

## Öncelik Seviyelerine Sahip Çoklu Yetenek Gerektiren İşler için Ekip Oluşturma, Çizelgeleme ve Rotalama

Gözde KUTAYER BİLGİN<sup>\*1</sup>, Eda YÜCEL<sup>2</sup>, Gültekin KUYZU<sup>3</sup>

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü,  
06510, Ankara

<sup>1</sup>(ORCID: 0000-0002-2532-7136)

<sup>2</sup>(ORCID: 0000-0002-3448-1522)

<sup>3</sup>(ORCID: 0000-0002-1997-306X)

(Alınış / Received: 08.01.2018, Kabul / Accepted: 16.05.2018,  
Online Yayınlanma / Published Online: 15.09.2018)

**Anahtar Kelimeler**  
İşgücü  
çizelgeleme ve  
rotalama,  
Modelleme,  
Sezgisel  
yöntemler, Takım  
oluşturma, Çok  
amaçlı karar  
verme

**Özet:** Bu çalışmada, tüm saha hizmet operasyonlarında gözlemlenen, çoklu yetenek gereksinimi içeren işgücü rotalama ve çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Problem, gerçek hayatta enerji dağıtım şirketlerinin günlük olarak karşılaştığı bir planlama probleminden yola çıkılarak tanımlanmıştır. Amaç, farklı konumları, öncelikleri ve yetenek gereksinimleri olan işler için; uygun teknisyen ekiplerinin ve sıralı iş listelerinin optimal bir şekilde belirlenmesidir. Öncelikle, problem için iki öncelikli amaç fonksiyonu bulunan bir matematiksel model geliştirilmiştir. Problem boyutu büyüdükçe modelin kabul edilebilir sürede ve kalitede çözüm vermemesi nedeniyle, büyük ölçekli problemler için kısa sürede kaliteli çözümler üreten, üç aşamalı bir sezgisel yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemin etkinliği hem rastgele türetilmiş, hem de gerçekçi veri kümeleri üzerinde gösterilmiştir.

## Forming, Scheduling and Routing Field Service Teams for Multi-Skill Prioritized Tasks

**Keywords**  
Workforce  
scheduling and  
routing,  
Modelling,  
Heuristics, Team  
forming, Multi  
objective decision  
making

**Abstract:** In this research, we study the multi-skill workforce scheduling and routing problem that arises in all field service operations. The problem originates from a daily planning problem faced by the electricity distribution companies. Given a set of geographically dispersed tasks with different priorities and skill requirements, and a set of technicians with different skills; the objective is to form teams of technicians while assigning a sequence of tasks to each team in an optimal manner. First, we develop a mathematical model that has two prioritized objective functions for the problem. Since the solution time and quality of the model degrades quickly as the problem size increases, we devise a three-phased heuristic that generates good solutions efficiently for large-

## 1. Giriş

Yerinde servis hizmetlerine, diğer bir deyişle, servis hizmetlerinin müşterilerin bulunduğu yerde verilmesine duyulan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Teknisyenlerin müşteri noktalarında sundukları servis hizmetleri, evde sunulan sağlık hizmetleri, güvenlik şirketlerinin sundukları kontrol hizmetleri; yerinde servis hizmeti kullanım alanları arasındadır. Gerçek hayatta bu alanlarda karşılaşılan, teknisyenlerin müşterilere ait mülkiyetlerde gerçekleştirecekleri bakım veya tamir faaliyetlerinin çizelgelenmesi, gezici sağlık ekiplerinin ya da hemşirelerin görev çizelgelerinin hazırlanması, güvenlik ekiplerinin belirlenen tüm hedef alanı rotalayacak şekilde günlük-saatlik rotalarının belirlenmesi gibi problemler, işgücü çizelgeleme ve rotalama problemleri (İÇRP) olarak ele alınmaktadır.

Servis sektöründeki tüm alanlarda olduğu gibi, yerinde servis sektöründe de hizmet kalitesini artırarak maliyetleri düşürme ihtiyacı bulunmaktadır [1]. Bu nedenle, yerinde servis hizmetlerinin tüm uygulama alanlarında temel amaç, rotalama ve çizelgeleme içeren operasyonel planlamayı yüksek hizmet kalitesi ve düşük maliyet ile gerçekleştirmektir.

Literatürde, yerinde servis hizmetlerine ilişkin problemlerin ele alındığı çalışmalara bakıldığında örnek olarak, evde sunulan sağlık hizmetleri [2], ev hizmetleri [3], teknisyenlerin müşteri noktalarında sundukları servis, bakım veya tamirat hizmetleri [4] ve güvenlik

şirketlerinin farklı müşteri konumları için sundukları kontrol hizmetleri [5] verilebilir.

Çalışmamızda, genelde yerinde servis hizmeti sağlayan tüm servis operasyonlarında, özelde enerji dağıtım sektöründe gözlemlenen yetenek gereksinimleri varlığında işgücü çizelgeleme ve rotalama problemi ele alınmıştır. Problem, Enerji Dağıtım sektöründe faaliyet gösteren şirketlerin karşılaştığı ve günlük olarak çözülmesi gereken operasyonel problemlerden biri olan, sahadaki ekiplerin ve işlerin daha etkin bir şekilde takibi ve atanması problemidir. Problemde, işlerin zaman sınırları, farklı ve çoklu yetenek gereksinimleri, takım oluşturma ihtiyacı ve iş servis süreleri dikkate alınmaktadır.

Makalenin devamında, Bölüm 2’de ilgili literatür taramasına, Bölüm 3’te problem tanımına yer verilmiştir. Problem için geliştirilen matematiksel model Bölüm 4’te, sezgisel yöntem ise Bölüm 5’te anlatılmıştır. Bölüm 6’da önerilen yöntemlerin hesaplamalı analizlerine ilişkin sonuçlar verilmiştir. Son olarak, Bölüm 7’de ise yapılan çalışmaya ilişkin bulgular özetlenmiştir.

## 2. Literatür

Literatürdeki İÇRP çalışmalarının; amaç, planlama çevreni, işgücünün homojen veya heterojen olma durumu (tek ya da çoklu yetenek varlığı), işlerin zaman sınırının olma durumu, tek modlu ya da çok modlu ulaşım seçeneğinin bulunması, ekip oluşturma gerekliliği, işler arasında bağımlılık olması, işlerin farklı önceliklere sahip olması gibi özelliklere göre farklılaştığı gözlemlenmiştir. Her bir özellik için literatürdeki farklı yaklaşımlar ve çalışmamızda ne şekilde ele alındığı aşağıda açıklanmaktadır.

Literatürde yer alan İÇRP çalışmalarında; çalışan sayısının en küçüklenmesi [6], operasyonel (ulaşım, fazla mesai vb.)

maliyetlerin en küçüklenmesi ([7], [8], [9]), işlerin en kısa sürede tamamlanması ([4], [10]), atanan iş sayısının en büyüklmesi [11] veya bunların birden fazlasının ve çeşitli kısıtların ihlalinin ağırlıklandırılmış toplamının eniyilenmesi ([12], [13]) gibi birçok farklı amaç fonksiyonuna rastlanmaktadır. Çalışmamızda ele alınan problemde ise, işler eşit öncelik seviyesine sahip değildir ve operasyonel maliyetlerin düşürülmesi amacının yanı sıra yüksek öneme sahip işlerin, düşük öneme sahip işlerden önce gerçekleştirilmesi amacı da bulunmaktadır. Bu nedenle, problem kapsamında çoklu önceliklendirilmiş amaç fonksiyonları kullanılmıştır. Birinci öncelikli amaç, Cordeau vd. [4] ve Fırat ve Hurkens [10]'in çalışmalarında ele aldıkları gibi önceliklerine göre ağırlıklandırılmış işlerin öncelikli tamamlanma süreleri toplamını en küçükleme. İkinci öncelikli amaç ise, seyahat maliyetlerini, fazla mesai maliyetlerini ve geciken işlerden kaynaklanan ceza maliyetlerini içeren toplam operasyonel maliyetlerin en küçüklmesidir.

