

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÖNCELİK SEVİYELERİNE SAHİP ÇOKLU YETENEK GEREKTİREN İŞLER  
İÇİN EKİP OLUŞTURMA, ÇİZELGELEME VE ROTALAMA PROBLEMİNE  
BÜTÜNLEŞİK ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Seray ÇAKIRGİL**

**Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Eda YÜCEL**

**NİSAN 2019**



Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....  
**Prof. Dr. Osman EROĞUL**  
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

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

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 161311053 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Seray Çakırgil**'in ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**ÖNCELİK SEVİYELERİNE SAHİP ÇOKLU YETENEK GEREKTİREN İŞLER İÇİN EKİP OLUŞTURMA, ÇİZELGELEME VE ROTALAMA PROBLEMİNE BÜTÜNLEŞİK ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI**" başlıklı tezi **10 Nisan 2019** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı :** **Dr. Öğr. Üyesi Eda YÜCEL** .....  
TOBB Ekonomik ve Teknoloji Üniversitesi

**Eş Danışman :** **Dr. Öğr. Üyesi Gültekin KUYUZU** .....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Doç. Dr. Ayşegül ALTIN KAYHAN** .....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

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

**Dr. Öğr. Üyesi Çağrı KOÇ** .....  
Ankara Sosyal Bilimler 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.

Seray ÇAKIRGİL



## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### ÖNCELİK SEVİYELERİNE SAHİP ÇOKLU YETENEK GEREKTİREN İŞLER İÇİN EKİP OLUŞTURMA, ÇİZELGELEME VE ROTALAMA PROBLEMİNE BÜTÜNLEŞİK ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI

Seray ÇAKIRGİL

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

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Eda YÜCEL

Eş Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Gültekin KUYZU

Tarih: Nisan 2019

Bu çalışmada, yerinde servis hizmeti operasyonlarında gözlemlenen, çoklu yetenek gereksinimi içeren iş gücü çizelgeleme ve rotalama problemi ele alınmıştır. Problem, gerçek hayatta 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 problemine dayanmaktadır. Problemden, farklı konumları, öncelikleri ve yetenek gereksinimleri olan işler için; uygun teknisyen ekiplerinin oluşturulması ve ekiplere ait sıralı iş listelerine karşılık gelen günlük rotaların belirlenmesi gerekmektedir. Birinci amaç, işlerin önceliklerine göre iş atamasını gerçekleştirmek, ikinci amaç ise toplam operasyonel maliyetlerin (seyahat maliyetleri ve dış kaynak kullanımı maliyetleri) en aza indirilmesidir. Bu hedefler göz önünde bulundurularak, Pareto optimal çözüm seti sonucu veren çoklu amaç fonksiyonlu bir matematiksel model geliştirilmiştir. Problem boyutu büyüdükçe matematiksel modelin kabul edilebilir sürede ve kalitede çözüm vermemesi nedeniyle, Pareto etkin sınırına iyi bir yaklaşım sağlayacak iki aşamalı bir

matsezgisel önerilmiştir. İlk aşamada etkili bir başlangıç çözüm seti bulunmakta, ikinci aşamada ise çok amaçlı değişken komşuluk arama metodu kullanılarak iyileştirilmiş bir çözüm seti oluşturulmaktadır. Önerilen yöntemin etkinliği, gerçek problem örnekleri ve literatürden elde edilen örnekler ile test edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** İşgücü çizelgeleme ve rotalama, Çok amaçlı karar verme, Matsezgisel, Değişken komşuluk arama.





## **ABSTRACT**

Master of Science

**INTEGRATED SOLUTION APPROACHES FOR TEAM FORMING,  
SCHEDULING AND ROUTING PROBLEM FOR MULTI-SKILL TASKS WITH  
PRIORITIES**

Seray ÇAKIRGİL

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

Supervisor: Asst. Prof. Eda Yücel

Co-Supervisor: Asst. Prof. Gültekin Kuyzu

Date: April 2019

In this study, we study the multi-skill workforce scheduling and routing problem that arises in field service operations. It is motivated by a real-life problem that electricity distribution companies face on a daily basis. Given a set of technicians having different skills and a set of geographically dispersed tasks with different skill requirements and priorities, the goal is to form teams of technicians and to assign a sequence of tasks to each team in accordance with their skill requirements. There are two objectives: completing higher priority tasks earlier and minimizing total operational (travelling costs and outsourcing costs) costs. We propose a mixed integer programming (MIP) model to find Pareto optimal solutions. As the computational effort grows drastically for realistic problem instances, we propose a two-stage metaheuristic to obtain a good approximation of the Pareto frontier. In first stage, an initial solution is constructed. Then in second stage, solution set from initial solution is composed by using multi objective variable neighborhood search. We demonstrate the performance of the

proposed matheuristic through realistic problem instances and instances from the literature.

**Keywords:** Workforce scheduling and routing, Multi objective decision making, Matheuristic, Variable neighborhood search



## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım ve yüksek lisans eğitimim boyunca benden hiçbir zaman desteğini ve zamanını esirgemeyen, kendimi geliştirmemde ve bu alanda çalışma isteğimi daima sürdürmemi sağlayan değerli danışman hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Eda YÜCEL ve Dr. Öğr. Üyesi Gültekin KUYZU'ya,

Kıymetli zamanlarını ayırarak tezimi okuyan ve geri bildirimde bulunan tez jürimin üyeleri Doç. Dr. Ayşegül ALTIN KAYHAN, Doç. Dr. Nilgün FESCİOĞLU ÜNVER ve Dr. Öğr. Üyesi Çağrı KOÇ'a,

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca bana burs sağlayan TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne, yine lisans ve yüksek lisans eğitimimde tecrübelerini ve desteklerini esirgemeyen TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine,

Çalışmalarım boyunca beni motive eden, zaman zaman bana benden daha çok inanan ve güvenen, bana sevgilerini hissettiren arkadaşlarıma; 20 senedir yanımda olan ve yüksek lisans boyunca da bana hep destek olan Melike'ye, tez konuma kolayca alışmamı sağlayıp hiçbir konuda yardımını benden esirgemeyen Gözde'ye, yüksek lisansımı değerli kılan ve daima yanımda olan Nurdan ve Seren'e, ayrı kulvarlarda olmamıza rağmen beni anlamaya çalışıp sevgilerini esirgemeyen Fulden, Sevi ve Dilşad'a, iyi veya kötü günlerimde daima yanımda olup beni motive eden Umut'a, lisanstan beri hep yanımda olup sevgi ve desteklerini benden hiç esirgemeyen Hande ve Tanay'a,

Maddi manevi her konuda, her zaman arkamda duran ve beni destekleyen; sevgisini ve desteğini hiçbir zaman benden esirgemeyen ve bana daima inanan bu hayattaki en büyük şanslarım canım annem ve babama sonsuz teşekkürler.

Bu çalışmayı 117M577 numaralı proje kapsamında destekleyen TÜBİTAK'a ayrıca teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vi</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>viii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>ix</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>x</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>xi</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>xii</b>
<b>SEMBOLE LİSTESİ</b> .....	<b>xiii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. LİTERATÜR TARAMASI</b> .....	<b>3</b>
<b>3. PROBLEM TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL</b> .....	<b>9</b>
<b>4. ÖNERİLEN ÇÖZÜM YÖNTEMİ</b> .....	<b>15</b>
4.1 Başlangıç Çözümü Oluşturma: 4 Adımlı Matsezgisel .....	15
4.1.1 İlk adım: İşlerin kümelenmesi.....	15
4.1.2 İkinci adım: Atama.....	18
4.1.3 Üçüncü adım: Rotalama.....	20
4.1.4 Dördüncü adım: İyileştirme .....	21
4.2 Çok Amaçlı Değişken Komşuluk Arama.....	21
<b>5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLAR</b> .....	<b>25</b>
5.1 Veri Setleri .....	26
5.2 Önerilen Sezgisel Yöntemin Çözüm Kalitesinin Değerlendirilmesi .....	27
5.3 Çok Amaçlı Değişken Komşuluk Arama Metodunun Çözüm Kalitesi Üzerindeki Etkisinin Değerlendirilmesi .....	31
5.4 Ekip Oluşturma Kararının Analizi .....	32
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>37</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>39</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>43</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 4.1 : n bir benzerlik boyutu ise işlerden oluşacak kümeler.....	16
Şekil 4.2 : n bir farklılık boyutu ise işlerden oluşacak kümeler.....	16
Şekil 5.1 : 5 iş-5 teknisyenlik ilk veri seti için koşturum sonuçları .....	29
Şekil 5.2 : 5 iş-5 teknisyenlik ikinci veri seti için koşturum sonuçları .....	29
Şekil 5.3 : 10 iş-5 teknisyenlik ilk veri seti için koşturum sonuçları .....	30
Şekil 5.4 : 10 iş-5 teknisyenlik ikinci veri seti için koşturum sonuçları .....	30







## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 5.1 : Gerçekçi veri setindeki örnekler için iş ve teknisyen sayıları .....	27
Çizelge 5.2 : Literatüreden türetilen veri seti için kurucu matsezigisel ve çok amaçlı değişken komşuluk arama yöntemi sonuçları .....	34
Çizelge 5.3 : Gerçekçi veri seti için kurucu matsezigisel ve çok amaçlı değişken komşuluk arama yöntemi sonuçları .....	35
Çizelge 5.4 : Önerilen sezgisel yöntemin ekip oluşturma ve sabit ekipler ile gerçekçi veri seti üzerinden alınan sonuçları .....	36





## KISALTMALAR

<b>İÇRP</b>	: İş Gücü Çizelgeleme ve Rotalama Problemi
<b>MM</b>	: Matematiksel Model
<b>TOC</b>	: Toplam Operasyonel Maliyet
<b>TWC</b>	: Toplam Ağırlıklı Tamamlanma Zamanı





## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

### Kümeler

$N$	işler kümesi
$N'$	depo düğümünü de içeren işler kümesi
$A$	işler arasındaki yollar için oluşturulan ayrıtlar kümesi
$M$	teknisyenler kümesi
$Q$	yetenekler kümesi
$K$	ekipler kümesi
$C$	iş kümeleri kümesi
$S$	benzerlik boyutları kümesi
$D$	farklılık boyutları kümesi
$N_c$	Her $c \in C$ kümesine atanan işler kümesi
$N^{(u)}$	Atanamayan işler kümesi
$M^{(u)}$	Atanamayan teknisyenler kümesi
$D$	Çok amaçlı değişken komşuluk arama için şimdiki domine edilemeyen sonuçlar kümesi
$D^{(0)}$	Çok amaçlı değişken komşuluk arama için başlangıç domine edilemeyen sonuçlar kümesi
$D^{(d)}$	Çok amaçlı değişken komşuluk arama için şimdiki domine edilen sonuçlar kümesi
$N_1(s)$	$s$ çözümünden <i>ekip içinde takas</i> komşuluğu ile elde edilen çözümler kümesi
$N_2(s)$	$s$ çözümünden <i>değiştirme</i> komşuluğu ile elde edilen çözümler kümesi
$N_3(s)$	$s$ çözümünden <i>ekipler arası takas</i> komşuluğu ile elde edilen çözümler kümesi

$N_4(s)$   $s$  çözümünden *ekleme* komşuluğu ile elde edilen çözümler kümesi

### Parametreler

$t_{ij}$	$i \in N'$ işinden $j \in N'$ işine ulaşma süresi
$c_{ij}$	$i \in N'$ işinden $j \in N'$ işine seyahat maliyeti
$p_i$	$i \in N$ işinin işlem süresi
$d_i$	$i \in N$ işinin termin zamanı
$w_i$	$i \in N$ işinin ağırlığı
$v$	ekiplere atanabilecek maksimum teknisyen sayısı
$u_{iq}$	$i \in N$ işinin $q \in Q$ yeteneği için gereksinimi
$y_{mq}$	$m \in M$ teknisyeninin $q \in Q$ yeteneğine için seviyesi
$\tau$	vardiya süresi
$o_i$	$i \in N$ işinin dış kaynak ile yapılma maliyeti
$d_{ic}$	$i \in N$ işinin $c \in C$ kümesine uzaklığı
$d_{icn}^{(S)}$	$i \in N$ işinin $c \in C$ kümesine $n \in S$ benzerlik boyutu için uzaklığı
$d_{icn}^{(D)}$	$i \in N$ işinin $c \in C$ kümesine $n \in D$ farklılık boyutu için uzaklığı
$l_{in}$	$i \in N$ işinin $n$ boyutu için seviyesi
$\mu_n$	$n$ boyutu için bütün işlerin ortalaması
$\sigma_n$	$n$ boyutu için bütün işlerin standart sapması
$\mu_{nci}$	$i \in N$ işi $c \in C$ kümesine eklenirse $n$ boyutu için küme ortalaması
$\sigma_{nci}$	$i \in N$ işi $c \in C$ kümesine eklenirse $n$ boyutu için küme standard sapması
$w_n$	$n$ boyutu için ağırlık
$\bar{t}_c$	$c \in C$ kümesinde iki iş arasındaki ortalama seyahat süresi
$r_{qc}$	$c \in C$ kümesinin $q \in Q$ yetenek gereksinimi
$s_i(t)$	ziyaret edilmeyen $i$ işleri için $t$ anındaki zamana bağlı skoru
$s$	çok amaçlı değişken komşuluk arama için temel çözüm
$v_1$	çok amaçlı değişken komşuluk arama için iterasyon sayısı
$v_2$	çok amaçlı değişken komşuluk arama için iyileşme göstermeyen iterasyon sayısı

- $b$  çok amaçlı değişken komşuluk arama için her hareket sonrası üretilen komşu çözüm sayısı
- $p^{(d)}$  çok amaçlı değişken komşuluk arama için farklılaştırma olasılığı
- $\gamma$  çok amaçlı değişken komşuluk arama için *yeniden ekip kurma* adımının sıklığı







## 1. GİRİŞ

Yerinde servis hizmetleri, müşterilerin servis hizmetlerini buldukları yerde alması olarak tanımlanabilmektedir. Bu tür hizmetlere duyulan ihtiyaç, gün geçtikçe artmaktadır. Günümüzde bu sektörde hizmet veren şirketlerin, sağladıkları hizmetlerin türleri ve yerleri bakımından daha esnek olmaları gerekmektedir (Castillo-Salazar ve diğ., 2016). İlaç tedavisi veya tedavi sağlamak için hastaları evlerinde ziyaret eden hemşirelerin kullanıldığı gezici sağlık hizmetleri (Cheng ve Rich, 1998), farklı müşteri noktalarında onarım yapan teknisyenlerin çalıştığı teknik servis şirketlerinin sunduğu hizmet (Cordeau ve diğ., 2010), veya güvenlik şirketlerinin sundukları kontrol hizmetleri (Misir ve diğ., 2011) yerinde servis hizmetleri için yaygın örneklerdir. Gerçek hayatta karşılaşılan bu gibi problemler, iş gücü çizelgeleme ve rotalama problemleri (İCRP) olarak sınıflandırılmaktadırlar. Bu servislerde, belirli bir planlama ufkunda yapılması gereken iş sayısı genellikle mevcut teknisyenlerin sayısından çok daha yüksektir. İşlerin gerçekleştirilebilmesi için her bir teknisyen veya teknisyenlerden oluşan ekip, farklı lokasyonda bulunan işlere atanır ve işler arasında seyahat ederek işleri gerçekleştirirler. Bu seyahatler yaya olarak; özel araç, toplu taşıma veya bisiklet kullanılarak yapılabilmektedir. Bu nedenle, personelin günlük çalışma saatlerinin önemli bir kısmı seyahat ederek boşa harcanmaktadır. Bu durum, iş atama ve çizelgeleme probleminin yanı sıra bir rotalama problemini de ortaya çıkarmaktadır.

