen sayısı	Yetenek sayısı	İş yetenek gereksinimi	Teknisyen yeteneği	Cmax	Süre	Gap
3	9	3	3	3	+	-	13	00:00:01:38	-
10	9	3	3	3	+	-	30	00:02:43:43	-
15	9	3	3	3	+	-	37	04:00:03:67	69,78%
20	9	3	3	3	+	-	50	04:00:03:24	84,00%
3	9	3	3	3	-	+	13	00:00:01:51	-
10	9	3	3	3	-	+	30	00:08:38:93	-
15	9	3	3	3	-	+	42	04:00:11:68	75,00%
20	9	3	3	3	-	+	59	04:00:05:06	86,11%
3	9	3	3	3	+	+	13	00:00:01:41	-
10	9	3	3	3	+	+	30	00:05:28:51	-
15	9	3	3	3	+	+	39	04:00:02:15	71,79%
20	9	3	3	3	+	+	56	04:00:33:26	85,10%

7.1.3 Çoklu yetenek ve çoklu öncelik kümesi içeren küçük ölçekli problem örnekleri için model sonuçları

Basitten zora doğru kademeli olarak zorlaştırılan problemin bir sonraki aşamasında, modele öncelik sınıfları eklenmiştir. Her bir iş, bir öncelik sınıfına aittir ve her bir öncelik sınıfının bir ağırlığı bulunmaktadır. Ağırlığı yüksek olan işlerin en önce tamamlanması önem taşımaktadır. Böylece, ele alınan problem kapsamında oluşturulan modelin birinci öncelikli amaç fonksiyonu, $M1$ modelinde ele alınan önceliklerine göre ağırlıklandırılmış işlerin ağırlıklandırılmış tamamlanma zamanlarının en küçüklenmesi şeklini almıştır. Farklı iş sayıları için alınan, birden fazla öncelik kümesine ait olan sonuçlar Çizelge 7.4'te gösterilmektedir. Örnekler, birden fazla iş yetenek gereksinimi ve teknisyen yeteneği içermektedir. Örneklerde, en fazla 4 öncelik sınıfı ele alınmıştır. Bu öncelik sınıflarının ağırlıkları, teknisyen çizelgeleme problemi üzerine çalışan Dutot vd. (Dutot et al., 2006) çalışmasında da ele aldığı gibi, $w_1 = 28, w_2 = 14, w_3 = 4, w_4 = 1$ olarak belirlenmiştir. Küçük iş sayısı içeren örnekler için, optimal sonuçlar kısa sürede elde edilirken, iş sayısı artırılmış örnekler için, uzun süre çalıştırılmalarına rağmen, kabul edilebilir optimale yakınlık seviyesinde sonuçlar elde edilememiştir.

Zorlaştırılmış problemin son aşamasında, birinci öncelikli amaç fonksiyonuna sahip olan modelden elde edilen en iyi çözümdeki $C_p^{\max(*)}$ optimal değerleri kullanılarak, ikinci öncelikli amaç fonksiyonunu en küçüklemeyi hedefleyen $M2$ modeli çözdürülmüştür. Bu modelde amaç fonksiyonu, seyahat maliyetlerini, fazla mesai maliyetlerini ve geciken işlerden kaynaklanan ceza maliyetlerini içeren toplam günlük operasyonel maliyetlerini en küçüklemektir. Seyahat maliyetlerinin hesaplanması sırasında, ekiplerin özel araçlar ile seyahat ettikleri ve 1 dakikalık süre içerisinde 1 km yol aldıkları varsayılmıştır. Çizelge 7.5'te yer alan α_p değeri ile, bir iş sınıfının tamamlanma süresinin en fazla $M1$ modelinin en iyi çözümünden elde edilen en iyi tamamlanma sürelerinin α_p ($\alpha_p \geq 1$) katı kadar olmasına izin verilmektedir. $M2$ modeli için alınan sonuçlar Çizelge 7.5'te yer almaktadır.