Servis sektöründeki işgücü çizelgeleme ve rotalama problemlerinde, etkin rotalama yapılmadığında, çalışanlar gün içinde çalıştıkları süreden daha fazla zamanı seyahat ederek kaybedebilmektedir. Bunun sonucunda işlerin teslim sürelerinin aşılması söz konusu olmaktadır. Çalışanların seyahat sürelerini düşürmek büyük önem taşımaktadır [14]. Yerinde servis sektöründeki işgücü çizelgeleme çalışmalarının bir bölümü ise problemin rotalama boyutunu ihmal etmektedir. Örneğin, çalışmamızda ele alınan probleme pek çok açıdan benzerlik gösteren Cordeau vd. [4] ve Fırat ve Hurkens [10] işgücü çizelgeleme problemini çalışmış, ancak çalışmaları kapsamında rotalamayı ele almamışlardır. Çalışmamızda ise, çalışanların seyahat sürelerinin de

dikkate alındığı, işlerin son teslim tarihlerini geçirmeyecek şekilde bir rotalama yapılması hedeflenmektedir.

İşgücü çizelgeleme ve rotalama problemlerinde, çalışanlar arasında yetenek farklılıklarının olduğu durumlar bulunmaktadır. Literatürde yer alan bazı İÇRP çalışmaları ([15], [16], [17]), bu farklılıkları ihmal etmektedir. Cordeau vd. [4], Fırat ve Hurkens [10], Kovacs vd. [4] ve Zamorano ve Stolletz [9] ise, çalışanların farklı yeteneklere sahip olduğu durumları ele almıştır. Çalışmamızda da, işlerin farklı yetenek gereksinimleri bulunması ve teknisyenlerin farklı yeteneklere sahip olması durumu dikkate alınmıştır.

Literatürde yer alan İÇRP çalışmalarında planlama ufku, tek-periyotlu (sürekli zaman) ve çok-periyotlu olmak üzere iki şekilde ele alınmaktadır. Optimizasyon problemlerinde, genelde, çok-periyotlu yaklaşım stratejik karar verme seviyesinde, tek-periyotlu yaklaşımı ise operasyonel karar verme seviyesinde kullanılmaktadır. Literatürdeki çok-periyotlu İÇRP çalışmalarının ([9], [19], [20], [15], [16], [21], [22]) ise, stratejik karar verme değil, operasyonel karar verme seviyesinde oldukları görülmektedir. Operasyonel problem çalışılmasına rağmen çok-periyotlu olarak ele alınma nedeni, periyodik ziyaret gereksiniminin bulunmasıdır. Çok-periyotlu planlama, planlama ufkunun büyük olduğundan kaynaklı olarak, daha kapsamlı çalışma saati düzenlemelerinin dikkate alınmasını gerektirmektedir. Çok periyotlu İÇRP çalışmalarından Blakeley vd. [19] çoklu yetenek seviyeleri varlığında, çok-periyotlu teknisyen çizelgeleme ve rotalama problemini çalışmış ancak çalışmamızda ele alınan problemde farklı olarak, takım oluşturma kararlarını dâhil etmemiştir. Tang vd. [20] teknisyenlerin farklı konumlardaki bakım işlerine atanması ve rotalarının

belirlenmesi problemini çok-periyotlu olarak çalışmış ancak teknisyenlerin hepsinin aynı yeteneğe sahip olduğunu varsayımıştır. Hindle vd. [23], Cordeau vd. [4], Kovacs vd. [7], Rest ve Hirsch [24] çalışmalarında tek bir günü içeren sürekli planlama ufkuna yer vermiştir. Çalışmamızda da, çoklu yetenek gereksinimlerine sahip işlerin çoklu yeteneklere sahip teknisyenlerden oluşan ekiplere, tek-periyotlu (sürekli planlama ufkusu) olacak şekilde günlük iş planlarının atanması ve ekiplerin günlük rotalarının belirlenmesi problemi çalışılmıştır.

Çalışmamızda ele alınan problem, gerçek hayatta enerji dağıtım sektöründe karşılaşılan bir problem olduğu için, işlerin belirli bir zaman sınırında gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Benzer şekilde, Cordeau vd. [4]'nin çalıştığı teknisyen – görev atama probleminde de, işlerin belirli bir zaman sınırında tamamlanması gerekliliği ve işin zaman sınırına uyulmaması durumunda ceza maliyetinin ortaya çıkması ele alınmıştır. Tang vd. [20] teknisyenlerin işlere atanması ve rotalanması problemini ele almıştır fakat çalışmalarında işlerin belirli bir zaman sınırında bitirilme gerekliliğini bulunmamaktadır.

Literatürde yer alan İÇRP problemlerinde, farklı ulaşım çeşitleri (özel bir araç, toplu taşıma, bisiklet ya da yürüyüş) kullanıldığı görülmektedir. Örneğin; Hiermann vd. [11] ve Fikar vd. [1] sağlık çalışanlarının toplu taşıma ile seyahat etme durumlarını ele almıştır. Çalışmamızda ise, ekipler, atanmış işleri gerçekleştirmek için gerekli ekipmanları firmaya ait servis araçlarında taşımakta ve bu araçlarla seyahat etmektedir. Bu nedenle, problemimizde tek bir ulaşım modu olduğu varsayılmaktadır.

Literatürde, bir işi birden fazla çalışanın aynı anda yapma gerekliliği bazı çalışmalarda eş zamanlılık olarak ele alınmaktadır. Bu durum, ekip oluşturma

gerekliliğini beraberinde getirmektedir. Çalışmamıza benzer şekilde, Cordeau vd. [4], Fırat ve Hurkens [10], Kovacs vd. [7] ve Zamorano ve Stolletz [9] çalışanların yeteneklerine göre ekiplerin oluşturulması ve bu ekiplere işlerin atanması birlikte ele alınmaktadır.

Literatürde yer alan bazı İÇRP çalışmalarında, işler arasında zamana bağlı ilişkiler (öncüllük – ardıllık ilişkisi) bulunmaktadır. Cordeau vd. [4] ve Goel ve Meisel [17] atanacak işler arasında bağlı bir ilişki bulunmasını ele almaktadır. Kovacs vd. [7]'nin ve Zamorano ve Stolletz [9]'in çalışmalarında ise, problemimize benzer şekilde, işler arasında bağlı ilişkiler bulunmamaktadır.

Literatürde yer alan çalışmalardan Lanzarone ve Matta [25], talepte başka bir deyişle iş kümesinde rassallığı; Yuan vd. [26] ise servis sürelerindeki rassallığı ele almıştır. Çalışmamızda ise, iş kümesinin ve servis sürelerinin deterministik olduğu varsayılmaktadır.

Özetle; çalışmamızda, literatürdeki diğer İÇRP çalışmalarından farklı olarak, farklı coğrafi konumlardaki çoklu yetenek gereksinimlerine sahip ve zaman sınırı bulunan işlerin sürekli planlama çevreninde gerçekleştirilmesi için, farklı yetenekler içeren teknisyenlerden ekip oluşturulması, işlerin ekiplere atanması ve ekiplerin rotalarının belirlenmesi problemi ele alınmıştır. Problemde öncelikli iki amaç bulunmaktadır. Birinci öncelikli amaç, önceliklerine göre ağırlıklandırılmış iş sınıflarının tamamlanma sürelerinin ağırlıklı toplamını en küçüktür. İkinci öncelikli amaç ise; seyahat maliyetlerini, fazla mesai maliyetlerini ve geciken işlerden kaynaklanan ceza maliyetlerini içeren günlük operasyonel maliyetleri en küçüktür. Çalışmamız kapsamında, problemin küçük ölçekli örneklerinin çözümü için bir matematiksel model,

büyük ölçekli problem örnekleri için ise bir sezgisel yöntem geliştirilmiştir.