Bu çalışmada, genelde yerinde servis hizmeti sağlayan tüm servis operasyonlarda, özelde ise enerji dağıtım sektöründe gözlemlenen çoklu yetenek gereksinimleri varlığında iş gücü çizelgeleme ve rotalama problemi ele alınmıştır. Problemin kaynağı, Türkiye'deki bir enerji dağıtım şirketinin günlük olarak karşılaştığı operasyonel problemlerden biri olan sahadaki ekiplerin ve işlerin daha verimli bir şekilde takibi ve tamamlanmasıdır. Şirket, müşterilerine koruyucu ve önleyici bakım hizmetleri ve arıza teşhis hizmeti sunmaktadır. Sunulan tüm servis aktiviteleri, gün içinde tamamlanması planlanan işler olarak tanımlanmaktadır ve bu işlerin yaklaşık %90'ı vardiya başlamadan bilinmektedir. Tanımlanan bütün işler için, şirketin uyması gereken

sözleşmeler ve regülasyonlar göz önünde bulundurularak öncelik ve bitirme zamanı belirlenmektedir. Farklı türde ve seviyedeki yetenek gereksinimine sahip bu işler, yine farklı türde ve seviyede yeteneğe sahip iş gücü tarafından gerçekleştirilmektedir. Günlük vardiya başlamadan önce; farklı coğrafi lokasyonlarda, farklı öncelik ve yetenek gereksinimine sahip işlerin tamamlanması için çoklu yetenekli iş gücünden oluşan ekipler kurulmaktadır. Belirlenen zaman penceresinde tamamlanamayan işler ise, ek bir ücret karşılığında dış kaynak kullanılarak tamamlanmaktadır. Teknisyenlerden oluşan ekiplere işlerin atanması ve ekiplerin rotalarının oluşturulması kararları verilirken, yüksek öncelikli işlerin tamamlanma süresi ve toplam operasyonel (seyahat maliyeti ve dış kaynak kullanma maliyeti) maliyetler, şirket tarafından eşit önem verilerek göz önünde bulundurulmuş faktörlerdir. Bu bilgiler ışığında, çalışmanın genel amacı, operasyonel maliyetlerin en küçüklenmesi ve yüksek önceliğe sahip işlerin erken tamamlanmasını sağlayacak şekilde; işlerin önceliklerini ve yetenek gereksinimlerini dikkate alarak ekiplerin oluşturulması, ekiplere işlerin atanması ve günlük rotalarının belirlenmesidir.

Tanımlanan problemin çözümü için öncelikle Pareto optimal çözüm seti sonucu veren çoklu amaç fonksiyonuna sahip bir karma tam sayılı matematiksel model geliştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda, problemin gerçek hayat uygulamalarındaki boyutu için matematiksel modelin kabul edilebilir sürede, istenilen kalitede çözüm üretilmediği görülmüştür. Bu durum göz önünde bulundurularak, Pareto etkin sınırına iyi bir yaklaşım sağlayacak ve daha kısa sürede kaliteli sonuçlar elde edilecek iki aşamalı bir sezgisel yöntem önerilmiştir. Sezgisel yöntemin ilk aşamasında, etkili ve olurlu bir başlangıç çözümü elde edilebilecek dört aşamalı bir matsezgisel geliştirilmiştir. İkinci aşamada ise çok amaçlı değişken komşuluk arama sezgiseli kullanılarak, başlangıç çözümünden domine edilemeyen çözümler kümesi elde edilmektedir. Önerilen yöntemlerin etkinliği, gerçek problem örnekleri ve literatürden türetilen örnekler kullanılarak test edilmiştir.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu kısımda ele alınan problem ve çözüm yöntemini içeren literatürde bulunan çalışmalar anlatılacaktır. İşgücü çizelgeleme ve rotalama problemi için literatür üç farklı ana başlık altında incelenmiştir: Amaç fonksiyonu, problem tanımı ve çözüm yöntemi.

İşgücü çizelgeleme ve rotalama problemi farklı uygulama alanlarında ve farklı amaçlar düşünülerek çalışılmıştır. Çalışan sayısını en küçükmek (Allaoua ve diğ., 2013), toplam iş tamamlanma zamanını en küçükmek (Cordeau ve diğ., 2010; Fırat ve Hurkens, 2012), toplam operasyonel (seyahat, dış kaynak kullanımı, fazla mesai v.b.) maliyeti en küçükmek (Kovacs ve diğ., 2012; Trautsamwieser ve Hirsch, 2011; Zamorano ve Stollitz, 2017), yapılacak iş sayısını en büyükmek (Xu ve Chiu, 2001) literature sıklıkla kullanılan amaç fonksiyonlarına örnek gösterilebilir. Bunlara ek olarak, birden fazla amaç fonksiyonunun ağırlıklı toplamı ve çeşitli kısıtların ihlalinin cezalandırılması da literatürde amaç fonksiyonu olarak yer almıştır (Hiermann ve diğ., 2015; Misir ve diğ., 2011). Bu tez kapsamında amaç, toplam operasyonel maliyeti küçültmek ve aynı zamanda yüksek öncelikli işleri düşük öncelikli işlerden erken tamamlamaktır. Bu nedenle, iki ayrı amaç fonksiyonu tanımlanmıştır: Seyahat ve dış kaynak kullanımı maliyetlerinden oluşan toplam operasyonel maliyeti en küçükmek ve bütün işlerin öncelik sınıfına göre sahip olduğu ağırlık göz önünde bulundurularak toplam ağırlıklı bitiş zamanını en küçükmek. Bu iki amaç fonksiyonu, aralarındaki takas ilişkilerini bulmak ve karar vericilere içgörü sağlamak amacıyla eş zamanlı olarak optimize edilmiştir.

İki veya daha fazla amaçlı İÇRP problemi için literatürde karşılaşılan ilk çalışma olan Alsheddy ve Tsang (2011), teknisyen rotalama maliyetini ve teknisyenin işleri yapmak konusundaki isteğini aynı anda ele alan bir iki amaçlı bir optimizasyon problemini ele almıştır ve bu problemin çözümü için bir yetkilendirme çizelgeleme modeli önerilmiştir. Breakers ve diğ., (2016), evde bakım hizmetleri için çizelgeleme ve rotalama problemini çalışmış, maliyet en küçükmesi ve müşteri uygunluğunun en

büyüklenmesi amaç fonksiyonlarını aynı önem ile ele almışlardır. Problemin çözümü için bir çoklu yönlü yerel arama çerçevesinde, gömülü geniş komşuluk arama metasezgisel çözüm yöntemi önerilmiştir. Urquhart ve Fonzone (2017), sosyal bakım hizmetleri için iş gücü çizelgeleme ve rotalama problemi üzerine çalışmıştır. Bu çalışmada maliyet azaltma, CO<sub>2</sub> azaltma ve araba kullanımını azaltma olarak tanımlanmış üç adet amaç fonksiyonu bulunmaktadır. Çözüm yöntemi olarak Pareto sınırına yaklaşık çözümler üretecek evrimsel bir algoritma önerilmiştir. Son zamanlarda yapılan bir çalışma olarak Liu ve diğ. (2018), medikal ekipler için çoklu periyotlu çizelgeleme ve rotalama problemi çalışmış olup; toplam operasyonel maliyetin en küçüklenmesi ve müşteri memnuniyetinin en büyüklenmesi amaç fonksiyonlarını eş zamanlı olarak ele almıştır. Küçük boyutlu örneklerde, domine edilmeyen çözümleri bulmak için bir kesin  $\epsilon$ -kısıt metodu önerilmiş olup; orta ve büyük ölçekli örneklerin çözümü için ise üç farklı sezgisel yöntem önerilmiştir. Literatürdeki çalışmalardan da görülebileceği üzere, çok amaçlı İÇRP problemi günümüzde popüler hale gelen bir çalışma alanı olmuştur. Bir diğer yandan, bildiğimiz kadarıyla, ekip oluşturma kararını içeren teknisyen çizelgeleme problemini göz önünde bulunduran çoklu amaç fonksiyonlu bir İÇRP çalışması henüz yapılmamıştır. İÇRP için problem tanımı, problemin farklı özellikleri göz önünde bulundurularak farklılaştırılmaktadır. Planlama ufku, yetenek gereksinimleri, tek veya daha fazla ulaşım tipi, ekip oluşturma gerekliliği, rotalama gerekliliği; işlerin zaman penceresi, öncelik veya ardıllık-öncüllük ilişkisine sahip olup olmaması problem tanımı yapılırken kullanılan özelliklere örnek olarak gösterilebilir. Takip eden paragraflarda, her bir problem boyutu için literatürde bulunan çalışmaların incelenmesi ve tezde çalışılan problem ile bağlantıları verilecektir.

Yerinde servis hizmetleri sektöründe, işlerin yapılması için birden fazla teknisyene ihtiyaç duyulabilmektedir. Bu gereklilik literatürde iki farklı şekilde ele alınmıştır: Senkronizasyon ve ekip oluşturma. Goel ve Meisel (2013), her personel için ayrı rotalar oluşturmuş ve bazı işlerin aynı anda birden fazla teknisyen tarafından yapılabilmesini sağlayacak bir senkronizasyon ile problemi ele almışlardır. Öte yandan, telekomünikasyon ağ bakım sektöründe çalışılan bir İÇRP problemi için Cordeau ve diğ. (2010), gün başında teknisyenlerden ekipler oluşturarak bütün gün boyunca işleri aynı ekiplerle tamamlar. Literatürdeki bazı çalışmalarda, ekipler önceden belirlenmiş ve sabit olarak ele alınmıştır ve problem ekip oluşturma olmadan

ele alınmaktadır (Allaoua ve diğ., 2013). Kovacs ve diğ., (2012) problemi teknisyen çizelgeleme ve rotalama problemi için ekip oluşturarak ve oluşturmayarak iki farklı şekilde ele almışlardır.

Literatürdeki bazı iş gücü çizelgeleme çalışmaları, rotalama adımını çalışmalarına dahil etmemişlerdir. Cordeau ve diğ. (2010) ve Fırat ve Hurkens (2012), Fransa Yöneyim Araştırma Derneği tarafından düzenlenen ROADEF Challenge 2007 kapsamında çoklu yetenekli teknisyen çizelgeleme problemi üzerinde çalışmışlardır. Bununla birlikte, yerinde servis hizmetlerinde, yapılması gereken işler farklı coğrafi lokasyonlarda bulunmaktadır. Bu nedenle iş gücü çizelgeleme ve rotalama problemi, bu tezde olduğu gibi, aynı anda ele alınmalıdır.

Bazı İÇRP uygulamalarında, yapılacak işlerin yetenek gereksinimi bulunmamakta veya bütün işler aynı yeteneğe sahip olmaktadır. Lau ve Gunawan (2012) güvenlik personeli görevlendirme, Cheng ve Rich (1998) hemşire çizelgeleme ve rotalama, Goel ve Meisel (2013) ise elektrik bakım alanında işlerin yetenek gereksinimini göz önünde bulundurmamışlardır. Diğer yandan, Kovacs ve diğ. (2012), Fırat ve Hurkens (2012), Cordeau ve diğ. (2010) ve Zamorano ve Stolletz (2017) çalışmalarında olduğu gibi, işlerin belirli yetenek gereksinimleri olduğu ve teknisyenlerin de en az bir yetenek için yetkin olduğu çalışmalara da literatürde sıklıkla yer verilmektedir. Bu çalışmada da çoklu yetenekli işler ve teknisyenlerin olduğu durum ele alınmıştır.

Bu çalışmadaki problem tanımı, bir enerji dağıtım şirketinin karşılaştığı bir gerçek hayat problemine dayandığı için yapılması gereken işler, işlerin tipinin ve aciliyetinin göz önünde bulundurulmasını gerektiren belirli regülasyon ve kurallara göre tanımlanan zaman penceresi içerisinde tamamlanmalıdır. İşlerin belirli bir zaman penceresine sahip olması durumu, literatürdeki pek çok İÇRP çalışmasında ele alınmıştır. Cordeau ve diğ. (2010), işlerin katı zaman pencereli olduğu durumda, işin belirlenen aralıkta tamamlanamamasını bir ceza maliyeti ile değerlendirmişlerdir. Kovacs ve diğ. (2012), işlerin istenilen zaman aralığında tamamlanamamasını dış kaynak kullanımı ile ele almıştır. Öte yandan, Tang ve diğ. (2007) işler için herhangi bir zaman penceresi tanımlamamıştır. İşlerin zamanla ilgili değerlendirilebilecek bir diğer özelliği, işler arasındaki öncüllük – ardıllık ilişkisidir. Bir iş, başka bir iş için öncül olarak verilmişse, ikinci işin başlayabilmesi için öncül olan işin tamamlanması gerekmektedir. Cordeau ve diğ. (2010) ve Goel ve Meisel (2013), işler için öncelik kısıtlarını göz önünde bulundurmuşlardır. Bu çalışmada, Kovacs ve diğ. (2012) ve

Zamorano ve Stolletz (2017)'de olduğu gibi işler arasında öncüllük – ardıllık ilişkisinin olmadığı varsayılmaktadır.

İÇRP teknisyen veya ekip rotalama kararlarını da içerdіđi için, çalışmalar arasındaki rotalama unsurları farklılık gösterebilmektedir. Ekip veya teknisyen mobilizasyonu için kullanılacak ulaşım çeşitlerine toplu taşıma, bisiklet veya özel araç örnek gösterilebilir. Hiermann ve diğ. (2015) ve Fikar ve Hirsch (2017), sağlık personelinin hastalara ulaştırmak için toplu taşımayı kullanmışlardır. Bu çalışmada, teknisyenler işleri gerçekleştirebilmek için özel ekipmanlara ihtiyaç duymaktadırlar. Bu nedenle, işler arasındaki ulaşım şirket tarafından sağlanan özel araçlar ile yapılmaktadır. Kullanılan araç filonunun homojen olduğu, yani filonun yalnızca bir tip araçtan oluştuğu ve günün başlangıcında işler için gerekli ekipman ve yedek parçaların araçlara yüklendiği varsayılmaktadır. Mathlouthi ve diğ. (2018), yedek parçaların elde bulunma durumunu da göz önünde bulunduran bir teknisyen çizelgeleme ve rotalama problemi çalışmıştır.

Literatürdeki pek çok İÇRP çalışmasında, bütün problem parametrelerinin deterministik olduğu kabul edilmiştir. Bazı çalışmalar ise belirsizliği önerdikleri modellere dahil etmiştir. Evde sağlık hizmeti alanında çalışan Lanzarone ve Matta (2014), işlerde rasgeleliği ele alırken, Yuan ve diğ. (2015) işlerin işlem sürelerinin rasgele olduğu varsayımı ile hareket etmiştir. İki çalışma da gürbüz optimizasyon yöntemi gibi kesin çözüm yöntemleri önermişlerdir. Bunlara ek olarak, Zhan ve Wan (2018), evde bakım hizmetleri için rassal servis zamanlı ile çalışmış ve tabu arama sezgisel tabanlı bir algoritma kullanarak probleme etkili bir çözüm bulmuşlardır.

İÇRP çalışmaları planlama ufku bakımından da farklılık göstermektedir. Bazı çalışmalar (Kovacs ve diğ., 2012; Cordeau ve diğ., 2010; Hindle ve diğ., 2000; Rest ve Hirsch, 2016) sürekli bir planlama ufkunu göz önünde bulundururken, diğer çalışmalarda (Tang ve diğ., 2007; Bostel ve diğ., 2008; Shao ve diğ., 2012; Bard ve diğ., 2014; Chen ve diğ., 2017) çok dönemli planlama ufku kullanılmıştır. Genellikle, çok dönemli planlama ufku, müşterinin periyodik ziyarete ihtiyaç duyduğu veya talebin tek bir periyot için service kapasitesini aştığı durumlarda kullanılmaktadır. Sürekli planlama ufku ise, belirli bir gün için servis personelinin çizelge ve rotalarına karar verilmektedir. Bu çalışmada, bir günlük bir sürekli planlama ufku ele alınmıştır.