Çizelge 7.4 : Çoklu yetenek ve çoklu öncelik sınıfı içeren M1 model sonuçları

İş sayısı	Teknisyen sayısı	Max Ekip sayısı	Yetenek sayısı	Öncelik küme sayısı	İş yetenek gereksinimi	Teknisyen yeteneği	Öncelik Ağırlığı	C_p^{\max}	Ağırlıklı C_p^{\max} toplamı	Süre	Gap
3	9	9	3	2	+	+	4	7	37	00:00:01:72	-
							1	9			
3	9	9	3	3	+	+	14	7	137	00:00:01:75	-
							4	9			
							1	3			
10	9	9	3	2	+	+	4	13	67	00:01:02:80	-
							1	15			
10	9	9	3	3	+	+	14	13	244	00:01:43:74	-
							4	11			
							1	18			
10	9	9	3	4	+	+	28	13	596	00:00:49:35	-
							14	11			
							4	18			
							1	6			
15	9	9	3	2	+	+	4	13	71	04:00:25:12	14,08%
							1	19			
15	9	9	3	3	+	+	14	11	243	04:00:02:25	19,75%
							4	18			
							1	17			
15	9	9	3	4	+	+	28	11	545	04:00:01:76	18,35%
							14	10			
							4	20			
							1	17			
20	9	9	3	2	+	+	4	21	118	04:00:02:02	92,87%
							1	34			
20	9	9	3	3	+	+	14	15	335	04:00:01:98	95,52%
							4	25			
							1	25			
20	9	9	3	4	+	+	28	15	907	04:00:02:18	94,74%
							14	24			
							4	30			
							1	31			

Çizelge 7.5 : Çoklu yetenek ve çoklu öncelik sınıfı içeren M2 model sonuçları

İş sayısı	Teknisyen sayısı	Max Ekip sayısı	Yetenek sayısı	Öncelik küme sayısı	İş yetenek gereksinimi	Teknisyen yeteneği	Öncelik Ağırlığı	$C_p^{\max(*)}$	Maliyet	Süre	Gap	α değeri
3	9	9	3	2	+	+	4	7	3,68	00:00:01:54	-	1
							1	9				
3	9	9	3	3	+	+	14	7	3,68	00:00:01:43	-	1
							4	9				
							1	3				
10	9	3	3	2	+	+	4	13	20,7	00:00:03:24	-	1
							1	15				
10	9	9	3	3	+	+	14	13	20,7	00:00:12:42	-	1
							4	11				
							1	18				
10	9	9	3	4	+	+	28	13	20,7	00:00:07:30		1
							14	11				
							4	18				
							1	6				
15	9	9	3	2	+	+	4	13	21,62	04:00:02:66	30,50%	1
							1	19				
15	9	9	3	3	+	+	14	11	21,16	04:00:02:58	11,11%	1
							4	18				
							1	17				
15	9	9	3	4	+	+	28	11	23,46	01:09:04:62	3,54%	1
							14	10				
							4	20				
							1	17				
20	9	9	3	2	+	+	4	21	-	04:00:00:00	bulunamadı	1,8
							1	34				
20	9	9	3	3	+	+	14	15	-	04:00:00:00	bulunamadı	1,6
							4	25				
							1	25				
20	9	9	3	4	+	+	28	15	-	04:00:02:18	bulunamadı	1,3
							14	24				
							4	30				
							1	31				

7.2 Sezgisel Çözüm Yöntemi Deneysel Çalışmalar

Geliştirilen sezgisel yöntem, Java programlama dilinde, Eclipse IDE for Java platformunda kodlanmış, denemeleri Intel Core I5 2.3 GHz 8 GB 64 bit özelliklerine sahip bir bilgisayarda yapılmıştır. Sezgisel çözüm yöntemi için oluşturulan algoritmanın performansının test edilmesi için iki farklı veri kümesi kullanılmıştır. Bunlardan biri, rastgele türetilmiş verilerden oluşan veri kümesidir. Diğeri ise, bilgi güvenliği sınırları içerisinde, bir enerji dağıtım şirketi tarafından sağlanan gerçekçi veriler üzerinde ön işlemler uygulanarak elde edilen gerçekçi problem örneklerinden oluşan kümedir.