### 3. Problem tanımı

Hizmet verilen bölge bir çizge olarak ele alınırsa,  $G = (N', A)$  tüm bölgeyi ifade etmektedir.  $N = \{1, \dots, n\}$  kümesi farklı coğrafi konumlardaki işleri belirtmektedir.  $0$  ve  $n + 1$  düğümleri, merkez konumu temsil eden etkisiz düğümleri,  $N' = N \cup \{0, n + 1\}$  ise düğüm kümesini ifade etmektedir.  $A = \{(i, j) | i \in N' \setminus \{n + 1\}, j \in N' \setminus \{0\}, i \neq j\}$  kümesindeki ayrıtlar ise, işlerin konumları arasındaki yolları tanımlamaktadır. Her  $(i, j) \in A$  ayrıtı için  $i$  işinden  $j$  işine ulaşma süresi  $t_{ij}$ , seyahat maliyeti ise  $c_{ij}^I$  olarak ifade edilmektedir. Her bir iş  $i \in N$  için  $P_i$  işin işlem süresini belirtir ve sabittir, işe atanan teknisyen sayısına bağlı olarak değişmez. Her ekip, en fazla  $v$  adet teknisyenden oluşmaktadır. Bir teknisyen en fazla bir ekibe atanabilmektedir.  $Q$ , yetenek kümesini;  $q \in Q$  ise,  $Q$  yetenek kümesinde yer alan bir yeteneği ifade etmektedir. Her iş  $i \in N$  için, yetenek gereksinimleri  $u_{iq}$ ; teknisyenlerin yetenek seviyeleri ise  $g_{mq}$  0-1 ikili parametreleri ile tanımlanmaktadır. Planlama çevreni bir gündür ve  $(0, \tau_{max}]$  zaman aralığı ile ifade edilmektedir. Planlama çevreninde her teknisyen için normal mesai  $(0, \tau]$  zaman aralığına karşılık gelmekte,  $(\tau, \tau_{max}]$  aralığındaki çalışmalar ise fazla mesai olarak nitelendirilmektedir. Her birim fazla mesai için  $c_i^{II}$  fazla mesai maliyeti ödenmektedir.  $\tau_{max}$ 'in tüm işlerin ekiplerce gerçekleştirilebileceği kadar büyük bir değer olarak belirlendiği varsayılmaktadır. Her bir iş  $i \in N$  için;  $f_i$ , işin tamamlanması gereken zaman sınırını belirtmektedir. İşin  $f_i$ 'den sonra tamamlanması durumunda gecikilen her birim süre için  $c_i^{III}$  gecikme maliyeti ödenmektedir.  $P = \{1, \dots, p\}$ , işler için

uyulması gereken kurallara göre belirlenen öncelik sınıflarının kümesini ifade etmektedir. Her iş öncelik sınıfı  $p \in P$ 'nin ağırlığı  $w_p$  ile ifade edilmektedir. Her bir iş  $i \in N$  için;  $a_{ip}$  0-1 ikili parametresi,  $i$  işinin  $p \in P$  öncelik sınıfına ait olup olmadığını belirtmektedir. Bir iş mutlaka bir öncelik sınıfına aittir ve bir iş birden fazla öncelik sınıfında yer alamaz. Bir  $p \in P$  öncelik sınıfındaki işlerden en geç tamamlanan işin tamamlanma süresi  $C_p^{max}$  ile gösterilmektedir.

### 4. Matematiksel Model

Çalışmamızda ele alınan problemin çözümü için öncelikle karma tam sayılı programlama modeli geliştirilmiştir.

#### Kümeler:

$N$  : Farklı coğrafi konumlarda bulunan işlerin kümesi,  $\{1, \dots, n\}$

$N'$  : Başlangıç ve bitiş yapay işlerini de içeren işler kümesi,  $\{0, 1, \dots, n + 1\}$

$M$  : Teknisyen kümesi

$E$  : Ekip kümesi (Maksimum ekip sayısı, yani  $|E|$ ; ekiplerin araçlı olması durumunda araç sayısına, herhangi bir kısıt olmadığı durumda teknisyen sayısına eşit olacak şekilde problem girdisi olarak belirlenmelidir.)

$Q$  : Yetenek kümesi

$P$  : Öncelik sınıfları kümesi

#### Parametreler:

$P_i$  :  $i$  işinin işlem süresi,  $\forall i \in N$

$u_{iq}$  :  $i$  işi  $q$  yeteneğine sahip bir teknisyen gerektiriyorsa 1, diğer durumlarda 0 değerini alır.  $\forall i \in N, q \in Q$

$g_{mq}$  :  $m$  teknisyeni  $q$  yeteneğine sahip ise 1, diğer durumlarda 0 değerini alır.  $\forall m \in M, q \in Q$

$a_{ip}$  :  $i$  işi  $p$  öncelik sınıfındaysa 1, diğer durumlarda 0 değerini alır.  $\forall i \in N, p \in P$

$w_p$  :  $p$  iş öncelik sınıfının ağırlığı,  $\forall p \in P$

$t_{ij}$  :  $i$  düğümünden  $j$  düğüme ulaşma süresi,  $\forall (i, j) \in A$

$$c_{ij}^I : i \text{ işinden } j \text{ işine seyahat maliyeti, } \forall (i, j) \in N \quad S_{n+1,k} - \tau \leq o_k, \forall k \in E \quad (14)$$

$$c_i^{II} : \text{Fazla mesai birim maliyeti} \quad c_p^{max} \geq a_{ip} * c_i, \forall i \in N, p \in P \quad (15)$$

$$c_i^{III} : i \text{ işinin birim gecikme maliyeti, } \forall i \in N \quad o_k, L_i, S_{ik}, c_i, c_p^{max} \geq 0, \quad (16)$$

$$f_i : i \text{ işinin tamamlanması gereken zaman sınırı, } \forall i \in N \quad Y_{ik}, X_{ijk}, Z_{mk} \in \{0,1\}, \quad (17)$$

$\tau$  : Normal mesai zaman sınırı

$\tau_{max}$  : Fazla mesai zaman sınırı

$B$  : Büyük bir sayı

### Karar Değişkenleri:

$S_{ik}$  :  $i$  işinin  $k$  ekibi tarafından tamamlanma zamanı,  $\forall i \in N, k \in E$

$Z_{mk}$  :  $m$  teknisyeni  $k$  ekibine atanmışsa 1, diğer durumlarda 0 değerini alır,  $\forall m \in M, k \in E$

$Y_{ik}$  :  $i$  işi  $k$  ekibine atanmışsa 1, diğer durumlarda 0 değerini alır,  $\forall i \in N, k \in E$

$X_{ijk}$  :  $k$  ekibi  $i$  işini  $j$  işinden hemen önce ziyaret ederse 1, diğer durumlarda 0 değerini alır,  $\forall (i, j) \in A, k \in E$

$c_i$  :  $i$  işinin tamamlanma zamanı,  $\forall i \in N$

$L_i$  :  $i$  işindeki gecikme miktarı,  $\forall i \in N$

$o_k$  :  $k$  ekibinin fazla mesai süresi,  $\forall k \in E$

$c_p^{max}$  :  $p$  öncelik sınıfındaki işlerden en geç tamamlanan işin tamamlanma süresi,  $\forall p \in P$

### Kısıtlar:

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

$$\sum_{i \in N} X_{i,n+1,k} = 1, \forall i \in N, k \in E \quad (2)$$

$$\sum_{k \in E} Y_{ik} = 1, \forall i \in N \quad (3)$$

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

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

$$\sum_{i \in N' \setminus \{n+1\}} X_{ijk} - \sum_{j \in N' \setminus \{0\}} X_{jik} = 0, \quad \forall j \in N, k \in E \quad (6)$$

