



A meta-heuristic solution approach based on mathematical programming for tour scheduling problems involving flexible scheduling policies

Şeyda Topaloğlu Yıldız^{1*}, Mustafa Avcı^{1,2}, Gökalp Yıldız¹

¹Department of Industrial Engineering, Dokuz Eylül University, İzmir, 35397, Turkey

²Department of Industrial Engineering, İzmir Bakırçay University, İzmir, 35665, Turkey

Highlights:

- A new personnel tour scheduling problem involving all flexible scheduling policies is addressed
- A new meta-heuristic solution approach based on mathematical programming is developed
- The effectiveness of the solution approach is analyzed on the test problems

Keywords:

- Tour scheduling problem
- Meta-heuristic
- Mat-heuristic
- Flexible scheduling policies

Article Info:

Research Article
Received: 18.12.2019
Accepted: 20.10.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.660960

Acknowledgement:

This study was supported by Dokuz Eylül University within the scope of BAP numbered 2017.KB.FEN.024.

Correspondence:

Author: Şeyda Topaloğlu Yıldız
e-mail:
seyda.topaloglu@deu.edu.tr
phone: +90 232 301 7611

Graphical/Tabular Abstract

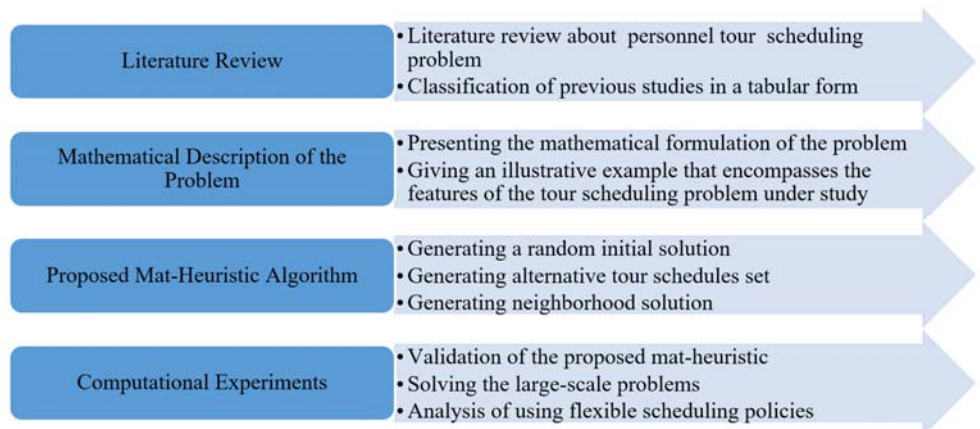


Figure A. The framework of the study

Purpose: The main purpose of this study is to develop a general solution method for the continuous personnel tour scheduling problem which includes flexible scheduling policies simultaneously such as, flexible shift start times, shift start time band, break time windows, different shift lengths/working day patterns and part time personnel.

Theory and Methods:

A meta-heuristic solution approach based on mathematical programming (mat-heuristic) has been developed for solving the problem. Within this approach, a variable neighborhood search based local search algorithm with the ability to search different points of the solution space and a fast and efficient algorithm that combines the optimization possibilities of mathematical programming are designed.

Results:

According to the numerical experiments, it has been observed that the set-covering model is inadequate in solving most problems. It is also seen that “break time windows” flexible scheduling policy decreases the objective function value more than “shift start time band” flexible scheduling policy. In addition, experimental results show that the increase in the number of “part time personnel” decreases the total personnel cost.

Conclusion:

Experimental studies show that the developed solution approach can be used effectively in solving large-scale continuous tour scheduling problems with all flexible scheduling policies mentioned above. Furthermore, the developed mat-heuristic algorithm designed for the tour scheduling problem can be considered a new method for solving other problems that can be modeled by set-covering formulation.



Esnek çizelgeleme politikalarını içeren tur çizelgeleme problemleri için matematiksel programlama tabanlı meta-sezgisel bir çözüm yaklaşımı

Şeyda Topaloğlu Yıldız^{1*}, Mustafa Avcı^{1,2}, Gökalp Yıldız¹

¹Endüstri Mühendisliği Bölümü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 35397, Türkiye

²Endüstri Mühendisliği Bölümü, İzmir Bakırçay Üniversitesi, İzmir, 35665, Türkiye, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Tüm esnek çizelgeleme politikalarını içeren yeni bir personel tur çizelgeleme problemi ele alınmıştır
- Matematiksel programlama tabanlı yeni bir meta-sezgisel çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir
- Çözüm yaklaşımının etkinliği test problemleri üzerinde analiz edilmiştir