7.2.1 Rastgele türetilmiş problem örnekleri için sezgisel sonuçlar

Sezgisel yöntemin ele alınması sırasında, öncelikli olarak, matematiksel modelin de üzerinde test edildiği, rastgele verilerden oluşan küçük problem örneklerine bakılmıştır. Sonuçların alınması sırasında, öncelikle, sezgisel yöntemi oluşturan algoritmanın ilk adımında yer alan işlerin öncelik skorlarına göre sıralanması bölümünde bulunan α kriterinin oranı olan w_α ve β kriterinin oranı olan w_β değerlerinin farklı durumlarına bakılmıştır.

Çizelge 7.6 : α ve β kriter oranları

w_α	w_β
0,1	0,9
0,2	0,8
0,3	0,7
0,4	0,6
0,5	0,5
0,6	0,4
0,7	0,3
0,8	0,2
0,9	0,1

Çizelge 7.6'da görüldüğü gibi 0,1 ile 0,9 aralığında tüm w_α ve w_β değerleri için hesaplamalar yapılmıştır. Önceliklendirilmiş iki amaç fonksiyonu olan işlerin

tamamlanma zamanlarının en küçüklenmesi ve operasyonel maliyetlerin en küçüklenmesi için en iyi çözümü yakalamak adına pareto optimal değerler alınmıştır.

Elde edilen performans sonuçları Çizelge 7.7'de gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, milisaniye bazında kısa sürelerde kaliteli sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir. Yöntemin performansının eniyileme modeli ile karşılaştırma değerlendirmesi 7.3'üncü bölümde ele alınmıştır.

Sezgisel yöntemin ele alınması sırasında, rastgele oluşturulmuş büyük problem örnekleri üzerindeki performans sonuçları Çizelge 7.8'de gösterilmiştir. 5 farklı yetenek ve 4 farklı öncelik kümesi için aynı teknisyen sayısı ile farklı iş sayılarının ele alınması durumunda, iş sayısı arttıkça tamamlanma sürelerinin ve maliyetin artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Aynı iş sayısının farklı teknisyen sayılarına atanması durumuna bakıldığında, teknisyen sayısı arttıkça işlerin tamamlanma sürelerinin azaldığı fakat seyahat maliyetinin artmasından ötürü maliyetlerde artış olduğu gözlemlenmiştir.

7.2.2 Gerçekçi problem örnekleri için sezgisel sonuçları

Sezgisel çözüm yönteminin gerçekçi test verileri üzerinde değerlendirilmesi aşamasında, iki tür veri kümesi kullanılmıştır. Bunlardan ilki mevcut ekipleri içeren kümedir. Diğeri ise, teknisyenlerin mevcut olduğu, ekiplerin ise sezgisel ile oluşturulduğu veri kümesidir. Çizelge 7.9'da yer alan veri sonuçları ile ekip oluşturmanın sistematik yapılmasının katkısı analiz edilmiştir.

Çizelge 7.7 : Sezgisel çözüm yöntemi rastgele türetilmiş küçük problem örnekleri üzerindeki sonuçları

İş sayısı	Teknisyen sayısı	Max Ekip sayısı	Ekipteki max teknisyen sayısı	Yetenek sayısı	Öncelik küme sayısı	İş yetenek gereksinimi	Teknisyen yeteneği	Öncelik Ağırlığı	C_p^{\max}	Ağırlıklı C_p^{\max} toplamı	Maliyet	Süre (milisaniye)
3	9	9	3	3	2	+	+	4	7	37	3,68	267
								1	9			
3	9	3	3	3	3	+	+	14	7	137	3,68	272
								4	9			
								1	3			
10	9	3	3	3	2	+	+	4	13	79	20,8	178
								1	15			
10	9	9	2	3	3	+	+	14	13	263	21,6	177
								4	11			
								1	18			
10	9	9	2	3	4	+	+	28	13	647	21,2	171
								14	11			
								4	18			
								1	6			
15	9	9	2	3	2	+	+	4	13	83	28,06	167
								1	19			
15	9	9	2	3	3	+	+	14	11	276	28,98	172
								4	18			
								1	17			
15	9	9	2	3	4	+	+	28	11	677	25,76	172
								14	10			
								4	20			
								1	17			
20	9	9	2	3	2	+	+	4	21	123	38,64	177
								1	34			
20	9	9	2	3	3	+	+	14	15	411	39,56	180
								4	25			
								1	25			
20	9	9	2	3	4	+	+	28	15	1112	39,56	170
								14	24			
								4	30			
								1	31			