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

$$(S_{ik} + t_{ij} + P_j - S_{jk}) \leq B * (1 - X_{ijk}), \quad \forall (i, j) \in A, k \in E \quad (8)$$

$$\sum_{k \in E} Z_{mk} \leq 1, \forall m \in M \quad (9)$$

$$\sum_{m \in M} Z_{mk} \leq v, \forall k \in E \quad (10)$$

$$u_{iq} * y_{ik} \leq \sum_{m \in M} (g_{mq} * Z_{mk}), \quad \forall i \in N, k \in E, q \in Q \quad (11)$$

$$c_i - f_i \leq L_i, \forall i \in N \quad (12)$$

$$S_{n+1,k} \leq \tau_{max}, \forall k \in E \quad (13)$$

Kısıt (1), her ekibin günlük rotasının merkezde başlamasını sağlar. Kısıt (2), her ekibin günlük rotasının merkezde bitmesini sağlar. Kısıt (3), her işin sadece bir ekip tarafından yapılmasını sağlar. Kısıt (4), bir iş bir ekibe atanmışsa, ekibin rotasında bu işin bulunmasını sağlar. Kısıt (5), ekip rotalarında tek iş içeren alt turların oluşmasını engeller. Kısıt (6), bir ekibe bir iş atanmışsa, ekibin bu işe ait düğüme başka bir düğümden gelip, bu işten sonra başka bir düğüme gitmesini, yani planlanan ziyaretlerde akışın korunmasını sağlar. Kısıt (7), bir işin tamamlanma zamanının o işin atandığı ekibin işi tamamlama süresi olarak hesaplanmasını sağlar. Kısıt (8), bir işe atanan ardışık işlerden, önceki bitmeden sonrakine başlanamamasını sağlar. Böylece alt turların bertaraf edilmesi sağlanmış olur. Kısıt (9), bir teknisyenin en fazla bir ekibe atanabilmesini sağlar. Kısıt (10), bir ekibe atanabilecek teknisyen sayısını sınırlar. Bir ekibe hiç bir teknisyen atanmaması mümkündür. Kısıt (11), bir işin atandığı ekipte çalışan teknisyenlerin sahip oldukları yetenekler ile o iş için sahip olunması gereken yeteneklerin uyumlu olmasını sağlar. Kısıt (12), var ise, işteki gecikme miktarını hesaplar. Kısıt (13), bir ekibe maksimum mesai süresini aşan bir iş planı atanmamasını garantiler. Kısıt (14), bir ekip, fazla mesai yapıyor ise, fazla mesai süresini hesaplar. Kısıt (15), bir iş öncelik sınıfı için, o sınıftaki işlerden en geç biteninin tamamlanma zamanını hesaplar. Kısıt (16), karar değişkenleri için negatif değerde olmama durumunu tanımlar. Kısıt (17), karar değişkenleri için 0-1 ikili değişken olma durumunu tanımlar.

Model kapsamında iki öncelikli amaç fonksiyonu bulunmaktadır. Birinci öncelikli amaç için, önceliklerine göre ağırlıklandırılmış iş sınıflarının ağırlıklandırılmış tamamlanma süresi toplamını en küçüklemeyi hedefleyen  $M1$  modeli çözülür.  $M1$  modeli aşağıdaki gibidir:

$$\text{En küçükle} \quad \sum_{p \in P} w_p C_p^{\max} \quad (18)$$

Öyle ki: (1) - (17)

İkinci öncelikli amaç için ise,  $M1$  modelinden elde edilen en iyi çözümde her öncelik sınıfı için elde edilen  $C_p^{\max(*)}$  optimal değerleri kullanılarak operasyonel maliyetleri en küçüklemeyi hedefleyen  $M2$  modeli çözülür.  $M2$  modeli aşağıdaki gibidir:

$$\text{En küçükle} \quad \sum_{k \in E} \sum_{i,j \in N} X_{ijk} c_{ij}^I + \sum_{k \in E} o_k c^II + \sum_{i \in N} L_i c_i^{III} \quad (19)$$

Öyle ki:

$$(1) - (17) \\ C_p^{\max} \leq C_p^{\max(*)} \gamma_p, \forall p \in P \quad (20)$$

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

Geliştirilen matematiksel model farklı boyutlardaki problem örnekleri üzerinde analiz edilmiştir. Bu analizlere ilişkin sonuçlar Bölüm 6'da paylaşılmaktadır. Yapılan analizlerde, problem örneklerinin boyutu büyüdükçe modelin kabul edilebilir sürede, kabul edilebilir kalitede çözüm üretmediği gözlenmiştir.

## 5. Sezgisel Çözüm Yöntemi

Problemin gerçek boyutlu örnekleri için kısa sürede kaliteli sonuçlar almak amacıyla, çalışma kapsamında bir sezgisel çözüm yöntemi geliştirilmiştir. Sezgisel yöntem, dört ana adımdan oluşmaktadır. Birinci adımda; işlerin ağırlıkları, zaman sınırına kalan süreleri, yetenek gereksinimleri ve ihtiyaç duydukları yeteneklerin teknisyen kümesindeki mevcudiyetine göre sıralanması gerçekleştirilir. İkinci adımda, işlerin yetenek gereksinimlerinin teknisyenlerin yetenekleri ile uyumu dikkate alınarak ekiplerin oluşturulması ve ekiplere ilk işlerinin atanması gerçekleştirilir. Üçüncü adımda, bir önceki adımda atanamayan işler ekiplere atanır. Son adımda ise, ekiplerin rotaları belirlenir. Sezgisel yöntem için notasyon bilgisi Ek A'da verilmiştir.

### 5.1. İşlerin öncelik skorlarına göre sıralanması

İşlerin öncelik skorlarının belirlenmesi sırasında  $\alpha_i$  ve  $\beta_i$  ( $\forall i \in N$ ) olmak üzere iki değer göz önünde bulundurulmuştur.

Her iş  $i \in N$  için;  $\alpha_i$  değeri, işin bulunduğu öncelik sınıfının ağırlığına ( $w_i$ ) ve zaman sınırlarına kalan süreye ( $f_i$ ) bağlıdır ve Denklem (21) ile hesaplanır. Denklem (21)'e göre; bir  $i \in N$  işinin zaman sınırına kalan süresi günlük mesai süresine eşit ya da büyük ise, yalnızca işlerin ağırlıkları dikkate alınır ve  $\alpha_i$  değeri  $i$  işinin ağırlığının tüm işlerin ağırlıklarının toplamına bölümü ile elde edilir. Diğer durumda,  $\alpha_i$  değeri işlerin hem ağırlıklarına hem de zaman sınırına kalan sürelerine bağlı olarak değişmektedir.

$$\alpha_i = \begin{cases} \frac{w_i * (\tau - f_i)}{\sum_{i \in N} w_i * (\tau - f_i)} & f_i \leq \tau \text{ ise,} \\ 0 & \text{değilse.} \end{cases} \quad (21)$$

Her iş  $i \in N$  için;  $\beta_i$  değeri, işlerin yetenek gereksinimlerine ve teknisyenlerin yeteneklerine bağlıdır ve Denklem (22)

ile hesaplanır. Denklem (22)'ye göre,  $\beta_i$  değeri, o iş için gerekli olan tüm yetenekler için yeteneğe sahip teknisyen sayısının toplam teknisyen sayısına oranının ortalamasıdır.

$$\beta_i = \frac{\sum_{q \in Q} \frac{\sum_{t \in M} g_{tq}}{|M|} u_{iq}}{\sum_{q \in Q} u_{iq}} \quad (22)$$

Her iş  $i \in N$  için  $\alpha_i$  ve  $\beta_i$  değerlerinin ağırlıklı toplamı ile bir skor elde edilir. İşler, öncelik skorlarına göre büyükten küçüğe sıralanır ve sıralı işler kümesi ( $N^s$ ) elde edilir. En büyük skora sahip olan iş, en öncelikli iş olarak ele alınır.

## 5.2. Ekiplerin oluşturulması ve ekiplere ilk işlerinin atanması

Bu adımda, teknisyenlerden ekip oluşturulması ve her ekibe ilk işinin atanması gerçekleştirilmektedir.