Literatürdeki İÇRP çalışmalarında çözüm yöntemi olarak; kesin çözüm yöntemleri, sezgiseller veya hibrid yaklaşımlar önerilmiştir. Rotalama kararının verilmediği çalışmalardan Cordeau ve diğ. (2010), kurucu bir sezgisel algoritmayı takiben çeşitli yok etme ve tamir etme metodlarının kullanıldığı bir geniş komşuluk arama sezgiseli önerirken, Fırat ve Hurkens (2012) karma tam sayılı programlama temelli bir çözüm yöntemi sunmuştur. Kovacs ve diğ. (2012), ekip oluşturma kararının ele alındığı ve alınmadığı iki durum için de uyarlanabilir geniş komşuluk arama algoritması önermiştir. Allaoua ve diğ. (2013), çoklu yetenekli evde sağlık hizmetleri personeli görevlendirme ve rotalama probleminin çözümü için, personel sayısını en küçükleme amacını güden tam sayılı doğrusal programlama modeli ve matsezigisel yaklaşım önermiştir. Goel ve Meisel (2013), elektrik bakım alanında tek yetenekli iş gücü çizelgeleme ve rotalama problemini, matematik programlama tekniklerini geniş komşuluk arama algoritması ile birleştirerek çalışmışlardır. Yuan ve diğ. (2015), tek amaç fonksiyonlu, çoklu yetenekli evde sağlık hizmetleri personeli çizelgeleme ve rotalama problemini rassal servis zamanları ve ekip oluşturma kararı olmaksızın ele almışlardır ve bu problemin çözümü için stokastik programlama formülasyonu önermişlerdir. Bu çözüm yöntemine ek olarak, dal-sınır algoritması gömülü bir sütun üretme yaklaşımı da önerilmiştir. Zamorano ve Stolletz (2017), ekip oluşturma kararı içeren, çok periyotlu ve yetenekli iş gücü çizelgeleme ve rotalama problemi için dal-fiyat algoritmasını, gün ayrıştırma ve ekip-gün ayrıştırma olmak üzere iki ayrı versiyon olarak ele almıştır. Önerilen yöntemin ekip-gün ayrıştırma versiyonu ile 5 günü kapsayan gerçek hayat örneklerini 29 işe kadar 3 saat içinde optimal olarak çözdüğü belirtilmiştir.

Bir enerji dağıtım şirketinin karşılaştığı gerçek bir problemin ele alındığı bu çalışmada; sürekli planlama ufkunda, çoklu yetenekli servis personelinden oluşan takımların oluşturulması ve bu takımlar ile farklı coğrafi lokasyonlarda bulunan, farklı yetenek gereksinimi ve ağırlıklara sahip işlerin tamamlanmasını hedefleyen bir İÇRP ele alınmıştır. Sıkı zaman penceresine sahip bu işlerin tamamlanamaması durumu, dış kaynak kullanımı ile işlerin tamamlanması ve bunun bir maliyet ile cezalandırılması uygulanmıştır. Eş zamanlı olarak ele alınacak iki amaç fonksiyonundan ilki, ağırlıklandırılmış iş tamamlanma süresinin en küçükleme olarak belirlenmiştir. İkinci amaç fonksiyonu ise seyahat ve dış kaynak kullanım maliyetinden oluşan toplam operasyonel maliyetlerin en küçüklemeidir. Bu çalışmanın literatürdeki diğer

Çalışmalardan en önemli farkı, çoklu yetenek gereksimli ve ekip oluşturmalı iş gücü  
izelgeleme ve rotalama problemini birden fazla amaç fonksiyonu ile ele almasıdır.





### 3. PROBLEM TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL

Bu bölümde, çalışmanın motivasyonunu oluşturan problemin genel hatları ve ele alınan gerçek hayat probleminin özellikleri anlatılmış olup, ele alınacak problem tanımlanmış ve problem tanımına uygun olarak bir matematiksel model geliştirilmiştir.

Enerji dağıtım sektöründe bulunan yerinde servis operasyonlarında, günlük olarak karşılaşılan iş gücü çizelgeleme ve rotalama probleminde; işler farklı coğrafi lokasyonlarda yer almakta, önceliklerine göre farklı ağırlıkları bulunmakta ve farklı yetenek gereksinimine sahip olmaktadır. Bu işleri yapabilmek için ise farklı yeteneklere sahip teknisyenler bulunmaktadır. İşlerin gerçekleştirilmesi için teknisyenlerden ekipler oluşturulmaktadır. Bu ekipler gün başlamadan oluşturulmakta ve vardiya süresi boyunca sabit kalmaktadır. Mevcut operasyonel akışta, işlere uygun bölge ve ekip eşleşmesine göre ekipler gönderilmekte ve ekipler işleri kendileri seçmektedirler. Bu durumda aynı işe birden fazla ekip gitmesi ya da bazı işlerin yapılamaması gibi yetersizlikler mevcut olabilmektedir. Ek olarak, işlerin atanmasında uyulması gereken bazı kurallar, işlerin termin zamanları ve önceliklerine bağlı olarak belirlenen ağırlıkları bulunmaktadır. Mevcut durum göz önüne alındığında, sunulacak çözüm yönteminde verilecek üç temel karar; yetenekleri göz önünde bulundurularak teknisyenlerden ekipler oluşturmak, işleri ağırlıklarını ve sürelerini dikkate alarak oluşturulan ekiplere atamak ve ekiplerin günlük rotalarını oluşturmak olarak belirlenmiştir.

Problem kapsamında hizmet verilen bölge  $G = (N', A)$  yönlü çizgesi üzerinde tanımlanmıştır.  $N$  kümesi farklı coğrafi bölgelerde bulunan işleri belirtmekte,  $N'$  ise depo düğümü olan "0" düğümünün de dahil olduğu,  $N \cup \{0\}$  kümesi olarak tanımlanmaktadır.  $A$  kümesi, mevcut işler arasındaki yollar için oluşturulan ayrıtları belirtmektedir.  $A$  kümesinde bulunan her  $(i, j)$  ayrıtı için,  $i \in N'$  işinden  $j \in N'$  işine ulaşma süresi  $t_{ij}$ , ulaşma maliyeti ise  $c_{ij}$  parametreleri ile temsil edilmiştir. Her  $i \in N$  işi için, sabit bir  $p_i$  işlem süresi ve işin önceliği göz önünde bulundurularak vardiya başlamadan belirlenen bir  $w_i$  ağırlığı bulunmaktadır. Her  $i \in N'$  işi için;  $f_i$  işin

tamamlanması gereken zaman sınırını belirtmektedir ve işlerin belirlenen zaman sınırından önce bitirilememesi durumunda dış kaynak kullanılarak tamamlanması gerekmektedir.  $M$  kümesi, teknisyen kümesi olarak tanımlanmaktadır ve her ekibin en fazla  $v$  teknisyenden oluşabildiği varsayımı yapılmıştır.  $Q$ , yetenek kümesini temsil etmektedir.  $u_{iq}$  0-1 parametresi,  $i \in N$  işinin  $q \in Q$  yeteneğine gereksinimini;  $y_{mq}$  0-1 parametresi ise,  $m \in M$  teknisyeninin  $q \in Q$  yeteneğine sahip olup olmadığını belirtir.  $K$  kümesi, ekip kümesi olarak tanımlanmıştır. Ekip kümesi  $|K| = |M|$  ve boş ekiplerden (teknisyensiz ekipler) oluşmaktadır.

Bu problem için planlama çevreni  $(0, \tau]$  olarak belirlenmiştir.  $\tau$ , normal mesai sınırına karşılık gelmektedir. Bu sınırdan ve verilen işin zaman penceresinde tamamlanamayan işler dış kaynak kullanılarak tamamlanmaktadır ve her  $i \in N$  için  $o_i$  dış kaynak kullanım maliyeti ödenmektedir.

Kısıtlarda kullanılacak karar değişkenleri aşağıda verilmiştir:

$C_i$ :  $i \in N$  işinin tamamlanma zamanı

$S_{ik}$ :  $k \in K$  ekibindeki  $i \in N$  işinin tamamlanma zamanı

$Y_{ik}$ :  $i \in N$  işinin  $k \in K$  ekibine atanıp atanmadığını belirten ikili karar değişkeni

$X_{ijk}$ :  $k \in K$  ekibinin,  $i \in N'$  işini  $j \in N'$  işinden hemen önce tamamlayıp tamamlamadığını belirten ikili karar değişkeni

$O_i$ :  $i \in N$  işinin dış kaynak ile yapılıp yapılmadığını belirten ikili karar değişkeni

$Z_{mk}$ :  $m \in M$  teknisyeninin  $k \in K$  ekibine atanıp atanmadığını belirten ikili karar değişkeni

Kısıtlar:

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

$$\sum_{j \in N'} X_{j,0,k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (2)$$

$$o_i + \sum_{k \in K} Y_{ik} = 1 \quad \forall i \in N \quad (3)$$

$$\sum_{j \in N'} X_{ijk} = Y_{ik} \quad \forall i \in N, k \in K \quad (4)$$

$$X_{iik} = 0 \quad \forall i \in N', k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{j \in N'} X_{ijk} - \sum_{j \in N'} X_{jik} = 0 \quad \forall i \in N, k \in K \quad (6)$$

$$S_{ik} \leq C_i \quad \forall i \in N, k \in K \quad (7)$$

$$S_{ik} \leq MY_{ik} \quad \forall i \in N, k \in K \quad (8)$$

$$S_{ik} + t_{ij} + p_j - S_{jk} \leq M(1 - X_{ijk}) \quad \forall (i, j) \in A, k \in K \quad (9)$$

$$\sum_{k \in K} Z_{mk} \leq 1 \quad \forall m \in M \quad (10)$$

$$\sum_{m \in M} Z_{mk} \leq v \quad \forall k \in K \quad (11)$$

$$u_{iq} Y_{ik} \leq \sum_{m \in M} y_{mq} Z_{mk} \quad \forall i \in N, k \in K, q \in Q \quad (12)$$

$$C_i \leq f_i(1 - O_i) + \tau O_i \quad \forall i \in N \quad (13)$$

$$C_i \geq \tau O_i \quad \forall i \in N \quad (14)$$

$$S_{ik}, C_i \geq 0 \quad \forall i \in N, j \in N, k \in K \quad (15)$$

$$Y_{ik}, X_{ijk}, Z_{mk}, O_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N', m \in M, k \in K \quad (16)$$

(1) ve (2) numaralı kısıtlar, bütün takımların rotalarının depodan başlamasını ve depoda bitirmesini sağlar. Kısıt (3), bütün işlerin eldeki kaynaklar ya da dış kaynak kullanılarak yapılmasını garanti eder, eğer eldeki kaynaklar ile tamamlanacaksa yalnızca bir ekip tarafından yapılmasını sağlar. (4) numaralı kısıt ile bir iş bir ekibe atanmış ise, bu işin ekibin rotasında bulunması sağlanır. (5) numaralı kısıt ile her iş yalnızca bir kere uğranması sağlanır. Kısıt (6), planlanan ziyaretlerde akışın

korunmasını garantileyen kısıttır. (7) ve (9) numaralı arasında kalan kısıtlar, her iş için tamamlanma zamanını hesaplamakta iken, (9) numaralı kısıt ile alt turların elenmesi sağlanır. (10) numaralı kısıt ile her teknisyen en fazla bir ekibe atanabilirken, kısıt (11) her takımındaki maksimum teknisyen sayısını sınırlar. (12) numaralı kısıt ile ekipler ve ekiplere atanacak işler arasındaki yetenek uyumu sağlanmaktadır. (13) numaralı kısıt ile her iş için tamamlanma zamanının işin zaman penceresini aşmaması sağlanırken, (14) numaralı kısıt ile, eğer iş dış kaynak kullanılarak yapılıyorsa işin tamamlanma zamanı  $\tau$  olarak atanır. (15) ve (16) numaralı kısıtlar işaret ve ikili değişken kısıtlarıdır.

Matematiksel model için iki farklı amaç fonksiyonu tanımlanmıştır:  $TWC$ , toplam ağırlıklı tamamlanma zamanını en küçüklemek;  $TOC$ , toplam operasyonel maliyeti en küçüklemek.  $TWC$  ve  $TOC$  aşağıda verildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$TWC = \sum_{i \in N} w_i C_i \quad (17)$$

$$TOC = \sum_{k \in K} \sum_{i, j \in N} c_{ij} X_{ijk} + \sum_{i \in N} o_i O_i \quad (18)$$

Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde optimalite, Pareto-optimallik tanımı ile anlaşılmaktadır ve problemlerin çözümü için Pareto kümesine ait tüm elementlerin tanımlanması gerekmektedir. Bu küme, diğer çözümler tarafından domine edilmeyen tüm çözümleri içermektedir (Arroyo ve diğ., 2011). Çok amaçlı optimizasyon problemindeki herhangi iki çözümü doğru olarak karşılaştırabilmek için aşağıda verilen tanımlara ihtiyaç duyulmaktadır.

**Tanım 1:** Bir  $s_1$  çözümünün, bir diğer  $s_2$  çözümünü domine ettiğini söyleyebilmek için,  $s_1$  çözümünün en az bir amaç fonksiyonunun  $s_2$  çözümünden daha iyi olması ve diğer amaç fonksiyonlarının ise  $s_2$  çözümünün amaç fonksiyonlarından kötü olmaması gerekir.

**Tanım 2:** Bir  $s$  çözümünün Pareto-optimal olabilmesi için, diğer çözümlerden hiçbiri tarafından domine edilmemesi gerekir.

Kesin çözüm metodu olan  $\epsilon$ -kısıt metodu, çok amaçlı optimizasyon problemlerinde Pareto sınırı elde etmek için sıklıkla kullanılan bir yöntemdir (Chankong ve Haimes,

1983; Liu ve diğ.,2018; Bérubé ve diğ., 2009). Bu çalışmada da Pareto sınırı elde etmek için  $\epsilon$ -kısıt yöntemine başvurulmuştur. İki amaçlı bir optimizasyon problemi için,  $\epsilon$ -kısıt yöntemi bir amaç fonksiyonunu  $\epsilon$ -kısıt olarak modele ekler,  $\epsilon$  değeri kademeli olarak azaltılarak tek amaçlı optimizasyon modeli çözülür. Bu modelin çözümü sonucunda da domine edilmeyen sonuçlar kümesi elde edilmektedir.  $TWC^+$  ve  $TOC^+$  sırasıyla  $TWC$  ve  $TOC$  amaç fonksiyonları için minimum olurlu değerler olsun.  $TOC^-$ ,  $TWC$  amaç fonksiyonu  $TWC^+$  değerini aldığı zaman  $TOC$  amaç fonksiyonunun değerini temsil etmektedir. Metod,  $TWC$  en küçükleme modelinin  $TOC \leq \epsilon$  kısıtı ile çözülmesiyle başlar. Bu aşamada  $\epsilon$ ,  $TOC^+$  değerine eşittir.  $\epsilon$  değerini her iterasyonda arttırmak için  $\delta$  parametresi kullanılmaktadır ve artan her  $\epsilon$  değeri ile  $TWC$  en küçükleme modeli çözülür. Bu işlem  $\epsilon$  değeri  $TOC^-$  amaç fonksiyonundan büyük olana kadar devam eder. Her iterasyonda elde edilen sonuçlar Pareto sınırı kümesine eklenir.

Problemin özel bir durumu; tek yeteneğe sahip, ekiplerin olmadığı (tek teknisyen bulunan), vardiya süresi bulunmayan işler için herhangi bir termin zamanı veya ağırlık olmayan ve çok yüksek dış kaynak kullanım maliyetli işler için problem Gezgin Satıcı Problemi olarak tanımlanabilir ve bu problemin NP-Zor olduğu kanıtlanmıştır (Karp, 1972).

Deneysel çalışmalar sonucunda, iki amaç fonksiyonu için de matematiksel model ile en fazla 10 iş-5 teknisyen içeren büyüklükte problem örnekleri için optimal sonuçları bulunabildiği görülmüştür. 15 işlik örneklere geçildiğinde ise, matematiksel modelin 2 saatlik zaman limitinde, Pareto sınırının bazı bölümlerinde olurlu sonuç bile bulunamadığı gözlemlenmiştir. Problemin gerçek boyutu düşünüldüğü zaman, matematiksel modeli çözmek yoluyla ticari çözümler ile istenilen kalitede bir Pareto çözüm seti bulunamayacağı görülmüştür. Bu sebeple, domine edilmeyen çözümler kümesini elde edebilmek için çok amaçlı bir sezgisel yöntem geliştirilmiştir.