Çizelge 7.8 : Sezgisel çözüm yöntemi rastgele türetilmiş büyük problem örnekleri üzerindeki sonuçları

İş sayısı	Teknisyen sayısı	Yetenek sayısı	Öncelik küme sayısı	Ağırlıklı C_p^{\max} toplamı	Maliyet	Süre (milisaniye)
200	100	5	4	259.600	2.173	171
300				257.860	2.432	183
400				283.290	2.489	186
300	200	5	4	257.240	5.297	260
400				265.430	5.320	272
500				269.160	5.543	270
300	300	5	4	249.200	7.985	281
400				253.780	7.626	281
500				275.630	7.502	290

Çizelge 7.9 : Mevcut ekipler ile alınan ve ekiplerin de sezgisel ile oluşturulmasıyla alınan sezgisel sonuçları

Bölge	İş sayısı	Öncelik küme sayısı	Yetenek sayısı	Mevcut ekipler ile sonuçlar				Sezgisel ile oluşturulan ekipler ile sonuçlar				
				Ekip sayısı	Atanamayan iş sayısı	Ağırlıklı C_p^{\max} toplamı	Maliyet	Teknisyen sayısı	Ekip sayısı	Atanamayan iş sayısı	Ağırlıklı C_p^{\max} toplamı	Maliyet
1	40	14	5	7	6	3.672,752	67	31	15	6	2.292,808	267
2	52	18	5	7	9	8.495,975	201	38	43	9	2.105,478	904
3	335	57	5	41	223	25.129,802	604	68	42	88	25.471,875	1.442
4	403	75	5	45	259	28.244,954	671	96	52	69	38.483,310	1.779

Çizelge 7.9’da yer alan ekiplere atanamayan işlerin oluşma nedenleri, ekiplerin günlük mesai süre limitlerinin dolmasından veya bazı işlerin yetenek gereksinimlerinin mevcut ekipler tarafından karşılanamamasından kaynaklanmaktadır. Ekip oluşturmanın sezgisel ile işlerin yetenek gereksinimlerine göre yapılması sayesinde, iş sayısının arttığı durumlarda, ekip oluşturmanın da sezgisel ile yapılması sonucunda, atanamayan iş sayısında yüksek oranda azalma gözlemlenmiştir.

İlk iki bölgeyi ele aldığımızda, sezgisel ile oluşturulan ekiplerin sayıları, mevcut ekiplerden daha fazladır. Bu durum, ağırlıklı C_p^{\max} toplamı değerlerinde azalma sağlamıştır. Maliyetlerdeki artış ise, ekip sayısındaki artıştan kaynaklanmaktadır.

İş sayılarının arttığı 3. ve 4. bölgelerde ise, sezgisel ile ekip oluşturularak alınan sonuçlardaki atanamayan iş sayısında %25 ile %40 civarında azalma gözlenmiştir. Ağırlıklı C_p^{\max} toplamı değerinin artış göstermesinin sebebi, ekiplere atanabilen iş sayısındaki artıştır. Maliyetlerdeki artışın nedeni ise, sezgisel yöntem ile hem daha fazla işin ekiplere atanması hem de ekip sayısındaki artıştır.