Tüm teknisyenlerden oluşan *atanmamış teknisyenler* kümesi ( $M$ ) ile başlanır. Öncelik skorlarına göre sıralanan işler sırayla ele alınır. Ele alınan işin yetenek gereksinimlerine bakılır, daha sonra, işin ihtiyacı olan yeteneklerin karşılanması için en uygun atanmamış teknisyen araması yapılır. Bu arama sırasında, iki ölçüden yararlanılmaktadır. Bunlar, teknisyenin yetenekleri ile işin yetenek gereksinimlerinin eşleşme sayısı ve işin teknisyenin bulunduğu bir ekibe atanması durumunda teknisyenin israf edilen yetenek sayısıdır. Bu iki ölçü doğrultusunda, öncelik skoru en yüksek işten başlanarak, sırasıyla her bir iş için, yetenekleri en çok eşleşen ve en az israf edilen yeterli sayıda teknisyen bulunduğu noktada, bu teknisyenlerden bir ekip oluşturulmaktadır. Bir ekibe atanan teknisyenler, *atanmamış teknisyenler* kümesinden çıkarılmakta ve ekibi oluştururken kullanılan iş, ekibe atanmaktadır. Bir iş için yetenek gereksinimlerine uygun atanmamış teknisyen bulunamaması durumunda iş *atanamayan işler* ( $N^-$ ) listesine atılır.

Tüm teknisyenlerin bir ekibe atanması durumunda, ekip oluşturma işlemi tamamlanır ve henüz ekip atanması gerçekleştirilmemiş işler *atanamayan işler* listesine atılır. Bu adıma ilişkin sözde kod Ek B'da verilmiştir.

Sezgiselin ilk iki adımında, işlerin skorlarının ve mevcut teknisyen kümesinin yetenekleri ile işlerin yetenek gereksinimi uyumluluğunun belirlenmesi ve bu değerler kullanılarak ekiplerin oluşturulması ile ekiplere ilk işlerinin atanması ele alınmıştır. Bu durum, Cordeau vd. [4]'nin çalışmasında değerlendirmeye alınan tüm ölçülerin ağırlıklı ortalaması hesaplanarak tek bir adımda gerçekleştirilmektedir.

## 5.3. Oluşturulan ekiplere kalan işlerin atanması

Sezgiselin bu adımında, ekiplerin oluşturulması sırasında *atanamayan işlerin*, oluşturulmuş ekiplere atanması gerçekleştirilmektedir. *Atanamayan işler* listesindeki her bir iş için, işin ihtiyacı olan yeteneklerin karşılanması için en uygun ekip araması yapılmaktadır. Bir ekibin yetenekleri belirlenirken, ekipteki teknisyenlerin yeteneklerinin birleşimi kullanılmaktadır. Bir iş için en uygun ekibin bulunması sırasında, işin ihtiyacı olan fakat ekipte bulunmayan yetenek sayısı ve işin ekibe atanması durumunda israf edilecek yetenek sayısı ölçülerinden yararlanılmaktadır. Her bir *atanamayan iş*, işin tüm yetenek ihtiyaçlarını karşılayan ve işin ekibe atanması durumunda israf edilecek yetenek sayısını en küçükleyen ekibe atanmakta ve *atanamayan işler* listesinden çıkartılmaktadır. Ekiplerin gün içerisinde yapabilecekleri maksimum iş sayısını sınırlamak için 'günlük mesai süre limiti' dikkate alınarak iş atanması yapılmaktadır. Bunun için, bir ekibe atanan işlerin işlem süreleri toplamının, ekibin günlük mesai süresini aşmamasına dikkat edilmektedir. Bir işin yetenek ihtiyacını karşılayacak hiç bir ekip bulunamaması durumunda bu iş



İçin ekip ataması gerçekleştirilememektedir. Bu adıma ilişkin sözde kod Ek C’de verilmiştir.

İş sayısı ( $ N $ )	Teknisyen sayısı ( $ M $ )	Yetenek sayısı ( $ Q $ )	Öncelik sınıfı sayısı ( $ P $ )
3	9	3	2,3
10			2,3,4
15			2,3,4
20			2,3,4

#### 5.4. Ekiplerin rotalarının belirlenmesi

İşlerin ekiplere atanması sonucunda her bir ekibin o gün gerçekleştirmesi gereken işler belirlenir. Her bir ekibe atanan işlerin farklı konumlarda bulunması nedeniyle ortaya bir rotalama problemi çıkmaktadır. Çalışmamız kapsamında günlük probleme odaklanılması ve ekiplerin gün içerisinde aynı şehirde bulunan işlere yönlendirilmesi nedeniyle, işler arasındaki mesafelerin hesaplanmasında doğrusal (rectilinear) uzaklık hesaplama yöntemi kullanılmıştır.

Çalışmamızda, işlerin zaman sınırını aşılmayacak şekilde her bir işin, önceliği kendisinden düşük işlerden daha önce tamamlanması hedeflenmektedir. Bu doğrultuda; her ekip için, o ekibe atanan işlerin zaman sınırına kalan süresi ve önceliği dikkate alınarak, ekibin rotası oluşturulur. Bu adıma ilişkin sözde kod Ek D’de verilmiştir.

## 6. Deneysel Çalışmalar

### 6.1. Problem örneklerinin oluşturulması

Geliştirilen çözüm yöntemlerinin performanslarını değerlendirmek amacıyla; hem rastgele türetilmiş veriler, hem de gerçekçi veriler kullanılarak problem örnekleri oluşturulmuştur.

#### 6.1.1. Rastgele türetilmiş problem örneklerinin oluşturulması

Matematiksel modelin geçerliliği ve sezgisel yöntemin performansının değerlendirilmesi amacıyla küçük ölçekli problem örnekleri oluşturulmuştur.

Küçük ölçekli problem örneklerinde; iş sayısı, teknisyen sayısı, iş öncelik sınıfı sayısı ve yetenek sayısı, Tablo 1’de gösterildiği gibi farklı değerleri alacak şekilde belirlenmiştir.

**Tablo 1.** Rastgele türetilmiş küçük ölçekli problem örnekleri kümesi için problem büyüklüklerine ilişkin bilgiler

Sezgisel çözüm yönteminin performansının test edilmesi için türetilen büyük ölçekli problem örneklerine ilişkin iş sayısı, teknisyen sayısı, iş öncelik sınıfı sayısı ve yetenek sayısı değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2.** Rastgele türetilmiş büyük ölçekli problem örnekleri kümesi için problem büyüklüklerine ilişkin bilgiler

İş sayısı ( $ N $ )	Teknisyen sayısı ( $ M $ )	Yetenek sayısı ( $ Q $ )	Öncelik sınıfı sayısı ( $ P $ )
200	100	5	4
300			
400			
300	200		
400			
500			
300	300		
400			
500			

Rastgele türetilmiş problem örnekleri için öncelik sınıflarının ağırlıkları, teknisyen çizelgeleme problemi üzerine çalışan Dutot vd. [27] çalışmasında ele aldığı gibi,  $w_1 = 28, w_2 = 14, w_3 = 4, w_4 = 1$  olarak belirlenmiştir. Öncelik sınıfı sayısı 2 olan problem örneklerinde  $w_1 = 28, w_2 = 14$  olarak, öncelik sınıfı sayısı 3 olan problem örneklerinde ise  $w_1 = 28, w_2 = 14, w_3 = 4$  olarak alınmıştır.

#### 6.1.2. Gerçekçi problem örneklerinin oluşturulması

Bir enerji dağıtım şirketi tarafından sağlanan gerçekçi veriler kullanılarak dört farklı enerji dağıtım bölgesi için problem örnekleri elde edilmiştir. Gerçekçi verilerde her bir bölge için ele

alınan yetenek sayısı 5'tir, öncelik sınıfı sayısı ise her bölge için farklılık göstermektedir. Öncelik sınıflarının ağırlıkları veride sağlanmaktadır. Gerçekçi problem örnekleri için parametre değerleri Tablo 3'te verilmiştir. Bu örneklerde, fazla mesai zaman sınırı ile normal mesai zaman sınırı birbirine eşit ve 480 dk. olarak alınmıştır.