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 18.12.2019
Kabul: 20.10.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.660960

Anahtar Kelimeler:

Tur çizelgeleme problemi,
meta-sezgisel,
mat-sezgisel,
esnek çizelgeleme
politikaları

ÖZET

Müşteri talebinin gün içinde ve iş günleri arasında değiştiği hastane, banka, restoran, havaalanı, süpermarket, çağrı merkezi gibi hizmet sistemlerinde, çalışan personelin nasıl çizelgeneceği konusu büyük önem taşımaktadır. Bu tür sistemlerde personel çizelgelemenin amacı, personeli, belli bir hizmet seviyesini sağlayacak şekilde, istenilen zamanda ve gereksinim duyulan minimum sayıda / minimum maliyet ile görevlendirebilmektir. Bu personel çizelgeleme problemi, ilgili literatürde personel Tur Çizelgeleme Problemi (TÇP) olarak adlandırılmaktadır. TÇP çözüldüğünde, ilgili çizelgeleme döneminde, gün içinde ve iş günleri arasında değişen müşteri talebine göre personel gereksinimini karşılayacak olan personel çalışma programları, yani tur çizelgeleri, elde edilmektedir. Hizmet sistemleri, daha düşük maliyetli personel çizelgeleri oluşturabilmek için, Esnek Vardiya Başlangıç Zamanları (EVBZ), Vardiya Başlangıç Zamanı Bandı (VBZB), Mola Zamanı Pencere (MZP), Farklı Vardiya Uzunlukları (FVU) / Çalışma Günü Kalıpları (ÇGK), Yarı Zamanlı Personel (YZP) gibi esnek çizelgeleme politikaları uygulamaktadır. Bu çalışmanın ana amacı, bu esnek çizelgeleme politikalarını aynı anda ele alan TÇP için genel bir çözüm yöntemi geliştirmektir. Bu amaca yönelik olarak bahsi geçen özellikleri taşıyan TÇP için, uygun hesaplama sürelerinde iyi çözümler üretebilen matematiksel programlama tabanlı bir meta-sezgisel algoritma (mat-sezgisel) geliştirilmiştir. Sonrasında, önerilen çözüm yönteminin etkinliği sayısal analizler ile test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen yöntemin, bu tip problemlerin çözümünde etkin bir biçimde kullanılabileceğini göstermektedir.

A meta-heuristic solution approach based on mathematical programming for tour scheduling problems involving flexible scheduling policies

H I G H L I G H T S

- A new personnel tour scheduling problem involving all flexible scheduling policies is addressed
- A new meta-heuristic solution approach based on mathematical programming is developed
- The effectiveness of the solution approach is analyzed on the test problems

Article Info

Received Article
Received: 18.12.2019
Accepted: 20.10.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.660960

Keywords:

Tour scheduling problem,
meta-heuristic,
mat-heuristic,
flexible scheduling policies

ABSTRACT

In service systems such as hospitals, banks, restaurants, airports, supermarkets, call centers, where customer demand changes during the day and between business days, the issue of how to schedule the employees is of great importance. The purpose of personnel scheduling in such systems is to assign the personnel at the required time and with the minimum number / minimum cost to provide a certain level of service. This personnel scheduling problem is called Personnel Tour Scheduling Problem (TSP) in the related literature. When the TSP is solved, the personnel schedules, i.e. tour schedules, which meet the personnel requirement according to customer demand varying during the day and between business days, are obtained in the relevant scheduling period. Service systems implement flexible scheduling policies such as, Flexible Shift Start Times (FSST), Shift Start Time Band (SSTB), Break Time Windows (BTW), Different Shift Lengths (DSL) / Working Day Patterns (WDP), Part Time Personnel (PTP), to create lower cost personnel schedules. The main purpose of this study is to develop a general solution method for the TSP that deals with these flexible scheduling policies simultaneously. For this purpose, a meta-heuristic algorithm based on mathematical programming (mat-heuristic) has been developed which can produce good solutions within appropriate computational times for the TSP including the mentioned characteristics. Then, the effectiveness of the proposed solution method has been tested by computational analysis. The results show that the developed method can be used effectively in solving such problems.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / *Corresponding Author/Authors: *seyda.topaloglu@deu.edu.tr, mustafa.avci@bakircay.edu.tr, gokalp.yildiz@deu.edu.tr /