7.3 Eniyileme Modeli ile Sezgisel Çözüm Yöntemi Karşılaştırma Sonuçları

Eniyileme modeli ve sezgisel çözüm yöntemi performanslarının karşılaştırılmaları için aynı veriler üzerinde sonuçlar alınmış ve analiz edilmiştir. Bu değerlendirme sırasında küçük problem örneklerine bakılmıştır.

Çizelge 7.10’de görüldüğü gibi, 4 farklı iş sayısı için, eniyileme modeli ile küçük boyutlu problemler için kabul edilebilir sürede kabul edilebilir optimale yakınlık seviyesinde (gap) sonuçlar alınırken, iş sayısı arttıkça modelin çalışma süresi uzamıştır. İşlerin tamamlanma sürelerinin hesaplanmasında, iş sayısının 15 olduğu durumda gap’ler oluşmaya başlamış, 20 olduğu durumda ise gap miktarı uzun çalışma süreleri sonunda kabul edilemez seviyelere yükselmiştir. Maliyet hesaplanırken ise 20 iş sayısında sonuç elde edilemez duruma gelinmiştir.

Sezgisel çözüm yönteminden elde edilen sonuçlar, matematiksel modelden elde edilen optimal sonuçlar ile karşılaştırıldığında, milisaniye bazında süreler içerisinde iyi sonuçlar elde edildiği gözlenmiştir. İş sayısının arttığı durumda, eniyileme modeli ile kabul edilebilir sürede kabul edilebilir optimale yakınlık seviyesinde sonuçların elde edilemediği büyüklükteki veriler için ise sezgisel ile kısa sürede sonuç elde edilmiştir.



Çizelge 7.10 : Eniyileme modeli ile sezgisel yöntem çözüm karşılaştırılması

İş sayısı	Teknisyen sayısı	Yetenek sayısı	Öncelik küme sayısı	Eniyileme Modeli Cmax	Eniyileme Modeli Maliyet	Gap	Eniyileme Modeli Çalışma Süresi	Sezgisel çözüm Cmax	Sezgisel çözüm Maliyet	Sezgisel çözüm Çalışma Süresi (milisaniye)
3	9	3	2	37	3,68	-	00:00:01:54	37	3,68	267
3	9	3	3	137	3,68	-	00:00:01:43	137	3,68	272
10	9	3	2	67	20,7	-	00:00:03:24	79	20,8	171
10	9	3	3	244	20,7	-	00:00:12:42	263	21,16	178
10	9	3	4	596	20,7	-	00:00:07:30	647	21,16	177
15	9	3	2	71	21,62	30,50%	04:00:02:66	83	28,06	167
15	9	3	3	243	21,16	11,11%	04:00:02:58	276	29,9	175
15	9	3	4	545	23,46	3,54%	01:09:04:62	677	25,76	172
20	9	3	2	118	-	-	04:00:00:00	123	38,64	177
20	9	3	3	355	-	-	04:00:00:00	411	39,56	181
20	9	3	4	907	-	-	04:00:02:18	1112	39,56	173



8. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu tezde, genelde, evde sunulan sağlık hizmetleri, teknisyenlerin müşteri noktalarında sundukları servis hizmetleri, güvenlik şirketlerinin sundukları kontrol hizmetleri vb. alanlarda gözlenen yerinde servis hizmetlerinde, özelde, enerji dağıtım sektöründe gözlemlenen, işgücü çizelgeleme ve rotalama problemi ele alınmıştır.

Mevcut durumda, işlerin önceliklerinin dikkate alınmaması, ekiplerin seyahat sürelerinin göz önünde bulundurulmaması, işlerin yetenek gereksinimi ile ekiplerin yeteneklerinin eşleşmelerinin dikkate alınmaması gibi yetersizlikler mevcuttur.

Literatürde ele alınan diğer çalışmalardan farklı olarak, bu çalışma kapsamında çoklu işlerin önceliklerine göre ele alınması, iş yetenek gereksinimleri, ekiplerin farklı yeteneklerinin bulunması ve ekiplerin işlere yetenekleri doğrultusunda atanması ile hem işlerin tamamlanma sürelerinin hem de operasyonel maliyetin en küçüklenmesi olan birden fazla amaç fonksiyonu ele alınmıştır.