## 4. ÖNERİLEN ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Tanımlanan problemde, büyük ölçekli gerçek hayat uygulamaları için önerilen matematiksel modelin kabul edilebilir sürede, istenilen kalitede çözüm üretmediği görülmüştür. Bu nedenle problemin çözümü için bir sezgisel yöntem önerilmiştir. Bu aşamada amaç optimal olmasa da iyi çözümlerin, matematiksel modele kıyasla daha kısa sürede elde edilmesidir. Önerilen sezgisel iki ana aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, 4 adımdan oluşan ve olurlu bir başlangıç çözümü üreten bir kurucu sezgisel tasarlanmıştır. İkinci aşamada ise, ilk aşamada üretilen başlangıç çözümünü kullanan bir değişken komşuluk arama sezgiseli önerilmiştir. Bu sezgiselin sonucunda domine edilemeyen sonuçlardan oluşan bir çözüm kümesi elde edilmektedir.

### 4.1 Başlangıç Çözümü Oluşturma: 4 Adımlı Matsezgisel

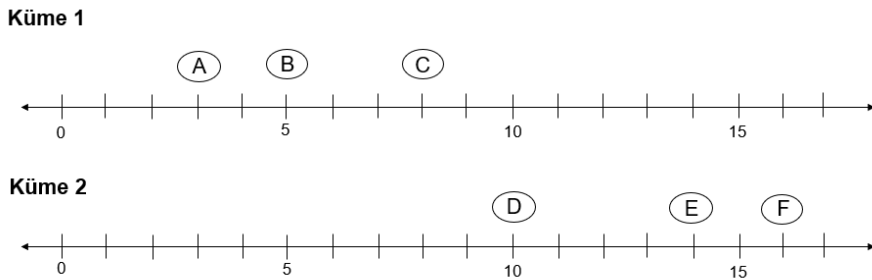
4 adımdan oluşan bir kurucu sezgisel ile bir başlangıç çözümü elde edilmektedir. İlk adımda, işler dört ayrı boyut göz önünde bulundurularak kümelendirilmektedir. Bu boyutlar işlerin coğrafi konumu, ağırlığı, yetenek gereksinimleri ve termin zamanı olarak belirlenmiştir (Bölüm 4.1.1). İkinci adımda, ilk adımda oluşturulan kümelere iki farklı matematiksel model yardımıyla teknisyenler atanmakta olup, bu teknisyenlerden ekipler oluşturulmaktadır (Bölüm 4.1.2). Üçüncü adım, ekiplerin başlangıç rotalarını oluşturmak için kullanılmaktadır (Bölüm 4.1.3). Son adımda, atanmamış işler mevcut ekiplere olası bir atama için tekrar gözden geçirilir (Bölüm 4.1.4). Bu adımlar ilerleyen bölümlerde detaylı olarak anlatılacaktır.

#### 4.1.1 İlk adım: İşlerin kümelenmesi

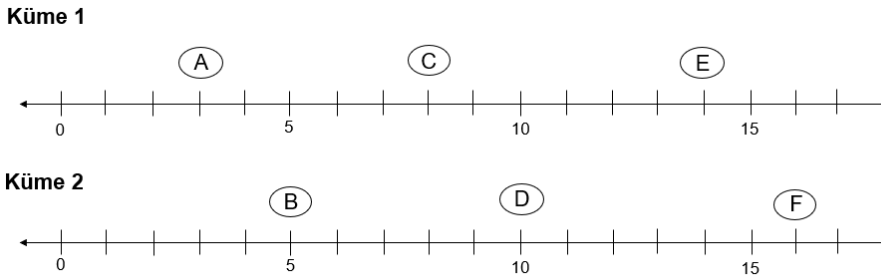
Kümeleme problemlerinde amaç;  $m$  farklı boyutta (özelliğe)  $N$  noktadan (nesneden) oluşan bir veri setinde, nesnelere  $k$  tane kümeye tam olarak bölünmesini sağlamaktır (Sağlam et. al.,2006). Genellikle bu kümeleme, benzer özellikler taşıyan nesnelere aynı kümede toplanmasını sağlayacak şekilde yapılmaktadır (Lu et al. (2014)).

İÇRP literatüründen bir örnek uygulama olarak, Castillo-Salazar v.d., (2016) işleri coğrafi yakınlıklarına göre kümelemektedir. Diğer yandan, bazı özellikler için, nesnelere çeşitliliği veya farklılığı kullanılarak kümeleme yapılmak istenebilmektedir

(Li et al. (2010)). Ele alınan problem için benzer coğrafi konum ve yetenek gereksinimine sahip işlerin aynı ekip tarafından gerçekleştirilmesi, operasyonel verimliliği sağlamak için istenen bir durumdur. Öte yandan, bütün yüksek öncelikli işlerin aynı ekip tarafından yapılacak olması, bu işlerin bazılarının mümkün olan en iyi zamandan sonra tamamlanmasına neden olabilmektedir. Benzer şekilde, aynı ekibe benzer termin zamanına sahip işlerin atanması; bazı işlerin bitmesi gerekenden oldukça erken, bazılarının ise termin zamanından sonra yapılmasına sebep olacaktır. Bu nedenle, kurucu sezgiselin ilk aşamasında; işleri coğrafi konum ve yetenek gereksinimlerine göre benzer işlerle fakat, ağırlıklarına ve termin zamanlarına göre farklı işlerle aynı kümede olacak şekilde bir kümeleme stratejisi izlenmiştir. Örnek olarak, altı farklı işi (A, B, C, D, E ve F) iki ayrı kümeye ayıracak olalım. Bu işlerin  $n_i$  boyutundaki değerleri sırasıyla: 3, 5, 8, 10, 14 ve 16 olarak verilsin.  $n_i$  bir benzerlik boyutu olarak tanımlanırsa; A, B, ve C işleri bir kümede ve geriye kalan işler ise diğer kümede olacak şekilde bir çözüm elde edilir (Şekil 4.1.). Eğer  $n_i$  boyutu bir çeşitlilik (farklılık) boyutu olarak tanımlanırsa; A, C ve E işlerinin bir kümede ve geriye kalan işlerin ise diğer kümede olması ile istenilen kümeleme çözümü elde edilir. (Şekil 4.2.).



Şekil 4.1.  $n$  bir benzerlik boyutu ise işlerden oluşacak kümeler



Şekil 4.2.  $n$  bir farklılık boyutu ise işlerden oluşacak kümeler



Kümelemede, optimizasyon modelinin amaç fonksiyonunu tanımlamak için en önemli noktalardan biri “benzerlik” teriminin tanımıdır (Koontz v.d.,1975). Kümeleme probleminin amaç fonksiyonu kümeler arası uzaklıkların toplamının en küçüklenmesi veya kümeler arası maksimum uzaklığın en küçüklenmesi olarak tanımlanabilir (Rao, 1971). Yaygın olarak kullanılan K-Means kümeleme algoritmasında, iteratif amaç bütün veri noktaları ve noktaların bulunduğu kümelerin merkezlerinin arasındaki 2-normlu uzaklıklar toplamının en küçüklenmesidir (Bradley ve Mangasarian, 1997).

$S$  kümesinin benzerlik,  $D$  kümesinin ise çeşitlilik (farklılık) boyutlarını içeren kümeler olduğunu varsayalım. Bu aşamada, amacı bütün benzerlik ve çeşitlilik boyutları için toplam Manhattan uzaklığını en küçükleyecek K-means algoritması kullanılmıştır. Bu algoritmadaki farklılık gösteren uzaklık tanımları aşağıdaki gibidir:

- $n \in S$  benzerlik boyutu için;  $l_{in}$   $i \in N$  işinin seviyesini,  $\mu_{cn}$  ise  $i$  işi  $c$  kümesinde değil iken kümenin ortalamasını belirtsin.  $i \in N$  işi,  $c$  kümesi ve  $n$  benzerlik boyutu için uzaklık  $d_{icn}^S = |l_{in} - \mu_{cn}|$  olarak tanımlanır.
- $n \in D$  çeşitlilik boyutu için,  $\mu_n$  ve  $\sigma_n$  sırasıyla tüm işlerin ortalaması ve standart sapmasını ifade etsin.  $\mu_{cni}$  ve  $\sigma_{cni}$  ise  $i$  işinin  $c$  kümesine eklenmesi halinde kümedeki işler için ortalama ve standart sapmayı sırasıyla ifade etmektedir.  $i$  işi,  $c$  kümesi ve  $n$  çeşitlilik boyutu için uzaklık  $d_{icn}^D = |\mu_n - \mu_{cni}| + |\sigma_n - \sigma_{cni}|$  olarak tanımlanır. Bu mesafe tanımı ile amaç, tüm işlerin ortalama ve standart sapmasına yakın kümeler oluşturmaktır. Bildiğimiz kadarıyla, ilk defa kümelemede bu uzaklık tanımını kullanılacaktır.
- $i$  işi için, tüm boyutlar düşünülerek  $c$  kümesine uzaklığı  $d_{ic} = \sum_{n \in S} w_n d_{icn}^S + \sum_{n \in D} w_n d_{icn}^D$  olarak tanımlanmıştır.  $w_n$   $n$  boyutu için ağırlığı temsil etmektedir.

Başlangıç kümelerini oluşturmak için iki farklı strateji kullanılabilir. İlk stratejide, küme merkezleri rasgele seçilmekte iken, ikinci strateji işleri kümelere rasgele olarak atamaktadır.

Kümeleme aşamasının sonucunda, iş kümelerinden oluşan bir  $C$  kümesi elde edilmektedir. Bu kümede, her  $i \in N$  işi bir  $c$  kümesine atanmıştır ve atanan işler kümesi  $N_c$  olarak temsil edilmektedir. Başlangıç çözümü algoritmasının ilk adımı olan kümeleme adımı için sözde kod Algoritma 1’de verilmiştir.

---

## Algoritma 1 Başlangıç Çözümü Oluşturma: Kümeleme

---

**Girdiler**  $N$ : işler kümesi,  $l_{in}$ :  $i \in N$  işinin  $n$  boyutundaki seviyesi,  $K$ : başlangıç küme sayısı

1: Rasgele küme merkezi atama veya rasgele iş atama stratejilerinden birini kullanarak başlangıç kümelerini oluştur.

2: **while** durma koşulları sağlanmadığı sürece **do**

3: **for** her  $i \in N$  işi için **do**

4:  $i$  işinin  $c$  kümesine olan  $d_{ic}$  uzaklığını hesapla

5:  $i$  işini  $c^*$  kümesine ata. ( $c^* = \mathit{argmin}_{c=1,\dots,K} d_{ic}$ )

6: **end for**

7: **end while**

**Çıktılar**: İş kümelerinden oluşan  $C$  kümesi,  $N_c$ : Her  $c \in C$  kümesine atanmış işler

---

### 4.1.2 İkinci adım: Atama

Başlangıç çözümü oluşturmanın ikinci adımında iki farklı matematiksel model kullanılmaktadır. İlk model, ilk adımda oluşturulan kümelere teknisyen atanmasını sağlarken; ikinci model teknisyen atanmış kümeler için ekipler oluşturarak ekip-teknisyen ve ekip-iş atamalarını yapmaktadır.

İlk model olan *teknisyen-küme ataması* modeli (19)-(22) numaralı denklemler ile ifade edilmiştir.  $d_{mc}$ ,  $m$  teknisyeninin  $c$  kümesini yetenek boyutunda uzaklığını;  $r_{qc}$ ,  $c$  kümesinin  $q$  yeteneği için gerekli yetenek seviyesini gösteren parametrelerdir.  $X_{mc}$ ,  $m$  teknisyeninin  $c$  kümesine atanıp atanmadığını belirten ikili karar değişkeni olarak tanımlanmıştır. Model ile teknisyen-küme ataması yaparken amaç, teknisyenleri kümelerin yetenek ihtiyaçları ile uyumlu olarak atamak ve aynı zamanda kümedeki işlerin tamamlanabilmesi için işlem sürelerini göz önünde bulundurarak her kümeye yeterli sayıda teknisyen atamaktır. Bu nedenle iki parçadan oluşan bir amaç fonksiyonu (19) numaralı denklemde tanımlanmıştır.  $\beta_c$ ,  $c$  kümesine atanan teknisyen sayısının, kümede bulunan işlerin servis süresi toplamına oranını temsil etmektedir ( $\frac{\sum_{m \in M} X_{mc}}{\sum_{i \in N_c} p_i}$ ).  $\beta$  ise tüm veri seti için aynı oranı vermektedir ( $|M| / \sum_{i \in N} p_i$ ). (20)

numaralı kısıt, teknisyen atamasının kümedeki işlerin yetenek gereksinimlerini sağlayacak şekilde yapılmasını sağlamaktadır. (21) numaralı kısıt ile, bütün

teknisyenlerin mutlaka bir kümeye atanması sağlanmaktadır. Model, çıktı olarak her  $c$  kümesine atanmış teknisyen kümelerini ( $M_c$ ) sağlamaktadır.

$$\min \sum_{c \in C} \sum_{m \in M} d_{mc} X_{mc} + \sum_{c \in C} |\beta_c - \beta| \quad (19)$$

Öyle ki;

$$\sum_{m \in M} y_{mq} X_{mc} \geq r_{qc} \quad \forall q \in Q, c \in C \quad (20)$$

$$\sum_{c \in C} X_{mc} = 1 \quad \forall m \in M \quad (21)$$

$$X_{mc} \in \{0,1\} \quad \forall m \in M, c \in C \quad (22)$$

İkinci model olan iş-teknisyen-ekip atama modeli, bütün kümeler için teknisyenlerden ekipler oluşturmak ve oluşturulan ekiplere işleri atamak için kullanılır. (23) – (29) ile tanımlanan bu modelde  $\bar{t}_c, N_c \cup \{0\}$  kümesindeki tüm iş çiftleri için ortalama seyahat zamanını belirtir.  $Z_{mk}, m \in M_c$  teknisyeninin  $k \in K$  ekibine atanıp atanmadığını;  $Y_{ik}$  ise,  $i \in N_c$  işinin  $k \in K$  ekibine atanıp atanmadığını gösteren ikili karar değişkenleridir. Modelin amacı oluşturulacak ekiplere en fazla sayıda işin atanmasını sağlamaktır. (24) numaralı kısıt, ekiplere atanacak işler ve teknisyenler arasındaki yetenek uyumunu sağlar. (25) numaralı kısıt ile her teknisyen yalnızca bir ekibe atanabiliyorken; (26) numaralı kısıt, ekiplere atanabilecek teknisyen sayısı  $v$  ile sınırlanır. (27) numaralı kısıt her işin yalnızca bir ekibe atanmasını sağlar. (28) numaralı kısıt ile, ekiplere atanan işlerin ortalama süresinin belirlenen mesai sınırını yaklaşık olarak aşmamasını sağlar.

$$\max \sum_{i \in N_c} \sum_{k \in K} Y_{ik} \quad (23)$$

Öyle ki;

$$\sum_{m \in M_c} y_{mq} Z_{mk} \geq u_{iq} Y_{ik} \quad \forall i \in N_c, q \in Q, k \in K \quad (24)$$

$$\sum_{k \in K} Z_{mk} \leq 1 \quad \forall m \in M_c \quad (25)$$

$$\sum_{m \in M_c} Z_{mk} \leq v \quad \forall k \in K \quad (26)$$

$$\sum_{k \in K} Y_{ik} \leq 1 \quad \forall i \in N_c \quad (27)$$

$$\sum_{i \in N_c} Y_{ik}(p_i + \bar{t}_c) + \bar{t}_c \leq \tau \quad \forall k \in K \quad (28)$$

$$Z_{mk}, Y_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall m \in M_c, k \in K, i \in N_c \quad (29)$$

Modelin sonucunda her  $k \in K$  ekibine atanmış iş kümeleri  $N_k$  ve teknisyen kümeleri  $M_k$  elde edilir. Atama adımının sonunda,  $M_c$  kümesinde bazı atanmamış teknisyenler ve  $N_c$  kümesinde bazı atanmamış işler bulunabilir. Bu işler ve teknisyenler sırasıyla  $N^{(u)}$  ve  $M^{(u)}$  kümelerinde tutulmaktadır.