**Tablo 3.** Gerçekçi problem örnekleri için problem büyüklüklerine ilişkin bilgiler

Problem örneği	1	2	3	4
İş sayısı ( $ N $ )	40	52	335	403
Teknisyen sayısı ( $ M $ )	31	38	68	96
Ekip sayısı ( $ E $ )	7	7	41	45
Yetenek sayısı ( $ Q $ )	5	5	5	5
Öncelik sınıfı sayısı ( $ P $ )	14	17	57	75

## 6.2. Deneysel çalışmalar

Oluşturulan problem örneklerinin çözümü için, geliştirilen  $M1$  ve  $M2$  matematiksel modelleri Intel core i7, 2.5 GHz, 4GB, 64 bit özelliklerindeki bir bilgisayarda, CPLEX OPL 12.4 çözücüsü kullanılarak ayrı ayrı 4 saat zaman sınırı ile çözdürülmüştür. Geliştirilen sezgisel yöntem, Java programlama dilinde, Eclipse IDE for Java platformunda kodlanmış, koşullar aynı özelliklere sahip bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir.

Sezgisel yöntemin ilk adımında işlerin öncelik skorlarına göre sıralanmasında  $\alpha$  ölçüsünün ağırlığı olan  $w_\alpha$  ve  $\beta$  ölçüsünün ağırlığı olan  $w_\beta$  değerleri, her bir problem örneği için 0,1 ile 0,9 aralığında değiştirilmiş ve en iyi amaç fonksiyonu değerlerini veren  $w_\alpha$  ve  $w_\beta$  değerlerine ilişkin sonuçlar kabul edilmiştir.

### 6.2.1. Matematiksel model ve sezgisel yöntemin karşılaştırmalı sonuçları

Rastgele türetilmiş küçük problem örnekleri için matematiksel modelin ve sezgisel yöntemin ürettiği sonuçlar Tablo

4'te verilmektedir. Önceliklendirilmiş iki amaç fonksiyonu için en iyi çözümü yakalamak adına Pareto optimal sonuçlar raporlanmıştır. Tablo 4'te, her bir problem örneği için; matematiksel modelin ve sezgisel yöntemin sonuçları verilmektedir. Tabloda matematiksel modelin sonuçları için; ağırlıklı  $C_p^{max}$  toplamı, toplam maliyet,  $M1$  ve  $M2$  modelleri için optimalden uzaklık (gap), ve çalışma süresi bilgileri bulunmaktadır. Tabloda sezgisel yöntemin sonuçları için; ağırlıklı  $C_p^{max}$  toplamı, maliyet bilgileri ve bu amaç fonksiyonu değerlerinin matematiksel model ile elde edilen amaç fonksiyonu değerlerinden yüzde sapmaları (sapma1 ve sapma2 sütunlarında) verilmektedir. Bu bölümdeki tüm örnekler için sezgisel yöntem 1 saniyeden kısa sürede sonuç vermiştir.

Tablo 4'te görüldüğü gibi, az sayıda iş içeren küçük boyutlu problemler için ( $|N| \leq 10$ ) matematiksel model ile kabul edilebilir sürede optimal (her iki model için gap değerinin 0 olduğu) sonuçlar elde edilirken, iş sayısının 15 olduğu örnekler için,  $M2$  modelinin verilen zaman sınırında optimal sonuç bulamadığı gözlenmiştir. İş sayısının 15 olduğu örneklerde, verilen zaman sınırında  $M1$  modelinin sonucunun optimalden uzaklığının (gap) %14-20 arasında olduğu,  $M2$  modelinin sonucunun optimalden uzaklığının ise %30,5'a kadar yükseldiği görülmüştür. İş sayısının 20 olduğu örnekler için ise, verilen zaman sınırında  $M2$  modeli  $M1$  modelinin çözümünden daha düşük toplam maliyete sahip bir çözüm üretilmemiştir. Sezgisel çözüm yönteminden elde edilen sonuçlar, matematiksel modelden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında, sezgisel yöntem ile 1 saniyeden kısa sürede ağırlıklı  $C_p^{max}$  toplamı için ortalama %12.06, en yüksek %24.52 sapmaya sahip, iyi sonuçlar elde edildiği sonucuna ulaşılmaktadır. Sezgiselin sonuçlarında toplam maliyet açısından iyileştirme

yapılması gelecek çalışma olarak planlanmaktadır.

### 6.2.2. Rastgele türetilmiş büyük problem örnekleri için sezgisel sonuçları

Rastgele türetilmiş büyük problem örnekleri için sezgisel yöntem ile elde edilen sonuçlar Tablo 5'te verilmektedir. Bu bölümdeki tüm örnekler için sezgisel yöntem 1 saniyeden kısa sürede sonuç vermiştir. Tablo 5'te görüldüğü gibi; iş sayısı arttıkça, ağırlıklı  $C_p^{\max}$  toplamı ve maliyet artmaktadır. Aynı iş sayısı için, teknisyen sayısı arttıkça ekip sayısının artması, ekip başına düşen iş sayısının azalması ve böylelikle işlerin daha erken tamamlanabilmesi nedeniyle ağırlıklı  $C_p^{\max}$  toplamının azaldığı fakat ekip sayısının artması nedeniyle üçgen eşitsizliğine bağlı olarak seyahat maliyetinin artmasından dolayı toplam maliyetlerin arttığı gözlemlenmiştir.

### 6.2.3. Gerçekçi problem örnekleri için sezgisel sonuçları

Sezgisel çözüm yönteminin gerçekçi problem örnekleri için değerlendirilmesinde, öncelikle ekip oluşturmanın sistematik yapılmasının katkısı analiz edilmiştir. Her gerçekçi problem örneği için, hâlihazırda şirket tarafından kurulmuş olan mevcut ekipler kullanılarak sezgisel yöntemin son iki adımının koşulması sonucunda elde edilen sonuçlar ile ekip oluşturulmasının da sezgisel yöntem tarafından gerçekleştirildiği sonuçlar Tablo 6'da verilmektedir. Tablo 6'da her bir örnek

için elde edilen her iki sonuç için; ekip sayısı ( $|E|$ ), atanamayan iş sayısı ( $|N^-|$ ), ağırlıklı  $C_p^{\max}$  toplamı ve maliyet bilgileri sunulmaktadır. Sonuçlarda, herhangi bir iş için gecikme durumu olmaması ve bu örneklerde fazla mesai zaman sınırı ile normal mesai zaman sınırının birbirine eşit olması nedeniyle, Tablo 6'da maliyet sütununda verilen bilgi seyahat maliyetini ifade etmektedir. Sonuçlarda atanamayan işlerin bulunmasının nedeni, ekiplerin günlük mesai süre limitlerinin dolması veya bazı işlerin yetenek gereksinimlerinin mevcut ekipler tarafından karşılanamamasıdır. İş sayısı 40 ve 52 olan problem örnekleri için, sezgisel ile oluşturulan ekiplerin sayıları, mevcut ekiplerin sayısından daha fazladır. Bu durum, ağırlıklı  $C_p^{\max}$  toplamında azalma sağlamıştır. Bu örneklerde sezgisel ile oluşturulan ekipler ile elde edilen sonuçlarda maliyetlerin daha yüksek olmasının sebebi ise, ekip sayısının daha fazla olmasıdır. İş sayısı 335 ve 403 olan problem örnekleri için ise, ekip oluşturmanın sezgisel yöntem tarafından gerçekleştirildiği sonuçlarda atanamayan iş sayısı, sırasıyla, %40 ve %74 daha düşüktür. Bu örnekler için, ağırlıklı  $C_p^{\max}$  toplamı değerinin mevcut ekipler kullanıldığında daha düşük olmasının sebebi, ekiplere atanabilen iş sayısının daha düşük olmasıdır. Sezgiselin kurduğu ekipleri içeren sonuçlarda maliyetlerin daha yüksek olmasının nedeni ise, hem daha fazla işin ekiplere atanması hem de ekip sayısının daha fazla olmasıdır.