Problemin amacı, günlük operasyonel problemlerin çözümü için, işlerin tamamlanma zamanlarını en küçükleyecek şekilde yetenek gerekliliği, öncelik ve coğrafi lokasyon gibi farklılıklarını dikkate alarak teknisyenler içerisinde ekiplerin oluşturulması ve işlerin bu ekiplere atanmasıdır. Problem detaylı bir şekilde tanımlandıktan sonra, eniyileme modeli oluşturulmuştur. Ancak iş sayısının ve önceliklerin artması durumunda optimizasyon modelinin kabul edilebilir sürede çözüm vermediği gözlenmiştir. Böylece, problemin büyüklüğü ve zorluğu analiz edilmiş olup NP-zor olduğu sonucuna varılmıştır. Hızlı ve kaliteli sonuçlar alınması adına sezgisel çözüm yöntemine başvurulmuştur. İşlerin öncelik sıralaması, ekiplerin oluşturulması, işlerin bu ekiplere atanması ve ekiplerin başlangıç rotalarının belirlenmesi adımlarını içeren sezgisel yöntem hem rastgele hem de gerçekçi veriler üzerinde test edilmiş, hızlı ve çözüm kalitesi yüksek sonuçlar elde edilmiştir.

Gerçekçi test verileri ile alınan sonuçlara bakıldığında, mevcut durum ile alınan sonuçlar sezgisel yöntem ile alınan sonuçlar ile karşılaştırılmış ve daha fazla işin ekiplere atandığı ve işlerin daha kısa sürede tamamlandıkları gözlenmiştir.

Sonuç olarak, problem verilerinin uygun olduğu durumlarda optimizasyon modeli ile optimal sonuçlar alınmaktadır. Ancak iş sayısının büyük olduğu gerçekçi durumlarda, kısa sürede kaliteli sonuçlar elde etmek için sezgisel çözüm yöntemi kullanılmalıdır.

Bu çalışmanın devamı niteliğinde, kullanılan parametreler üzerinde duyarlılık analizleri yapılarak çalışma genişletilebilir. Önerilen sezgisel yöntemin bulduğu sonuçlar komşuluk aramaya dayalı bir iyileştirme ile geliştirilebilir. İşler arası ardılık-öncüllük ilişkileri de katılarak çalışma kapsamı genişletilebilir.



KAYNAKLAR

- [1] **E. Cheng and J. L. Rich**, “A home health care routing and scheduling problem,” 1998.
- [2] **P. Ekebörn and M. Rönnqvist**, “Operations Research Improves Quality and Efficiency in Home Care,” 2009.
- [3] **J.-F. Cordeau, G. Laporte, F. Pasin, and S. Ropke**, “Scheduling technicians and tasks in a telecommunications company,” 2010.
- [4] **M. Misir, P. Smet, K. Verbeeck, and G. V. Berghe**, “Security personnel routing and rostering: a hyper-heuristic approach,” 2011.
- [5] **C. Fikar and P. Hirsch**, “Home Health Care Routing and Scheduling: A Review,” 2016.
- [6] **J. A. C. Salazar, D. L. Silva, and R. Qu**, “Workforce Scheduling and Routing Problems Literature Survey and Computational Study,” 2016.
- [7] **M. Firat and C. A. J. Hurkens**, “An improved MIP-based approach for a multi-skill workforce scheduling problem,” 2012.
- [8] **M. S. Rasmussen, T. Justesen, A. Dohn, and J. Larsen**, “The Home Care Crew Scheduling Problem: Preference-based visit clustering and temporal dependencies,” 2012.
- [9] **H. Allaoua, S. Borne, L. L’etocart, and R. W. Calvo**, “A matheuristic approach for solving a home health care problem,” 2013.
- [10] **A. A. Kovacs, S. N. Parragh , and K. F. Doerner**, “Adaptive large neighborhood search for service technician routing and scheduling problems,” 2012.
- [11] **A. Trautsamwieser and P. Hirsch**, “A branch-price-and-cut approach for solving the medium-term home health care planning problem,” 2014.
- [12] **E. Zamorano and R. Stolletz**, “Branch-and-price approaches for the Multiperiod Technician Routing and Scheduling Problem,” 2016.
- [13] **G. Hiermann, J. Puchinger, S. Ropke, and R. F. Hartl**, “The Electric Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations,” 2015.
- [14] **M. Misir and P. Smet**, “Generalised heuristics for vehicle routing and personnel rostering problems,” 2015.
- [15] **M. F. Leonid Engelson**, “The value of travel time variance,” 2010.
- [16] **F. Blakeley, B. Argüello, B. Cao, W. Hall, and J. Knolmayer**, “Optimizing Periodic Maintenance Operations for Schindler Elevator Corporation,” 2003.
- [17] **H. Tang, E. Millerhooks, and R. Tomastik**, “Scheduling technicians for planned maintenance of geographically distributed equipment,” 2007.
- [18] **N. Bostel, P. Dejax, P. Guez, and F. Tricoire**, “Multiperiod Planning and Routing on a Rolling Horizon for Field Force Optimization Logistics,” 2008.
- [19] **P. M. Francis, K. R. Smilowitz, and M. Tzur**, “The Period Vehicle Routing Problem and its Extensions,” 2008.