### 4.1.3 Üçüncü adım: Rotalama

Başlangıç çözümü oluşturma algoritmasının üçüncü aşaması olan rotalamada, oluşturulan her ekip için başlangıç rotaları belirlenmektedir. Her  $k \in K$  ekibindeki ziyaret edilmeyen her  $i \in N_k$  işi için  $t=0$  anından başlamak üzere, zamana bağlı bir  $s_i(t)$  skoru hesaplanır. Bu skor (30)'da verildiği gibi tanımlanmıştır. En küçük skora sahip iş seçilerek, ekip rotasının en sonuna eklenir ve  $t$  zamanı güncellenir. Bu işlemler  $N_k$  kümesindeki bütün işler bitene kadar veya  $t$  zamanı  $\tau$  vardiya süresini aşana kadar tekrarlanır. Rotalama algoritması Algoritma 2'de verilmiştir.

$$s_i(t) = \frac{d_i - p_i - t}{w_i} \quad (30)$$

---

#### Algoritma 2 Başlangıç Çözümü Oluşturma: Rotalama

---

**Girdiler**  $K$ : ekipler kümesi,  $N_k$ : Her  $k \in K$  ekibi için atanmış işler kümesi

- 1: **for** Her  $k \in K$  ekibi için **do**
  - 2:    $t \leftarrow 0$  //  $t=0$  anından başla
  - 3:    $N'_k = N_k$  // ziyaret edilmemiş işler kümesi
  - 4:   Depo düğümünden başla:  $i' = 0$
  - 5:    $N_k^{(0)} \leftarrow \{i'\}$  // ziyaret edilen düğümlerin sıralı kümesi
  - 6:   **while**  $t \leq \tau$  ve  $N'_k \neq \emptyset$  **do**
  - 7:     **for**  $i \in N'_k$  **do**
  - 8:        $i$  işi için zamana bağlı skoru hesapla:  $s_i(t) = \frac{d_i - p_i - t}{w_i}$
-

---

9:     **end for**

10:    Henüz ziyaret edilmemiş en düşük skorlu işi belirle.  $i^* = \mathit{argmin}_{i \in N'_k} s_i(t)$

11:     $i^*$  işini ziyaret edilmeyen iş kümesinden çıkar:  $N'_k \leftarrow N'_k \setminus \{i^*\}$

12:     $t$  zamanını güncelle:  $t \leftarrow (t + t_{i',i^*} + p_{i^*})$

13:    Son ziyaret edilen düğümü güncelle:  $i' \leftarrow i^*$

14:     $i'$  işini ekibin rotasına ekle:  $N_k^{(0)} \leftarrow N_k^{(0)} \cup \{i'\}$

15:    **end while**

16:    Depo düğümünü (n+1) yeniden ekip rotalarına ekle:  $N_k^{(0)} \leftarrow N_k^{(0)} \cup \{n+1\}$

17: **end for**

**Çıktılar:**  $N_k^{(0)}$ : Her  $k \in K$  ekibi için rotalar

---

#### 4.1.4 Dördüncü adım: İyileştirme

İlk üç adım sonunda, herhangi bir takıma atanmamış işler bulunabilmektedir. Bu nedenle, başlangıç çözümü oluşturma yönteminin son adımında  $N^{(u)}$  kümesindeki işler, eldeki ekiplere atanabilmesi yeniden kontrol edilmektedir. Eğer atanamayan bir iş, bir ekip tarafından termin zamanı ve toplam vardiya zamanı geçmeden yapılabilirse, iş uygun olan ekibe rotasının sonundan eklenmektedir.

Verilen başlangıç çözümü oluşturma algoritması ile olurlu bir başlangıç çözümü elde edilmektedir. Başlangıç çözümünün olurluluğu, atanamayan işlerin dış kaynak kullanılarak tamamlandığı kabul edilerek sağlanmaktadır.

#### 4.2 Çok Amaçlı Değişken Komşuluk Arama

Önerilen çözüm yönteminin ikinci aşamasında, ilk aşamada bulunan başlangıç çözümüne indirgenmiş değişken komşuluk arama algoritması uygulanmaktadır ve domine edilemeyen olurlu bir çözüm seti bulunması amaçlanmaktadır.

Değişken komşuluk arama sezgiseli, ilk olarak Mladenovic ve Hansen tarafından önerilmiştir ve o zamanlardan günümüze uygulama alanları ve metodları hızla geliştirilmiştir. Bu sezgisel yöntemde, kullanılan komşulukların sistematik olarak değiştirilmesi ile bir yerel minimum bulunması ve pertürbasyon adımı ile de belirtilen yerel optimumdan kaçılması sağlanır (Mladenović ve Hansen, 1997). Araç rotalama problemleri (Belhaiza ve diğ., 2014; de Armas ve Melián-Batista, 2015), kümeleme problemleri (Hansen ve Mladenović, 2001) ve çizelgeleme problemleri (Almada-Lobo

ve diğ., 2008; Anghinolfi ve Paolucci, 2007) gibi farklı kombinatoriyal optimizasyon için değişken komşuluk arama algoritmasının etkililiği, belirtilen çalışmalar ile gösterilmiştir. İndirgenmiş değişken komşuluk arama algoritması, algoritmasının en çok zaman tüketen kısmı olan yerel arama prosedürlerinin arama verimliliğini arttırmak adına algoritmadan çıkartılmasına dayanmaktadır (Hansen ve Mladenović, 2001).

Metasezgisellerin tek amaç fonksiyonlu problemleri çözmedeki başarısı, araştırmacıları çok amaçlı kombinatoriyal problemin çözümü için de metasezgisellere yönlendirmiştir. Çok amaçlı değişken komşuluk arama yöntemi de önerilen metasezgisellerden bir tanesidir. Bu konuda bizim bilgimiz dahilinde yapılan ilk çalışmada (Geiger, 2008), seri üretim çizelgeleme problemi için çok amaçlı değişken komşuluk arama yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem önerilerek çözüm aranan diğer problem türlerine; makine çizelgeleme (Yun-Chia Liang, 2009) ve sıra bağımlı kurulum ve termin zamanlı tek makine çizelgeleme (Arroyo ve diğ., 2011) problemleri örnek gösterilebilir.

Bu çalışmada, Bölüm 3'te tanımlanan iki amaç fonksiyonlu iş gücü çizelgeleme ve rotalama problemi için çok amaçlı indirgenmiş değişken komşuluk arama metodu önerilmiştir. Algoritmanın her iterasyonu sonunda, domine edilemeyen çözümler kümesi  $D$  elde edilmektedir. Başlangıç domine edilemeyen çözümler kümesi  $D^{(0)}$ , Bölüm 4.1'de açıklanan kurucu matsezsizelden alınan çoklu koşturum ile oluşturulmaktadır. Her iterasyonda, rasgele bir  $s$  çözümü temel çözüm olarak  $D$  kümesinden (veya çeşitlilik oluşturmak adına domine çözümlerin bulunduğu  $D^{(d)}$  kümesinden seçilmektedir. Algoritma, seçilen  $s$  çözümü üzerinde, aşağıda tanımlanan dört farklı komşuluk için karıştırma yolu ile her komşuluktan  $b$  tane olmak üzere komşu çözümler üretir:

- *Ekip içinde takas* ( $N_1$ ) komşuluğu ile aynı ekipte bulunan iki işin rotadaki konumları değiştirilir.
- *Değiştirme* ( $N_2$ ) komşuluğu ile ekipteki işlerden birinin konumu aynı rota içerisinde değiştirilir.
- *Ekipler arası takas* ( $N_3$ ) komşuluğunda, iki farklı ekipten iki farklı iş seçilir. Eğer yetenek gereksinimleri iki iş için de sağlanıyorsa, işlerin yerleri değiştirilir.

- *Ekleme* ( $N_4$ ) komşuluğu ile atanamayan işlerden bir tanesi yetenek uyumu ve zaman bazlı olurluluğuna bakılarak uygun bir ekibe eklenir.

Bu adımlara ek olarak,  $\gamma$  iterasyonda bir *yeniden takım kurma* aşaması algoritma tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu aşamada, teknisyenler ekiplere üç adımda yeniden atanmaktadır. İlk adımda, ekiplerdeki tüm teknisyenler, ekip-iş ataması değiştirilmeden ekiplerden kaldırılır. İkinci adımda, bütün ekipler için yetenek gereksinimlerine uygun olarak yeniden teknisyen ataması yapılır. Bu atamada kullanılan matematiksel modelin amacı  $\sum_{m \in M} \sum_{k \in K} Z_{mk}$  ifadesini en küçüklemeektir.  $Z_{mk}$  teknisyen-ekip ataması ikili karar değişkeni kullanılan modelde, (11) numaralı kısıt ve (20) numaralı kısıt dikkate alınmıştır. Üçüncü ve son adımda, atanamayan işler ve boşta kalan teknisyenler tek bir kümeye atanır; bu küme için Bölüm 4.1.2’de anlatılan iş-teknisyen-ekip atama modeli çalıştırılır. Bu model sonucunda yeni ekipler oluşturulursa, bu ekiplerin rotaları oluşturulur. Oluşturulan yeni çözüm,  $s$  çözümünün yeni bir komşuluğu olarak kabul edilir.

Algoritmanın tüm iterasyonları için,  $s$  temel çözümünün komşuları üç farklı sınıfa ait olabilir: (i)  $D$  kümesindeki herhangi bir çözüm tarafından domine edilen komşu çözümler, (ii)  $D$  kümesindeki bazı çözümler tarafından domine edilen ancak bazı çözümlerin domine edemediği çözümler, (iii)  $D$  kümesindeki tüm çözümleri domine eden çözümler. Temel çözüm  $s$  ve  $s$  çözüm kümesi  $D$ , bulunan komşu çözümlerle şu şekilde güncellenir: Komşuluk arama sırasında, (i) numaralı sınıftaki çözümlerin  $s$  veya  $D$  üzerinde bir etkisi olmaz, fakat bu çözümler çeşitlilik oluşturmak amacıyla  $D^{(d)}$  kümesine atanır. Eğer çözüm  $s'$  (ii) numaralı sınıfta ise,  $s'$   $D$  kümesine eklenir ve bu çözüm tarafından domine edilen çözümler aynı kümeden çıkartılır. Eğer çözüm  $s'$  (iii) numaralı sınıfta ise,  $D$  kümesindeki bütün çözümler silinir ve  $s'$  kümeye eklenir. Eğer, herhangi bir iterasyonda tüm komşuluklar incelenir ve (iii) numaralı sınıfta bir çözüm bulunamazsa temel çözüm  $s$ ,  $D$  kümesinden seçilecek rasgele bir çözüm veya, eğer boş değilse,  $p^{(d)}$  olasılık ile  $D^{(d)}$  kümesinden seçilecek bir çözüme eşitlenir ve algoritma sonraki iterasyon ile devam eder. Algoritma durma koşulları sağlanana kadar tekrarlanır. Bu algoritma için sözde kod, Algoritma 3’te verilmiştir.

---

### **Algoritma 3 Çok Amaçlı Değişken Komşuluk Arama Algoritması**

---

**Girdiler**  $D^{(0)}$ : Başlangıç domine edilmeyen çözümler kümesi

---

---

```

1:  $D \leftarrow \{D^{(0)}\}$ 
2:  $D^{(d)} \leftarrow \emptyset$ 
3:  $iter \leftarrow 1$ 
4: while durma koşulları sağlanmadığı sürece do
5:    $s \leftarrow \{s^R\}$  //  $D$  kümesinden veya boş değilse  $p^{(d)}$  olasılık ile  $D^{(d)}$  rasgele bir  $s^R$ 
   çözümü seç.
6:    $D^{(d)} \leftarrow \emptyset$ 
7:   for  $k = 1, \dots, 4b + 1$  do
8:      $\alpha \leftarrow \left\lfloor \frac{k}{b} \right\rfloor$  // komşuluk göstergesi
9:     if  $\alpha \leq 4$  then
10:       Karıştırma:  $s'$  çözümünden rasgele bir komşu çözüm ( $N_\alpha(s)$ ) üret.
11:     else if  $iter \% \gamma = 0$  then
12:        $s' \leftarrow$  yeniden takım kurma adımını  $s$  çözümüne uygula
13:     else
14:       break
15:     end if
16:     if  $s'$  çözümü (i) komşuluk sınıfında ise then //  $s' \in D$  kümesinden en az bir
    sonuç tarafından domine ediliyorsa
17:        $D^{(d)} \leftarrow D^{(d)} \cup \{s'\}$ 
18:     else if  $s'$  çözümü (ii) komşuluk sınıfında ise then //  $s' \in D$  kümesindeki bazı
    sonuçları domine ediyorsa
19:        $s'$  tarafından domine edilen tüm sonuçları  $D$  kümesinden çıkar
20:        $D \leftarrow D \cup \{s'\}$ 
21:     else //  $s'$  çözümü  $D$  kümesindeki bütün sonuçları domine ediyorsa
22:        $D \leftarrow \{s'\}$ 
23:        $s \leftarrow s'$ 
24:       4. satıra dön
25:     end if
26:   end for
27:    $iter \leftarrow iter + 1$ 
28: end while

```

**Çıktılar:**  $D$ : Pareto sınırına yaklaşım

---



## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLAR

Önerilen çözüm yönteminin etkinliği iki farklı veri seti için deneysel çalışmalar yapılarak test edilmiştir. İlk veri seti, literatürdeki örnek verilerden türetilmiştir. İkinci veri seti ise, bir enerji dağıtım şirketinin günlük olarak ele aldığı problemden gerçek verileri içerir. Bu veri setlerinin özellikleri Bölüm 5.1’de anlatılacaktır.

Deneysel çalışmalar ve sonuçlar sunulurken, öncelikle önerilen sezgisel yöntemin matematiksel model ile karşılaştırması Bölüm 5.2’de yapılmıştır. Bölüm 5.3’te, uyguladığımız çok amaçlı değişken komşuluk arama metodunun yöntemin performansı üzerindeki etkileri verilirken, Bölüm 5.4’te ise ekip oluşturma kararının problem ve veri seti üzerindeki etkileri gösterilmiştir.

Önerilen matematiksel model ve sezgisel yöntemde kullanılan matematiksel modeller, CPLEX 12.6.2 kullanılarak çözülmüştür.  $\epsilon$ -kısıt yöntemi kullanılırken, her bir karma tamsayılı programlama modeli için zaman sınırı 2 saat olarak belirlenmiştir. Matsezgiselde bulunan teknisyen-küme atama ve iş-teknisyen-ekip matematiksel modelleri için ise 15 dakikalık zaman sınırı veya %1’lik bir optimale yakınlık seviyesi (gap) limiti belirlenmiştir. Önerilen matsezgisel ve çok amaçlı değişken komşuluk arama yöntemi Java programlama dilinde Eclipse IDE platformunda kodlanmıştır. Koşturemların hepsi, Intel ® Core™ i7-6500U 2.5 GHz işlemci ve 12 GB RAM özelliğine sahip Windows 10 işletim sistemine sahip bilgisayardan alınmıştır. Önerilen sezgisel yöntem için her koşturem on kez tekrarlanmıştır ve baskın olmayan çözüm kümesi on farklı koşturemun sonuçları göz önünde bulundurularak sunulmuştur.