**Tablo 4.** Matematiksel model ile sezgisel yöntemin rastgele türetilmiş küçük problem örnekleri kullanılarak karşılaştırılması

N	P	Matematiksel Model					Sezgisel Yöntem			
		Ağırlıklı $C_p^{\max}$ Toplamı	M1 Gap (%)	Toplam Maliyet (TL)	M2 Gap (%)	Süre (dk.)	Ağırlıklı $C_p^{\max}$ Toplamı	Sapma1 (%)	Toplam Maliyet (TL)	Sapma2 (%)
3	2	37	0	3,68	0	<1	37	0	3,68	0
3	3	137	0	3,68	0	<1	137	0	3,68	0
10	2	67	0	20,7	0	<1	79	17,39	20,8	0,48
10	3	244	0	20,7	0	<1	263	7,78	21,16	2,2
10	4	596	0	20,7	0	<1	647	8,56	21,16	2,2
15	2	71	14,08	21,62	30,50	240	83	16,90	28,06	30,4
15	3	243	19,75	21,16	11,10	240	276	13,58	29,9	41,3
15	4	545	18,35	23,46	3,54	240	677	24,22	25,76	9,8
20	2	118	91,24	31,28	91,24	240	123	4,24	38,64	23,5
20	3	356	58,99	25,76	58,99	240	411	15,44	39,56	61,33
20	4	893	91,60	23,9	91,60	240	1112	24,52	39,56	65,52

**Tablo 5.** Rastgele türetilmiş büyük ölçekli problem örnekleri için sezgisel yöntem ile elde edilen sonuçlar

N	M	Ağırlıklı $C_p^{\max}$ toplamı	Toplam Maliyet (TL)
200	100	259.600	2.173
300		257.860	2.432
400		283.290	2.489
300	200	257.240	5.297
400		265.430	5.320
500		269.160	5.543
300	300	249.200	7.985
400		253.780	7.626
500		275.630	7.502

**Tablo 6.** Mevcut ekipler ile alınan sezgisel sonuçları ve ekiplerin de sezgisel ile oluşturulmasıyla alınan sezgisel sonuçları

Mevcut ekipler ile alınan sonuçlar							Sezgisel ile oluşturulan ekipler ile alınan sonuçlar				
N	P	M	E	N <sup>-</sup>	Ağırlıklı $C_p^{\max}$ toplamı	Maliyet (TL)	E	N <sup>-</sup>	Ağırlıklı $C_p^{\max}$ toplamı	Maliyet (TL)	
40	14	31	7	6	3.672	67	15	6	2.292	267	
52	18	38	7	9	8.495	201	43	9	2.105	904	
335	57	68	41	223	25.129	604	42	88	25.471	1.442	
403	75	96	45	259	28.244	671	52	69	38.483	1.779	

## 7. Sonuç ve Değerlendirme

Çalışmamızda; genelde, teknisyenlerin müşteri noktalarında sundukları servis hizmetleri, evde sunulan sağlık hizmetleri, güvenlik şirketlerinin sundukları kontrol hizmetleri vb. alanlarda gözlenen yerinde servis hizmetlerinde, özelde ise, enerji dağıtım sektöründe operasyonel düzeyde gözlemlenen işgücü çizelgeleme ve

rotalama problemi ele alınmıştır. Literatürde yer alan diğer çalışmalardan farklı olarak, çalışmamızda; farklı coğrafi konumlarda bulunan, farklı yetenek gereksinimlerine ve önceliklere sahip işlerin, farklı yeteneklere sahip teknisyenlerden işlerin ihtiyaçlarına uygun olarak oluşturulan ekiplere atanması ve ekiplerinin günlük rotalarının belirlenmesi hedeflenmiştir.

Gerçek hayatta karşılaşılan probleme benzer şekilde iki öncelikli amaç ele alınmıştır. Birinci öncelikli amaç, önceliklerine göre ağırlıklandırılmış iş sınıflarının tamamlanma sürelerinin ağırlıklı toplamını en küçüklemektir. İkinci öncelikli amaç ise; günlük operasyonel maliyetleri en küçüklemektir.

Çalışmamızda, öncelikle problem için bir matematiksel model geliştirilmiştir. Ancak matematiksel modelin büyük ölçekli problem örnekleri için kabul edilebilir sürede kaliteli sonuçlar üretememesi nedeniyle bir sezgisel yöntem geliştirilmiştir.

Sezgisel yöntem, hem rastgele türetilmiş hem de gerçekçi veriler üzerinde test edilmiş, hızlı ve çözüm kalitesi yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Gerçekçi problem örnekleri için, mevcut ekipler kullanılarak sezgisel yöntemin bulunduğu sonuçlar ile ekiplerin de sezgisel yöntem tarafından oluşturulduğu sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ekiplerin de sezgisel yöntem kullanılarak oluşturulması ile daha fazla işin ekiplere atanabildiği ve işlerin daha kısa sürede tamamlandığı gözlenmiştir.

#### Teşekkür

Bu çalışma, 117M577 No'lu TÜBİTAK 3501 projesi tarafından desteklenmiştir. Çalışmanın çeşitli aşamalarındaki katkılarından dolayı Seray Çakırgil'e teşekkür ederiz.

#### Kaynakça

- [1] Fikar, C. and Hirsch P., 2016. Home health care routing and scheduling: A review, *Computers & Operations Research*, 77, 86-95, 2017.
- [2] Cheng, E. and Rich, J. L., 1998. A home health care routing and scheduling problem, Technical Report 98-04, Computational and Applied Mathematics, Rice University

- [3] Eueborn, P, Rönnqvist, M, Einarsdottir, H, Eklund, M, Lidén, K, Almroth, M., 2009. Operations Research Improves Quality and Efficiency in Home Care, *Interfaces*, Vol. 39, No. 1, 18-34, DOI 10.1287/inte.1080.0411
- [4] Cordeau, J.-F., Laporte, G., Pasin, F., and Ropke, S., 2010. Scheduling Technicians and Tasks in a Telecommunications Company, *Journal of Scheduling*, 13, 393-409. 18
- [5] Misir, M., Smet, P., Verbeeck, K., and Vanden Berghe, G. 2011. Security personnel routing and rostering: a hyper-heuristic approach. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Applied Operational Research*, ICAOR2011, Istanbul, Turkey, pages 193-205
- [6] Allaoua, H., Borne, S., L'etocart, L., and Calvo, R. W., 2013. A matheuristic approach for solving a home health care problem, *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 41 (0):471 - 478, 2013
- [7] Kovacs, A., Parragh, A. A., 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.
- [8] Trautsamwieser, A., & Hirsch, P., 2014. A branch-price-and-cut approach for solving the medium-term home health care planning problem, *Networks* 64(3), 143-159
- [9] Zamorano, E., & Stolletz, R., 2016. Branch-and-price approaches for the Multiperiod Technician Routing and Scheduling Problem, *European Journal of Operational Research*, 257(1), 55-68
- [10] Firat, M. and Hurkens, C. A. J., 2012. An improved MIP-based approach for a multi-skill workforce scheduling problem, *Journal of Scheduling*, vol. 15, pp. 363-380