- [20] **D. Barrera, N. Velasco, and C. Amaya**, “A network-based approach to the multi-activity combined timetabling and crew scheduling problem: Workforce scheduling for public health policy,” 2012.
- [21] **Y. Shao, F. B. Jonathan, and A. I. Jarrah**, “The therapist routing and scheduling problem,” 2012.
- [22] **J. F. Bard, Y. Shao, and A. I. Jarrah**, “A sequential GRASP for the therapist routing and scheduling problem,” 2014.
- [23] **T. Hindle, A. Hindle, and M. Spollen**, “Resource allocation modelling for home-based health and social care services in areas having differential population density levels: a case study in Northern Ireland,” 2000.
- [24] **K. Rest and P. Hirsch**, “Daily scheduling of home health care services 772 using time-dependent public transport,” 2015.
- [25] **A. Goel and F. Meisel**, “Workforce routing and scheduling for electricity network maintenance with downtime minimization,” 2013.
- [26] **E. Lanzaronea and A. Matta**, “Robust nurse-to-patient assignment in home care services to minimize overtimes under continuity of care,” 2014.
- [27] **B. Yuan, R. Liu, and Z. Jiang**, “A branch-and-price algorithm for the home health care scheduling and routing problem with stochastic service times and skill requirements,” 2015.
- [28] **P. Dutot, A. Laugier, and A. Bustos**, “Technicians and interventions scheduling for telecommunications,” 2006.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Gözde KUTAYER BİLGİN
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 13.06.1989 - ZONGULDAK
E-posta : gkutayer@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği
- **Yüksek lisans** : 2017 (Beklenen), TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Endüstri Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2016 – Halen	İnnova Bilişim A.Ş.	Test Uzmanı
2014 – 2017	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı	Araştırma Burslu YL Öğrencisi
2013 – 2016	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Yazılım Uzmanı

YABANCI DİL : İngilizce

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Kutayer Bilgin G.**, Yücel E., Kuyzu G., Çakırgil S., 2017. Farklı Öncelik ve Yetenek Gereksinimlerine Sahip İşler için Ekip Oluşturma, Çizelgeleme ve Rotalama, 37. Yöneyem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği Ulusal Kongresi (YAEM) 5-7 Temmuz İstanbul, Türkiye.
- **Kutayer Bilgin G.**, Yücel E., Kuyzu G., Çakırgil S., 2017. Forming, Scheduling and Routing Field Service Teams for Multi-Skill Tasks with Priority Levels, Annual Workshop of the EURO Working Group on Vehicle Routing and Logistics optimization (VeRoLog) July 10-12 Amsterdam, Netherlands.