Dört aşamalı matsezgiselin kümeleme adımında, coğrafi konum ve yetenek gereksinimi için benzerlik; termin zamanı ve ağırlık boyutları için farklılık düşünülerek bir kümeleme yapılmıştır. Bu adımda her boyuta bir ağırlık atanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda ağırlıklar, literatürden türetilen veri setinde coğrafi konum, yetenek gereksinimi ve termin zamanı için sırasıyla 0.4, 0.5 ve 0.1;

gerçekçi veri setinde ise coğrafi konum, yetenek gereksinimi, termin zamanı ve ağırlık için sırasıyla 0.4, 0.45, 0.05 ve 0.1 olarak belirlenmiştir. Literatürden türetilen veri setlerinde önceliklerden oluşan ağırlıklar bulunmadığı için, yalnızca üç boyut göz önünde bulundurulmuştur. Buna ek olarak, başlangıç kümelerini oluşturmak için iki farklı metod önerilmiştir. Rasgele küme merkezi seçme metodu ile belirlenen sayıdaki kümeler için işler içinden rasgele küme merkezleri atanırken ve kümelere rasgele iş atama stratejisinde ise belirli sayıdaki kümeye eldeki işler sayıca eşit olarak rasgele dağıtılır. Anlatılan iki stratejiden rasgele küme merkezi seçme, yapılan deneysel çalışmalar sonucunda tercih edilmiştir.

Çok amaçlı değişken komşuluk arama algoritmasında 5 farklı parametre kullanılmaktadır: iterasyon sayısı ( $v_1$ ), iyileşme göstermeyen iterasyon sayısı ( $v_2$ ), her iterasyonda elde edilen komşu çözüm sayısı ( $b$ ), farklılaştırma olasılığı ( $p^{(d)}$ ) ve yeniden takım kurma adımının sıklığı (her  $\gamma$  iterasyonda bir). Örnek koşuturmlar sonucunda bu parametreler:  $v_1 = 10000$ ,  $v_2 = 1000$ ,  $b = 4$ ,  $p^{(d)} = 0,1$  ve  $\gamma = 200$  olarak belirlenmiştir.

## 5.1 Veri Setleri

İlk veri seti, literatürde sıklıkla kullanılan zaman pencereli araç rotalama örneklerinden (Solomon, 1987) türetilmiş bir veri setinden (Kovacs ve diğ.,2012) oluşturulmuştur. Bu setteki örnekler, işlerin coğrafi konum dağılımlarına göre üç farklı sınıftan oluşmaktadır: rasgele (R), kümelenmiş (C) ve rasgele kümelenmiş (RC). Bahsedilen veri setinde ekipli ve ekipli olmayan olmak üzere iki farklı versiyon bulunmaktadır. Problem tanımımıza uygun olarak, ekipli versiyondaki örnekler kullanılmıştır. Veri setinde bulunan tüm örneklerde 90 adet teknisyen bulunmaktadır. Örnekler planlama ufuklarına göre de farklılık göstermektedir. Örnek adındaki ilk sayı, planlama ufkunun genişliğini göstermektedir; 1 ile başlayan örnekler kısa planlama ufkuna, 2 ile başlayan örnekler ise uzun planlama ufkuna sahiptirler. Örnek adındaki son iki basamak ise, örnekte bulunan işlerin zaman penceresinin sıklığını temsil etmektedir. 01 ve 03 sırasıyla işlerin tamamının veya yarısının zaman penceresine sahip olduğunu temsil etmektedir. Kovacs ve diğ. (2012) veri setinde işlerin ağırlıkları bulunmamaktadır, bu nedenle bütün işlere ağırlık olarak 1 atanmıştır. Ek olarak, işlerin termin zamanları günlük mesai saati olarak kabul edilen 8 saate göre normalize edilmiştir. Bahsedilen

veri setindeki bütün örneklerde 100 iş, 5 farklı yetenek ve her yetenek için 4 adet yetenek seviyesi bulunmaktadır, yani  $Q$  kümesinde toplamda 20 yetenek bulunmaktadır. Veri setindeki her  $i$  işi için, dış kaynak kullanım maliyeti Kovacs ve diğ. (2012) tarafından  $\tau + \beta_i$  kullanılarak hesaplanmıştır. Burada,  $\tau$  günlük vardiya süresine eşitken,  $\beta_i$   $i$  işini gerçekleştirmek için gereken yetenek sayısının toplamı ile belirlenen işin zorluğuna eşittir.

İkinci veri seti, bir enerji dağıtım şirketinin gerçekçi verilerinden elde edilmiştir. Veri setindeki örnekler, Türkiye'deki farklı coğrafi bölgelerden toplanan verilere dayanmaktadır. Bu nedenle her bir örnek için farklı teknisyenler ve işler bulunmaktadır, bu örneklerin ortak özelliği ortak 5 farklı yeteneğe sahip olmalarıdır. Çizelge 5.1'de her örnek için teknisyen sayısı  $|M|$ , iş sayısı  $|N|$  ve bu sayıların oranı  $|N|/|M|$  verilmiştir. Her işin önceliklerine göre belirlenmiş ağırlığı ve zaman penceresi bulunmaktadır. İşlerin konumları enlem ve boylam cinsinden verilmiştir, bu nedenle işler arasındaki uzaklığın hesaplanmasında literatürde kullanılan Haversine formülü kullanılmıştır (Veness, 2018). Veri setindeki örnekler benzer coğrafi konumlara göre ayrıldığı için, ekiplerin seyahat hızı, şehir içi hızı düşünülerek saatte 30 km olarak belirlenmiştir. Bütün işler ve ekipler için planlama ufku, vardiya süresine yani 8 saate eşittir.

Çizelge 5.1 : Gerçekçi veri setindeki örnekler için iş ve teknisyen sayıları.

Örnek	RI1	RI2	RI3	RI4	RI5	RI6	RI7	RI8
$ N $	161	60	57	118	52	384	110	190
$ M $	46	26	18	38	21	90	33	30
$ N / M $	3.50	2.31	3.16	3.11	2.48	4.27	3.33	6.33

## 5.2 Önerilen Sezgisel Yöntemin Çözüm Kalitesinin Değerlendirilmesi

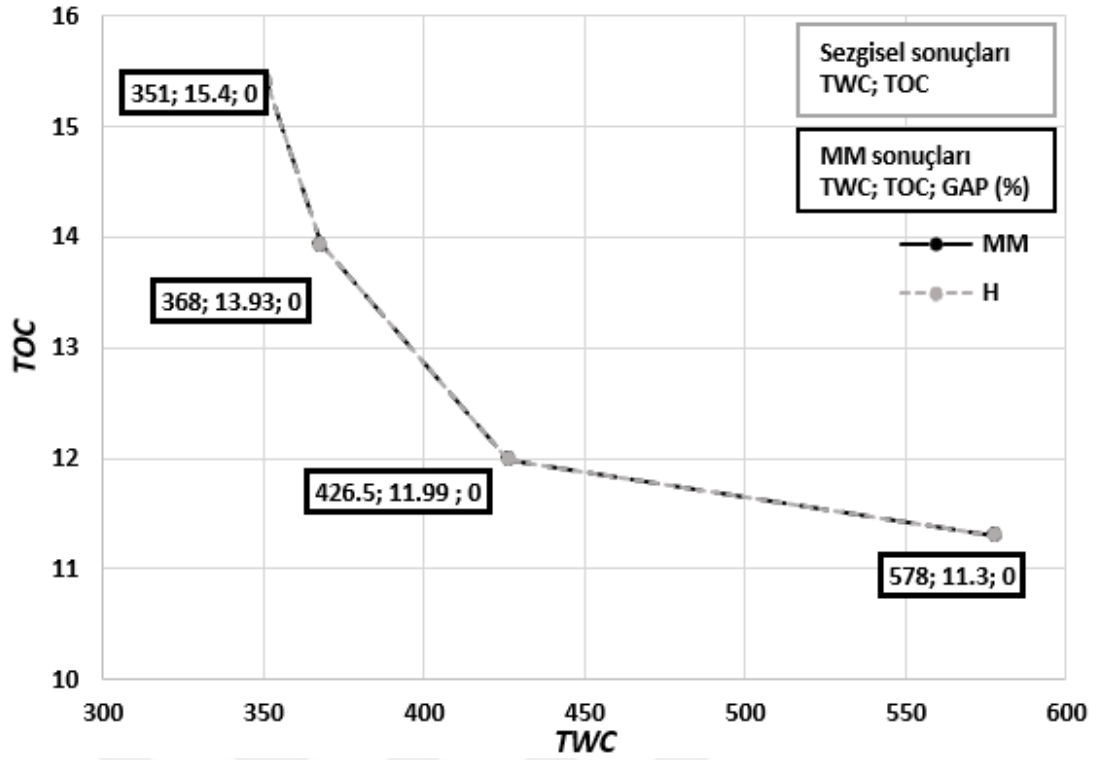
Önerilen çok amaçlı değişken komşuluk arama sezgiselinin performansını ölçmek için,  $\epsilon$ -kısıt yöntemi ile dört adet küçük boyutlu gerçekçi örnekten sonuç alınmıştır. Bu örneklerde 5 tane teknisyen ve 5 ve 10 arasında değişen sayıda iş bulunmaktadır. Her bir örnekte, sezgiselin on farklı koşturum için toplam koşturum süresi bir dakikanın

altındadır.  $\epsilon$ -kısıt metodunda  $\delta$ ,  $(TOC^- - TOC^+)/4$  olarak kabul edilmiş olup, her bir koşturum için iki saatlik zaman sınırı belirlenmiştir. Bu metod için toplam koşturum süresi 10 saat olarak hesaplanmıştır.

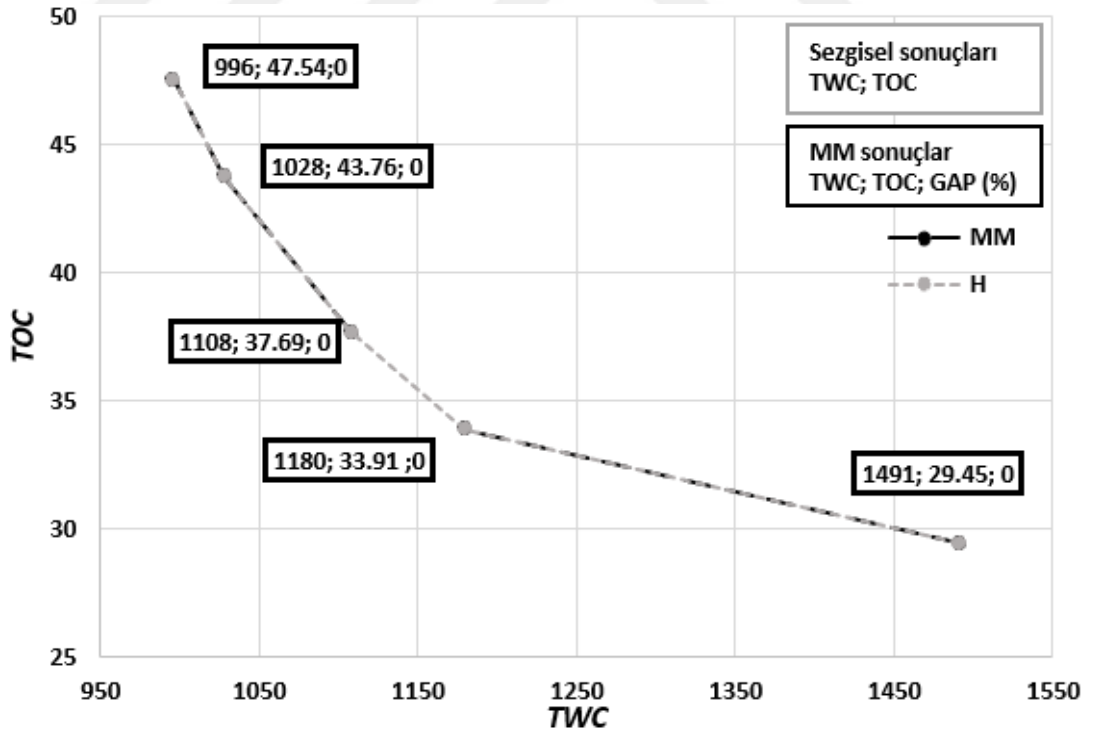
İki yöntem için de en iyi domine edilmeyen sonuçlar Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te verilmiştir. Şekillerde, matematiksel model (MM) sonuçları siyah kesikli çizgi ile, sezgisel sonuçları ise (MOVNS) gri kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Her MM ve MOVNS sonucu için, toplam ağırlıklı tamamlanma zamanı ( $TWC$ ) ve toplam operasyonel maliyetler ( $TOC$ ) kutunun içinde belirtilmiştir. Matematiksel model sonuçları için, optimale yakınlık seviyesi ( $GAP$  (%)) de raporlanmıştır. İki yöntem için de ortak olarak elde edilen sonuçlar, koyu renkli çerçeve ile işaretlenmiştir.

5 iş-5 teknisyene sahip iki örnek veri seti ve 10 iş-5 teknisyene sahip ilk örnek için, matematiksel model verilen zaman limiti içerisinde optimal Pareto sınırını bulmayı başarmıştır. Önerilen sezgisel yöntem, 5 iş-5 teknisyenli örnekler için (Şekil 5.1 ve Şekil 5.2), matematiksel modelin bulunduğu tüm optimal sonuçları 3 saniyede bulmuştur. 10 iş-5 teknisyenli örneklerden ilki için (Şekil 5.3), önerilen sezgisel yöntem matematiksel modelin bulunduğu 5 domine edilmeyen sonuçtan 4 tanesini 6 saniyelik koşturum süresi ile bulmuştur.

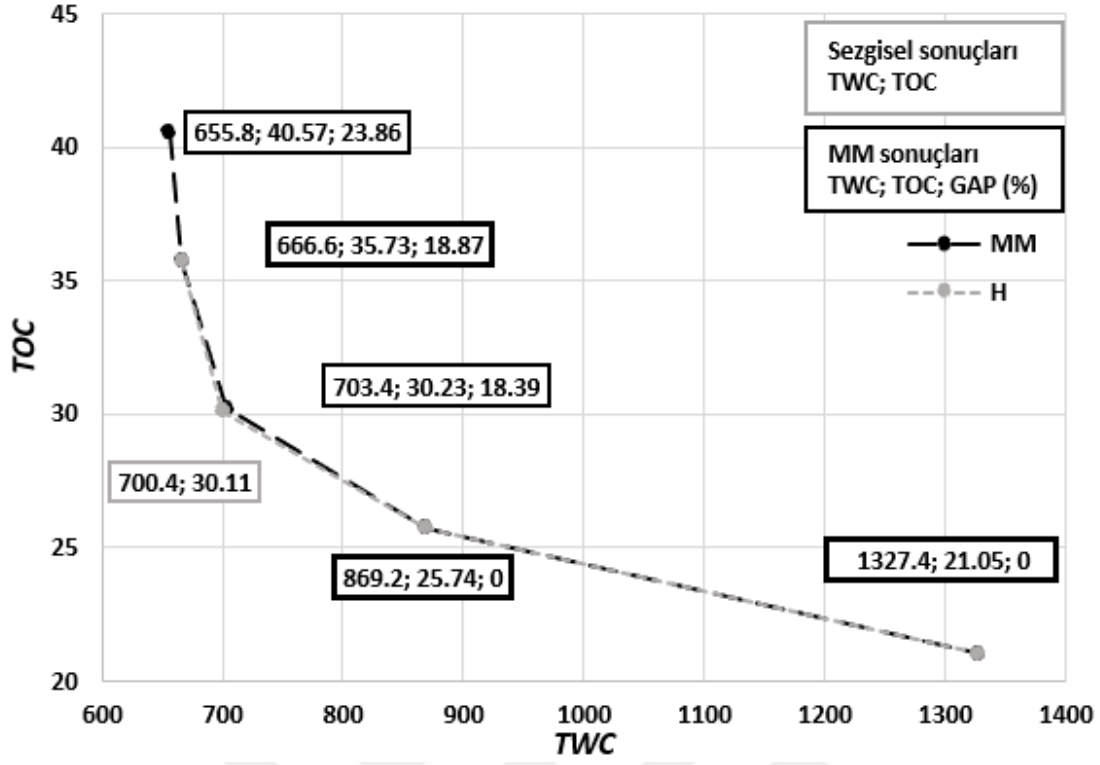
10 iş-5 teknisyene sahip ikinci veri setinde (Şekil 5.4), matematiksel model 10 saatlik koşturumlar bütünü sonucunda Pareto sınırını sağlayamamıştır. Önerilen sezgisel yöntem ile 6 saniyelik koşturumlar sonucunda bu sınıra yaklaşık bir Pareto sınırı bulunmuştur. Sezgisel yöntem ile bulunan sonuçlardan 2 tanesi matematiksel model sonuçları ile ortak iken, bir tanesi de Pareto sınırında bulunmuştur. Sezgisel yöntem sonuçlarından bir tanesi matematiksel model sonuçlarından yüzde %18'lik bir  $GAP$ 'e sahip olan bir sonucu domine etmiştir. Alınan sonuçlar göstermiştir ki, matematiksel model sezgisel yöntem ile karşılaştırıldığında 10 işlik küçük örnekler için bile kullanışlı değildir. Matematiksel model 15 işlik örnekler için çalıştırıldığında, belirlenen zaman sınırında Pareto sınırının bazı bölümleri için olurlu sonuç bile verememektedir. Olurlu sonuç alınan bölümlerde ise optimale yakınlık sınırı %95'in altına düşmemektedir. Bu nedenle matematiksel model ile istenilen sürede ve istenilen kalitede sonuç alınamayacağı görülmüştür.