- [11] Rasmussen, M. S., Justesen, T., Dohn, A., & Larsen, J. (2012). The home care crew scheduling problem: Preference-based visit clustering and temporal dependencies. *European Journal of Operational Research*, 219(3), 598–610
- [12] Hiermann, G., Puchinger, J., Ropke, S., and Hartl, R. F., 2015. The Electric Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations, *Transportation Science*. In press.
- [13] Misir, M., Smet, P., & Vanden Berghe, G., 2015. An analysis of generalised heuristics for vehicle routing and personnel rostering problems. *Journal of the Operational Research Society*, 66(5), 858–870.
- [14] Fosgerau, M., Engelson, L., 2011. The value of travel time variance. *Transportation Research Part B* 45, 1–8.
- [15] Bostel, N., Dejax, P., Guez, P., & Tricoire, F., 2008. Multiperiod planning and routing on a rolling horizon for field force optimization logistics. In Bruce Golden, S. Raghavan, & Edward Wasil (Eds.). *The vehicle routing problem: Latest advances and new challenges* (43, pp. 503–525).
- [16] Barrera, D., Velasco, N., & Amaya, C.-A., 2012. A network-based approach to the multi-activity combined timetabling and crew scheduling problem: Workforce scheduling for public health policy implementation. *Computers & Industrial Engineering*, 63(4), 802–812.
- [17] 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
- [18] Francis, P.M., Smilowitz, K.R., Tzur, M., 2008. The period vehicle routing problem and its extensions. In: Golden BL, Raghavan S, Wasil E, editors. *The vehicle routing problem: latest advances and new challenges*.
- [19] Blakeley, F., Bozkaya, B., Cao, B., Hall, W., Knolmayer, J., 2003. Optimizing periodic maintenance operations for Schindler Elevator Corporation. *Interfaces* 33 (1), 67–79
- [20] Tang, H., Millerhooks, E. and Tomastik, R., 2007. Scheduling technicians for planned maintenance of geographically distributed equipment. *Transportation Research Part E – Logistics and Transportation Review* 43 (2007) 591–609
- [21] Shao, Y., Jonathan, F. B. and Jarrah, A. I., 2012. The therapist routing and scheduling problem, *IIE Trans. Oper. Eng. Anal.* 44 (10) (2012) 868–893
- [22] Bard, J. F., Shao, Y. and Jarrah, A. I., 2014. A sequential GRASP for the therapist routing and scheduling problem, *J. Sched.* 17 (2) (2014) 109–133.
- [23] Hindle, T., Hindle, A., Spollent, M., 2000. Resource allocation modelling for homebased health and social care services in areas having differential population density levels: a case study in Northern Ireland. *Health Services Management Research* 13, 164–169
- [24] Rest K. D., Hirsch P., 2015. Daily scheduling of home health care services using time-dependent public transport, *Flexible Services and Manufacturing Journal*.
- [25] Lanzarone, E., Matta, A., 2014. Robust nurse-to-patient assignment in home care services to minimize overtimes under continuity of care, *Oper. Res. Health Care* 3 (2), 48–58.
- [26] 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

[27] Dutot, P., Laugier, A. & Bustos, A., 2006. Technicians and Interventions Scheduling for Telecommunications. Technical report, France Telecom R&D. 18

### Ekler

**Ek A.** Sezgisel Yöntem için Notasyon

$N^s$  : Sıralı işler kümesi

$\tau$  : Günlük mesai süresi

$M$  : Atanmamış teknisyen kümesi

$Q$  : Yetenek kümesi

$E$  : Ekip kümesi

$w_i$  :  $i \in N$  işinin ait olduğu iş öncelik sınıfının ağırlığı

$f_i$  :  $i \in N$  işinin zaman sınırına kalan süre

$Q_i^l$  :  $i \in N$  işi için gerekli yetenek kümesi

$p_i$  :  $i \in N$  işinin işlem süresi

$t_{ij}$  :  $i$  ve  $j$  işleri arası süre bazında mesafe,

$\forall (i, j) \in A$

$u_{iq}$  : İş - yetenek matrisi

$g_{mq}$  : Teknisyen - yetenek matrisi

$N^-$  : Atanamayan işler kümesi

$N_e$  :  $e \in E$  ekibine atanan işler kümesi

$N_e^s$  :  $e \in E$  ekibi için sıralı işler kümesi

$t_e$  :  $e \in E$  ekibinin toplam rotalama ve işlem süresi

$Y_m$  : İşin gerektirdiği ve  $m \in M$  teknisyenin sahip olduğu yetenek sayısı

$Y_m^+$  : İşin gerektirmediği ancak  $m \in M$  teknisyenin sahip olduğu yetenek sayısı

$m^*$  : En uygun teknisyen

$Y_e^-$  : İşin gerektirdiği ancak  $e \in E$  ekibinin sahip olmadığı yetenek sayısı

$Y_e^+$  : İşin gerektirmediği ancak  $e \in E$  ekibinin sahip olduğu yetenek sayısı

$e^*$  : En uygun ekip

**Ek B.** Algoritma 1 - Ekiplerin oluşturulması ve ekiplere ilk işlerinin atanması

**Girdi:**  $N^s$ ;  $M$ ;  $Q$ ;  $p_i, \forall i \in N$ ;  $u_{iq}, \forall i \in$

$N, q \in Q$ ;  $g_{mq}, \forall m \in M, q \in Q$

**Çıktı:**  $N_e$ ;  $N^-$ ;  $E$ ;  $t_e, \forall e \in E$

$E \leftarrow \emptyset$

$N^- \leftarrow \emptyset$

**Her bir  $i \in N^s$  için yap**

$e \leftarrow \emptyset$

$N_e \leftarrow \emptyset$

$Q_i^l = \{q \in Q | u_{iq} = 1\}$

**Koşul  $Q_i^l > 0$  iken**

**Her bir  $m \in M$  için yap**

$Y_m \leftarrow 0$

$Y_m^+ \leftarrow 0$

**Her bir  $q \in Q$  için yap**

**Eğer  $u_{iq} = 1$  ve  $g_{mq} = 1$  ise**

$Y_m \leftarrow Y_m + 1$

**Son eğer**

**Eğer  $u_{iq} = 0$  ve  $g_{mq} = 1$  ise**

$Y_m^+ \leftarrow Y_m^+ + 1$

**Son eğer**

**Son için**

**Son için**

$m^* = \operatorname{argmax}_{m \in M} \{Y_m - Y_m^+\}$

**Eğer  $m^* = \text{null}$  ise**

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

**Değilse**

$Q_i^l \leftarrow Q_i^l \setminus \{q \in Q | g_{m^*q} = 1\}$

$e \leftarrow e \cup m^*$

$M \leftarrow M \setminus m^*$

**Son eğer**

**Son koşul**

$E \leftarrow E \cup \{e\}$

$N_e \leftarrow N_e \cup \{i\}$

$t_e \leftarrow p_i$

**Son için**

**Ek C.** Algoritma 2 - Oluşturulan ekiplere kalan işlerin atanması

**Girdi:**  $N^-$ ;  $E$ ;  $Q$ ;  $p_i, f_i, \forall i \in N$ ;  $t_e, N_e,$

$\forall e \in E$ ;  $u_{iq}, \forall i \in N, q \in Q$ ;  $g_{tq}, \forall t \in$

$M, q \in Q$

**Çıktı:**  $N^-$ ;  $t_e, N_e, \forall e \in E$

**Her bir  $i \in N^-$  için yap**

**Her bir  $e \in E$  için yap**

**Her bir  $q \in Q$  için yap**

**Eğer  $u_{iq} = 1$  ve  $g_{eq} = 0$  ise**

$Y_e^- \leftarrow Y_e^- + 1$

**Son eğer**

**Eğer  $u_{iq} = 0$  ve  $g_{eq} = 1$  ise**

$Y_e^+ \leftarrow Y_e^+ + 1$

**Son eğer**

**Son için**

**Son için**

**Eğer  $(t_e + p_i \leq f_i)$  ise**

$e^* = \operatorname{argmax}_{e \in E} \{Y_e^+ | Y_e^- = 0\}$

**Son eğer**

**Eğer  $(e^* \neq \text{null})$  ise**

$t_e \leftarrow t_e + p_i$

$N_e \leftarrow N_e \cup \{i\}$

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

**Son eğer**

**Son için**

**Ek D.** Algoritma 3 - Ekiplerin rotalarının belirlenmesi

**Girdi:**  $E; N^-; \tau; N_e, \forall e \in E; p_i, f_i, w_i, \forall i \in N; t_{ij}, \forall (i, j) \in A$

**Çıktı:**  $N^-, N_e^s, \forall e \in E$

**Her bir  $e \in E$  için yap**

$N_e^s \leftarrow \emptyset$

$k \leftarrow 0$

$t_e \leftarrow 0$

**Koşul  $N_e \neq \emptyset$  iken**

$i \leftarrow \arg \min_{\{i \in N^+\}} \left\{ \frac{f_i - p_i - t_e}{w_i} \right\}$

**Eğer ( $t_e + t_{ki} + p_i \geq \tau$ ) ise**

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

**Değilse**

$N_e^s \leftarrow N_e^s \cup \{i\}$

$t_e \leftarrow t_e + t_{ki} + p_i$

$k \leftarrow i$

**Son eğer**

$N_e \leftarrow N_e \setminus \{i\}$

**Son koşul**

**Son için**