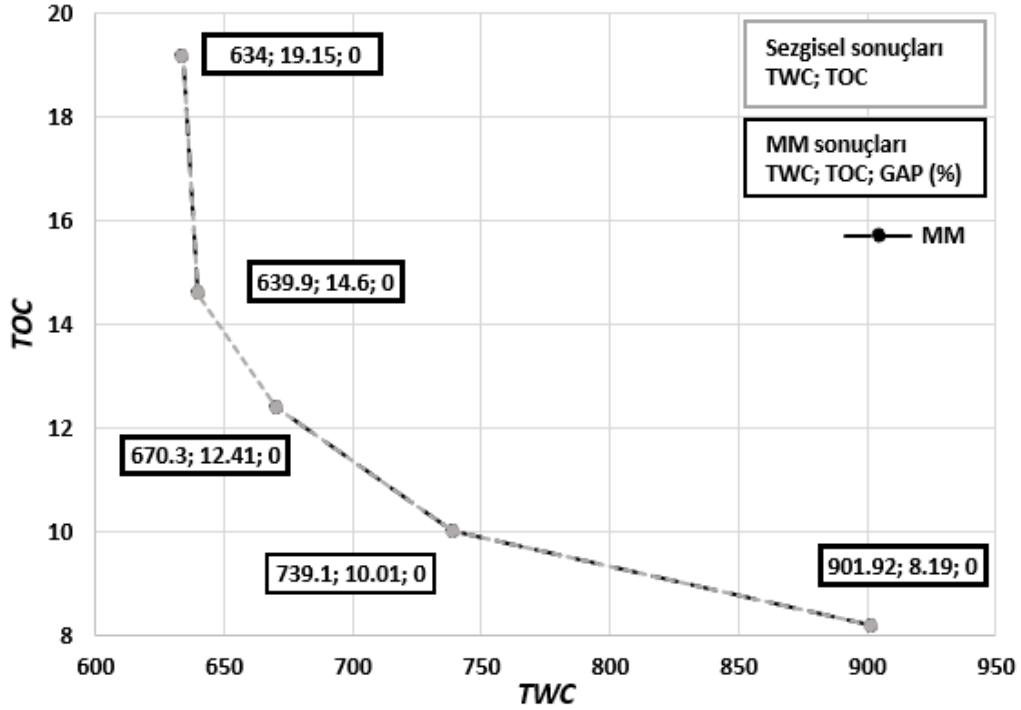
Şekil 5.1 : 5 iş-5 teknisyenlik ilk veri seti için koşturum sonuçları.



Şekil 5.2 : 5 iş-5 teknisyenlik ikinci veri seti için koşturum sonuçları.



Şekil 5.3 : 10 iş-5 teknisyenlik ilk veri seti için koşturum sonuçları.



Şekil 5.4 : 10 iş-5 teknisyenlik ikinci veri seti için koşturum sonuçları.

### 5.3 Çok Amaçlı Değişken Komşuluk Arama Metodunun Çözüm Kalitesi Üzerindeki Etkisinin Değerlendirilmesi

Önerilen iki aşamalı çözüm yaklaşımı, ilk aşamasında domine edilmeyen çözümler kümesini, birden fazla kurucu algoritma koşturumu sonucunda elde etmektedir. Sonrasında, çok amaçlı değişken komşuluk metodu ile başlangıç çözüm setini geliştirerek, Pareto sınırına yaklaşık bir çözüm seti bulmaktadır. İkinci aşamada önerilen değişken komşuluk arama metodunun performansı, iki farklı veri seti ile ve tanımlanan iki amaç fonksiyonu kullanılarak ölçülmüştür. 10 koşturumdan alınan çözüm seti sonuçlarından 3 çözüm seçilmiştir. Bu çözümler, Pareto sınırının uç noktalarını ve orta noktasını temsil etmektedir. Çizelge 2 ve Çizelge 3'te, sırasıyla literatürden türetilen veri seti ve gerçekçi veri seti için sonuçlar bulunmaktadır. İki tabloda da iki amaç fonksiyonu için, kurucu algoritma ve değişken komşuluk arama algoritması için elde edilen sonuçlar ve yüzde olarak elde edilen iyileştirme oranı verilmiştir. Ayrıca, iki aşama için de ayrı ayrı koşturum zamanları tablolarda belirtilmiştir. Ek olarak, her örnek ve amaç fonksiyonu için, amaç fonksiyonlarının ideal ve nadir noktaları arasındaki mutlak fark yüzde olarak verilmiştir, böylelikle amaç fonksiyonları arasındaki değiş tokuş gösterilmiştir.

Çizelge 5.2'de verilen literatürden türetilmiş veri seti sonuçlarında, değişken komşuluk arama sezgiselinin *TWC* amaç fonksiyonu için ortalama olarak %20.18'lik ve en az %10.64'lük bir iyileştirme sağladığı görülmüştür. Öte yandan *TOC* amaç fonksiyonunda en az iyileştirme oranı %8.64 ve ortalama iyileştirme oranı ise %47.06'dır. İyileştirme sonuçlarına bakıldığında, kurucu matsezigisel algoritmanın kümelenmiş ve tüm işleri zaman penceresine sahip örnekler için daha iyi bir başlangıç çözümü verdiği görülmektedir. Bu örnekler için iki amaç fonksiyonundaki iyileştirme oranları, diğer örneklerle kıyasla daha düşüktür. İyileştirme oranı en fazla, R103 örneğinde görülmüş olup, iki amaç fonksiyonu da en az %31 oranında iyileştirilmiştir. Veri setindeki her örnek için toplam koşturum süresi 10 koşturum için; kurucu sezgiselde 2.5 dakika, değişken komşuluk arama metodunda ise 1.5 dakikanın altındadır.

Çizelge 5.3'te, gerçekçi veri seti için sonuçlar sunulmuştur. Önerilen değişken komşuluk arama algoritması, kurucu sezgisel üzerinde *TWC* ve *TOC* amaç

fonksiyonları için sırasıyla ortalama %41.48 ve %68.05'lik iyileştirme sağlamıştır. En az iyileştirmenin gerçekleştiği örnek olan RI8, iş sayısının teknisyen sayısına oranının en yüksek olduğu örnektir. RI1 ve RI6 örneklerinde ise, iş sayısının yüksek olması koşturum zamanlarının diğer örneklere kıyasla daha yüksek olmasına neden olmuştur. Koşturum zamanının artmasında, matsezigiselde kullanılan matematiksel modellerin etkisi olmaktadır. Diğer yandan, daha az iş sayısı olan örnekler için değişken komşuluk arama sezgiseli 2.5 dakikadan daha az sürede sonuç üretmiştir.

İki amaç fonksiyonunun ideal ve nadir noktaları arasındaki mutlak fark; literatürden türetilen örneklerde 12 tanesinden 2 tanesinde, gerçekçi veri setinin örneklerinden ise 8 tanesinden 4 tanesinde %5'in altındadır. Bu örnekler için, Pareto sınırı kavisli bir biçim yerine kısa ve düz bir şekil almaktadır. Ancak başka örneklerde bu fark, *TWC* ve *TOC* amaç fonksiyonları için literatürden türetilen veri setlerinde sırasıyla %27.03 ve %31.82'ye, gerçekçi veri setinde ise sırasıyla %11.48 ve %19.16'ya ulaşmaktadır. Bu sonuçlar, iki amaç fonksiyonu arasındaki değiş tokuşun önemini göstermektedir.

#### **5.4 Ekip Oluşturma Kararının Analizi**

Servis sektöründe bulunan bazı şirketler, işlerini yapacak ekipleri önceden kurup belirli bir süre için sabitleme üzerine bir politika izlemektedir. Böyle durumlarda, ekipler halihazırda var oldukları için, işgücü çizelgeleme ve rotalama problemi için ekip oluşturma kararı göz önünde bulundurulmamaktadır. Bu bölümde, ekip oluşturma kararının problem üzerindeki etkileri incelenecektir. Eldeki ekiplerin algoritmada kullanılabilmesi için, Bölüm 4.1.2'de sunulan teknisyen-küme ataması modeli algoritmadan çıkartılmıştır ve algoritmada sabit ekipler kullanılmıştır.

Önerilen sezgisel yöntemin ekip oluşturma ve sabit ekipleri kullanma versiyonlarının her ikisi de gerçekçi veri setleri üzerinde test edilmiştir. Sabit olarak alınan ekipler, şirket tarafından oluşturulmuş ve halihazırda kullanılan ekiplerdir. Çizelge 5.4'te, iki versiyon için de çok amaçlı değişken komşuluk arama metodundan elde edilen üç farklı sonuç verilmiştir, bu sonuçlar Pareto sınırının iki uç noktasını ve orta noktasını temsil etmektedir. Tabloda ekip sayıları ( $|K|$ ), atanamayan iş sayıları ( $|N^{(u)}|$ ) ve iki amaç fonksiyonu için (*TWC*, *TOC*) değerler verilmiştir. Ekip oluşturmaya içeren asıl algoritma sonuçları için ise ek olarak atanamayan teknisyen sayıları da ( $|M^{(u)}|$ )



tabloda verilmektedir. Son olarak, ekipleri yeniden kurarak elde edilen iyileştirme için iki amaç fonksiyonu da düşünülerek yüzde iyileştirme değerleri raporlanmıştır.

Çizelge 5.4'te elde edilen sonuçlarda, veri setindeki tüm örnekler için oluşturulan ekipler ve ekiplerin yapısı eldeki ekiplerden farklılık göstermektedir. Önerilen sezgisel yöntemle kurulan ekipler, atanamayan iş sayısında en az 15 işlik bir azalış sağlamaktadır. RI8 örneğinde, diğer örneklerden daha fazla atanamayan iş bulunması yetersiz iş gücü kapasitesi ve yetenek gereksinimini karşılayan teknisyen sayısının azlığından kaynaklanmaktadır. RI5 örneğinin ilk koşturumu haricindeki bütün örneklerde, atanamayan teknisyen sayısının pozitif olduğu görülmektedir. Bu durum ekip oluşturma kararı ile daha az teknisyen kullanılarak ekipler oluşturulabildiğini göstermektedir. Buna ek olarak, atanamayan iş sayısındaki belirgin düşüş ve ekiplerin daha etkili kurulması ile, *TWC* ve *TOC* amaç fonksiyonlarında önemli bir iyileştirme sağlamıştır. Bu sonuçlar, ekip oluşturma kararının iş gücü çizelgeleme ve rotalama probleminde ele alınması gereken bir karar olduğunun ve yetenek gereksinimleri nedeniyle birden fazla personel ile işlerin gerçekleştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Çizelge 5.2: Literatüreden türetilen veri seti için kurucu matsezigisel ve çok amaçlı değişken komşuluk arama yöntemi sonuçları.

Örnek	TWC				TOC				CPU (s)	
	I	II	İyi.(%)	Δ(%)	I	II	İyi.(%)	Δ(%)	I	II
R101	19094	14198	25.64	6.76	7351	2604	64.58	19.08	80	50
	19094	14158	25.85		7351	2614	64.44			
	15832	13238	16.38		5907	3218	45.52			
R103	26634	18280	31.37	25.81	7411	2474	66.62	23.12	100	70
	26634	17888	32.84		7411	2492	66.37			
	16620	13562	18.40		3528	3218	8.79			
R201	20896	15594	25.37	10.30	9764	2792	71.41	12.75	120	40
	20896	15252	27.01		9764	2832	71.00			
	17757	13988	21.23		7252	3200	55.87			
R203	19020	14056	26.10	0.41	4428	2246	49.28	2.18	110	30
	19020	14012	26.33		4428	2286	48.37			
	19020	13998	26.40		4428	2296	48.15			
C101	21201	15887	25.06	2.81	9802	2884	70.58	13.29	130	50
	19416	15291	21.25		9080	3342	63.19			
	19416	15441	20.47		9080	3326	63.37			
C103	15235	13337	12.46	0.67	4005	2920	27.09	2.80	110	30
	15235	13307	12.66		4005	2988	25.39			
	15235	13247	13.05		4005	3004	24.99			
C201	14967	12795	14.51	0.30	4097	1820	55.58	0.33	100	60
	14967	12781	14.61		4097	1824	55.48			
	14967	12757	14.77		4097	1826	55.43			
C203	17662	15783	10.64	16.79	3737	2298	38.51	17.81	90	60
	15281	13143	13.99		4262	2782	34.73			
	15281	13133	14.06		4262	2796	34.40			
RC101	18640	15503	16.83	18.15	6105	3058	49.91	12.08	130	50
	16684	13933	16.49		5622	3238	42.40			
	16684	12689	23.95		5622	3478	38.14			
RC103	20840	18280	12.28	27.28	5873	2474	57.88	24.48	110	40
	20840	15045	27.81		5873	3202	45.48			
	16615	13293	19.99		4930	3276	33.55			
RC201	19767	16311	17.48	12.38	8297	3944	52.46	8.58	110	80
	19767	14413	27.09		8297	4282	48.39			
	18165	14291	21.33		7252	4314	40.51			
RC203	21928	18071	17.59	27.03	4598	2936	36.15	31.82	80	40
	16080	13339	17.05		5348	4250	20.53			
	16080	13187	17.99		5348	4306	19.48			

Çizelge 5.3: Gerçekçi veri seti için kurucu matsezigisel ve çok amaçlı değişken komşuluk arama yöntemi sonuçları.

Örnek	TWC				TOC				CPU(s)	
	I	II	İyi. (%)	Δ(%)	I	II	İyi. (%)	Δ(%)	I	II
RI1	26860.87	18809.76	29.97	0.32	4205.22	1272.43	69.74	2.75	780	90
		18750.71	30.19			1295.45	69.19			
		18749.64	30.2			1307.40	68.91			
RI2	13646.28	6247.44	54.22	7.89	2655.50	493.37	81.42	10.27	45	30
	13741.53	5846.25	57.45		2760.52	535.59	80.6			
		5754.31	58.12			544.04	80.29			
RI3	9253.08	5746.92	37.89	9.58	1049.68	191.00	81.80	19.16	72	45
		5636.26	39.09			197.17	81.22			
	8146.77	5196.19	36.22		971.43	227.60	76.57			
RI4	23704.93	13955.70	41.13	11.48	4244.54	1119.37	73.63	2.09	110	60
		12504.52	47.25			1140.30	73.14			
		12353.63	47.89			1142.78	73.08			
RI5	9081.18	4985.75	45.1	10.72	1365.89	297.46	78.22	9.26	80	40
	8703.48	4448.00	48.89		1381.72	325.96	76.41			
		4451.08	76.48			325.00	76.48			
RI6	44663.37	17033.84	61.86	4.45	7409.25	416.93	94.37	1.06	1004	160
		16145.06	63.85			429.83	94.2			
		16275.66	63.56			421.34	94.31			
RI7	22498.07	11242.31	50.03	0.28	4679.38	1493.23	68.09	0.82	90	55
		11220.26	50.13			1500.44	67.94			
		11210.74	50.17			1505.49	67.83			
RI8	33895.72	33625.43	0.80	0.64	5188.70	5049.01	2.69	2.26	360	130
		33447.47	1.32			5054.74	2.58			
		33409.30	1.43			5163.35	0.49			

Çizelge 5.4 Önerilen sezgisel yöntemin ekip oluşturma ve sabit ekipler ile gerçekçi veri seti üzerinden alınan sonuçları.

Örnek	Sabit ekipler ile alınan sonuçlar				Ekip oluşturma kararı ile alınan sonuçlar				TWC iyi. (%)	TOC iyi. (%)	
	K	N <sup>(u)</sup>	TWC	TOC	K	M <sup>(u)</sup>	N <sup>(u)</sup>	TWC			TOC
RI1	22	54	37633.37	6977.62	30	15	1	18809.76	1272.43	50.02	81.76
			37564.24	6988.92	30	15	1	18750.71	1295.45	50.08	81.46
			37494.54	6994.96	30	15	1	18749.64	1307.40	49.99	81.30
RI2	9	18	12731.29	2492.22	9	15	0	6247.44	493.37	50.92	80.20
			12541.84	2554.58	9	15	0	5846.25	535.59	53.38	79.03
			12513.53	2564.74	9	15	0	5754.31	544.04	54.02	78.79
RI3	7	19	11818.99	2260.18	9	7	0	5746.92	191.00	51.38	91.55
			11817.95	2260.51	9	7	0	5636.26	197.17	52.31	91.28
			11817.92	2260.92	10	7	0	5196.19	227.60	56.03	89.93
RI4	15	40	25672.96	5219.72	24	11	1	13955.70	1119.37	45.19	78.61
			25553.04	5226.62	25	11	1	12504.52	1140.30	51.29	78.15
			25460.19	5219.72	25	11	1	12353.63	1142.78	51.65	78.14
RI5	9	16	11030.42	1926.40	12	0	1	4985.75	297.46	54.56	84.64
			10981.84	1929.43	13	3	1	4448.00	325.96	59.68	83.08
			10979.15	1936.52	13	3	1	4451.08	325.00	59.47	83.16
RI6	44	69	44344.38	8146.48	52	25	0	17033.84	416.93	61.55	94.88
			44297.94	8147.42	54	24	0	16145.06	429.83	63.54	94.73
			44277.83	8152.01	54	24	0	16275.66	421.34	63.30	94.83
RI7	15	37	23040.12	5073.34	20	5	3	11242.31	1493.23	51.21	70.57
			22956.93	5086.40	20	5	3	11220.26	1500.44	51.12	70.50
			22956.01	5108.71	20	5	3	11210.74	1505.49	51.16	70.53
RI8	11	84	45241.61	9579.99	22	4	42	33625.43	5049.01	25.65	47.31
			45229.80	9581.81	22	4	42	33447.47	5054.74	26.05	47.25
			45225.81	9579.99	22	4	42	33409.30	5163.35	26.15	46.10

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, bir enerji dağıtım şirketinin günlük olarak karşılaştığı bir problem olan iş gücü çizelgeleme ve rotalama problemi ele alınmıştır. Probleme göz önünde bulundurulmuş kararlar arasında ekip oluşturma, iş çizelgeleme ve rotalama problemleri bulunmaktadır. Toplam ağırlıklı tamamlanma zamanı ve toplam operasyonel maliyetlerin en küçüklenmesi gibi iki farklı ve çelişen amaç fonksiyonlarının varlığı, probleme çok amaçlı bir optimizasyon yaklaşımı sunulmasına sebep olmuştur.

Problemin çözümü için öncelikle bir matematiksel model önerilmiştir. Bu modelde  $\epsilon$ -kısıt metodu kullanılarak kesin Pareto sınırının belirlenmesi hedeflenmiştir. Problem boyutu büyüdükçe matematiksel modelin kabul edilebilir sürede ve istenilen kalitede sonuçlar vermediği görülmüştür. Bu nedenle matematiksel modele ek olarak, işlerin benzerlik ve farklılıklarının göz önünde bulundurulduğu bir kümeleme algoritması içeren, sayısal olarak etkili çok aşamalı bir sezgisel çözüm yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem, kurucu bir matsezgisel ve çok amaçlı indirgenmiş bir değişken komşuluk arama metodunu içermektedir. Deneysel çalışmalar sonucunda, önerilen sezgisel yöntemin az miktarda sayısal efor kullanılarak yüksek kalitede çözümler üretebildiği gözlemlenmiştir. Özellikle, kurucu matsezgiselden alınan sonuçların önerilen değişken komşuluk arama sezgiseli ile önemli ölçüde iyileştirilebildiği görülmüştür.

Ekip oluşturma kararının problem kapsamında ele alınmasının problemi daha zorlu hale getirmiştir. Diğer yandan, bu kararın göz önünde bulundurulması, şirketlere özgürlük ve iyileştirme fırsatı tanımaktadır. Önerilen sezgiselde ekip oluşturma kararı da düşünülmüş olup, şirketin oluşturmuş olduğu ekipler üzerinde hatırı sayılır bir iyileştirme imkânı sağlamıştır.

Bu çalışmadaki problemin motivasyon kaynağını oluşturan yerinde servis hizmetlerinin yanı sıra, çalışmanın sağlık sektörü gibi farklı alanlara uyarlanabileceği görülmüştür. Ayrıca problem literatürde yer alan farklı varsayımlar altında incelenerek farklı çözüm yöntemleri geliştirilebilir.



## KAYNAKLAR

- Allaoua, H., Borne, S., L'etocart, L., & Calvo, R. W. (2013). A matheuristic approach for solving a home health care problem., *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 41, 471-478.
- Almada-Lobo, B., Oliveira, J. F., & Carravilla, M. A. (2008). Production planning and scheduling in the glass container industry: A vns approach. *International Journal of Production Economics*, 114(1), 363 – 375. Special Section on Competitive Advantage through Global Supply Chains.
- Alsheddy, A. & Tsang, E. P. K. (2011). Empowerment scheduling for a field workforce. *Journal of Scheduling*, 14(6), 639–654.
- Anghinolfi, D. & Paolucci, M. (2007). Parallel machine total tardiness scheduling with a new hybrid metaheuristic approach. *Computers & Operations Research*, 34(11), 3471 – 3490.
- Arroyo, J. E. C., dos Santos Ottoni, R., & de Paiva Oliveira, A. (2011). Multi-objective variable neighborhood search algorithms for a single machine scheduling problem with distinct due windows. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 281, 5 – 19. Proceedings of the 2011 Latin American Conference in Informatics (CLEI).
- Bard, J. F., Shao, Y., & Jarrah, A. I. (2014). A sequential grasp for the therapist routing and scheduling problem. *Journal of Scheduling*, 17(2), 109–133.
- Belhaiza, S., Hansen, P., & Laporte, G. (2014). A hybrid variable neighborhood tabu search heuristic for the vehicle routing problem with multiple time windows. *Computers & Operations Research*, 52, 269 – 281. Recent advances in Variable neighborhood search.
- Bostel, N., Dejax, P., Guez, P., & Tricoire, F. (2008). Multiperiod planning and routing on a rolling horizon for field force optimization logistics. In *The vehicle routing problem: latest advances and new challenges*, (pp.503–525). Springer.
- Bradley, P. & Mangasarian, O. (1997). Clustering via concave minimization (mathematical programming technical report 96-03), May 1996. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 9, 368–374.
- Braekers, K., Hartl, R. F., Parragh, S. N., & Tricoire, F. (2016). A bi-objective home care scheduling problem: Analyzing the trade-off between costs and client inconvenience. *European Journal of Operational Research*, 248(2), 428 – 443.
- Bérubé, J.-F., Gendreau, M., & Potvin, J.-Y. (2009). An exact [epsilon]-constraint method for bi-objective combinatorial optimization problems:

Application to the traveling salesman problem with profits. *European Journal of Operational Research*, 194(1), 39–50.

- Castillo-Salazar, J. A., Landa-Silva, D., & Qu, R.** (2016). Workforce scheduling and routing problems: literature survey and computational study. *Annals of Operations Research*, 239(1), 39–67.
- Chankong, V. & Haimes, Y.** (1983). *Multiobjective decision making: theory and methodology*. North-Holland series in system science and engineering. North Holland.
- Chen, X., Thomas, B. W., & Hewitt, M.** (2017). Multi-period technician scheduling with experience-based service times and stochastic customers. *Computers & Operations Research*, 82, 1 – 14.
- Cheng, E. & Rich, J. L.** (1998). A home health care routing and scheduling problem.
- Cordeau, J.-F., Laporte, G., Pasin, F., & Ropke, S.** (2010). Scheduling technicians and tasks in a telecommunications company. *Journal of Scheduling*, 13(4), 393–409.
- de Armas, J. & Melián-Batista, B.** (2015). Variable neighborhood search for a dynamic rich vehicle routing problem with time windows. *Computers & Industrial Engineering*, 85, 120 – 131.
- Firat, M. & Hurkens, C.** (2012). An improved mip-based approach for a multi-skill workforce scheduling problem. *Journal of Scheduling*, 15(3), 363–380.
- Fikar, C. & Hirsch, P.** (2017). Home health care routing and scheduling: A review. *Computers & Operations Research*, 77, 86–95.
- Geiger, M. J.** (2008). Randomised variable neighbourhood search for multi objective optimisation. *CoRR*, abs/0809.0271.
- Goel, A. & Meisel, F.** (2013). Workforce routing and scheduling for electricity network maintenance with downtime minimization. *European Journal of Operational Research*, 231 (1), 210-228.
- Hansen, P. & Mladenović, N.** (2001). J-means: a new local search heuristic for minimum sum of squares clustering. *Pattern Recognition*, 34 (2), 405-413.
- Hiermann, G., Prandtstetter, M., Rendl, A., Puchinger, J., & Raidl, G. R.** (2015). Metaheuristics for solving a multimodal home-healthcare scheduling problem. *Central European Journal of Operations Research*, 23 (1), 89-113.
- Hindle, T., Hindle, A., & Spollen, M.** (2000). Resource allocation modelling for home-based health and social care services in areas having differential population density levels: a case study in northern ireland. *Health services management research*, 13 (3), 164-169.
- Jones, D., Mirrazavi, S., & Tamiz, M.** (2002). Multi-objective meta-heuristics: An overview of the current state-of-the-art. *European Journal of Operational Research*, 137 (1), 1-9.



- Julien Soler, Laurent Gaubert, F. T. & Buche, C.** (2013). Data clustering and similarity. In *26th International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference*, (pp. 492-495). St. Pete Beach, Florida.
- Karp, R. M.** (1972). Reducibility among combinatorial problems. In *Complexity of computer computations* (pp. 85-103). Springer.
- Koontz, W. L. G., Narendra, P. M., & Fukunaga, K.** (1975). A branch and bound clustering algorithm. *IEEE Transactions on Computers*, C-24 (9), 908-915.
- Kovacs, A. A., Parragh, S. N., Doerner, K. F., & Hartl, R. F.** (2012). Adaptive large neighborhood search for service technician routing and scheduling problems. *Journal of scheduling*, 15 (5), 579-600.
- Lanzarone, E. & Matta, A.** (2014). Robust nurse-to-patient assignment in home care services to minimize overtimes under continuity of care. *Operations Research for Health Care*, 3 (2), 48-58.
- Lau, H. C. & Gunawan, A.** (2012). The patrol scheduling problem. PATAT.
- Li, J., Yi, K., & Zhang, Q.** (2010). Clustering with diversity. In *International Colloquium on Automata, Languages, and Programming*, (pp. 188-200). Springer.
- Liu, M., Yang, D., Su, Q., & Xu, L.** (2018). Bi-objective approaches for home healthcare medical team planning and scheduling problem. *Computational and Applied Mathematics*, 37 (4), 4443-4474.
- Lu, M., Qin, Z., Cao, Y., Liu, Z., & Wang, M.** (2014). Scalable news recommendation using multi-dimensional similarity and jaccard-kmeans clustering. *Journal of Systems and Software*, 95, 242-251.
- Mathlouthi, I., Gendreau, M., & Potvin, J.-Y.** (2018). Mixed integer linear programming for a multi-attribute technician routing and scheduling problem. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 56 (1), 33-49.
- Misir, M., Smet, P., Verbeeck, K., & Vanden Berghe, G.** (2011). Security personnel routing and rostering: a hyper-heuristic approach. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Applied Operational Research*, volume 3, (pp. 193-205). Tadbir.
- Mladenović, N & Hansen, P.** (1997). Variable neighborhood search. *Computers & Operations Research*, 24 (11), 1097-1100.
- Rao, M. R.** (1971). Cluster analysis and mathematical programming. *Journal of the American Statistical Association*, 66 (335), 622-626.
- Rest, K.-D. & Hirsch, P.** (2016). Daily scheduling of home health care services using time-dependent public transport. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 28 (3), 495-525.
- Sağlam, B., Salman, F. S., Sayın, S., & Türkay, M.** (2006). A mixed-integer programming approach to the clustering problem with an application in customer segmentation. *European Journal of Operational Research*, 173 (3), 866-879.

- Shao, Y., Bard, J. F., & Jarrah, A. I.** (2012). The therapist routing and scheduling problem. *IIE Transactions*, 44 (10), 868-893.
- Solomon, M. M.** (1987). Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations research*, 35 (2), 254-265.
- Tang, H., Miller-Hooks, E., & Tomastik, R.** (2007). Scheduling technicians for planned maintenance of geographically distributed equipment. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43 (5), 591-609.
- Trautsamwieser, A. & Hirsch, P.** (2011). Optimization of daily scheduling for home health care services. *Journal of Applied Operational Research*, 3 (3), 124-136.
- Urquhart, N. & Fonzone, A.** (2017). Evolving solution choice and decision support for a real-world optimization problem. In *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference, GECCO '17*, (pp. 1264-1271)., New York, NY, USA. ACM.
- Xu, J. & Chiu, S. Y.** (2001). Effective heuristic procedures for a field technician scheduling problem. *Journal of Heuristics*, 7 (5), 495-509.
- Yuan, B., Liu, R., & Jiang, Z.** (2015). A branch-and-price algorithm for the home health care scheduling and routing problem with stochastic service times and skill requirements. *International Journal of Production Research*, 53 (24), 7450-7464.
- Yun-Chia Liang, Angela Hsiang-Ling Chen, C.-Y. T.** (2009). Variable neighborhood search for multi-objective parallel machine scheduling problems. In *Proceedings of the 8th International Conference on Information and Management Sciences*, (pp. 519-522).
- Zamorano, E. & Stolletz, R.** (2017). Branch-and-price approaches for the multiperiod technician routing and scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 257 (1), 55-68.
- Zhan, Y. & Wan, G.** (2018). Vehicle routing and appointment scheduling with team assignment for home services. *Computers & Operations Research*, 100, 1-11.
- Veness, C.** <http://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>. Calculate distance, bearing and more between Latitude/Longitude points. Alındığı tarih 28.12.2018.

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Seray ÇAKIRGİL  
**Uyruğu** : T.C  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 22.04.1994 - ANKARA  
**E-posta** : seraycakirgil@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2019, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2016 - 2019	TOBB ETÜ	Özel Başarı Burslu Yüksek Lisans Öğrencisi

**YABANCI DİL:** İngilizce

### TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Çakırgil, S.,** Yücel E, Kuyzu G., (2018), Çoklu Yetenekli İşgücü Rotalama ve Çizelgeleme Problemi için Bütünleşik Çözüm Yaklaşımları, 38. *Yöneylem Araştırması Endüstri Mühendisliği Ulusal Kongresi*, Eskişehir, Türkiye, 26-29 Haziran.
- Çakırgil, S.,** Yücel E, Kuyzu G., (2018), A matheuristic approach for forming, scheduling and routing field service teams with prioritized multi-skill tasks. *29<sup>th</sup> European Conference on Operational Research*, Valensiya, İspanya, 8-11 Temmuz.