Tel: +90 232 301 7611

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde, hizmet sektöründe faaliyet gösteren firmaların temel maliyet unsuru iş gücüdür. Bu sebeple, hizmet sistemlerinin büyük çoğunluğu için en maliyetli kaynak olan iş gücünün verimli bir şekilde kullanılması çok büyük önem taşımaktadır. Etkin bir personel çizelgeleme ile iş gücü maliyetleri önemli ölçüde azaltılabileceği gibi hem yüksek müşteri hizmet seviyesi hem de çalışan memnuniyeti sağlanabilir [1]. Personel Tur Çizelgeleme Problemi (TÇP), hastane, banka, restoran, havaalanı, süpermarket, çağrı merkezi gibi gün içinde ve iş günleri arasında değişen müşteri talebine sahip olan organizasyonlarda ortaya çıkan bir problemdir. TÇP, ilgili çizelgeleme dönemi içinde karşılaşılan değişken müşteri talebini karşılamak için, personelin hangi günlerde ve günün hangi saatlerinde çalışacağına belirlenmesi kararlarından oluşmaktadır [2]. Bu problemin çözümünde dikkate alınan amaç, belli bir hizmet seviyesi için ihtiyaç duyulan personel sayısını ya da personel maliyetini en küçükleme. Tur çizelgesi kavramı çalışma günlerini, çalışma günlerinde çalışılacak olan vardiyaları ve bu vardiyalarda verilen molaları ifade etmekte kullanılmaktadır.

Hizmet sisteminin çizelgeleme dönemi, personel planlamasının yapılacağı dönemi kapsamakta ve uzunluğu genellikle bir hafta olarak kabul edilmektedir. Planlama periyodu ise gün içindeki talep değişkenliğini yansıtmak için kullanılan zaman dilimlerini ifade etmektedir. Örneğin, 24 saat çalışan bir hizmet sisteminde, talep yapısı saatte bir değişiklik gösteriyor ise bu sistemde planlama periyodu bir saattir ve gün içindeki toplam planlama periyodu sayısı 24'tür. Hizmet sistemleri, değişken talebi daha düşük maliyetli bir şekilde karşılayabilmek için, çeşitli esnek çizelgeleme politikalarına başvurumaktadırlar [2]. Bu esnek çizelgeleme politikalarının birincisi Esnek Vardiya Başlangıç Zamanları (EVZ) uygulamasıdır. Bu uygulama ile tur çizelgesindeki her çalışma günü için farklı vardiya başlangıç zamanları belirlenebilir. Ancak bu esnek çizelgeleme politikası, personelin çalışma günlerinde, vardiyalarına çok farklı saatlerde başlamalarına sebep olabilir. Çalışan personel açısından dezavantajlı olabilecek bu durum, Vardiya Başlangıç Zamanı Bandı (VBZB) uygulamasıyla sınırlandırılabilir. Bu uygulama ile her bir alternatif tur çizelgesi için, vardiyaların, daha önceden tanımlanmış VBZB içinde yer alan herhangi bir planlama periyodunda başlatılması sağlanır. İkinci esnek çizelgeleme politikası Mola Zamanı Pencere (MZP) uygulamasıdır. Bu uygulama ile personele, çalıştığı vardiyada, belirlenmiş MZP'nin içinde yer alan herhangi bir planlama periyodunda mola ataması yapılabilmektedir. Üçüncü esnek çizelgeleme politikası tur çizelgelerinin oluşturulmasında Farklı Vardiya Uzunlukları (FVU) / Çalışma Günü Kalıpları (ÇGK) uygulamasıdır. Örneğin 8 saatlik vardiyada çalışan bir kişi haftada 5 gün çalışırken, 10 saatlik vardiyada çalışan bir kişi haftada 4 gün çalışabilmektedir. Ayrıca bu çalışma günleri, haftanın iş günleri arasından, toplam çalışılması gereken gün sayısını

sağlayacak şekilde personele atanabilmektedir. Dördüncü esnek çizelgeleme politikası ise, Tam Zamanlı Personelin (TZP) yanında Yarı Zamanlı Personelin (YZP) de istihdam edilmesidir. TÇP'ler, hizmet sistemine ilişkin günlük çalışma süresinin 24 saatten az olması durumunda kesikli, 24 saat olması durumunda ise sürekli olarak sınıflandırılmaktadır. Kesikli TÇP'de vardiya başlangıç ve bitiş zamanları aynı gün içinde olmak zorundayken, sürekli TÇP'de ise vardiya bitiş zamanları bir sonraki güne sarkabilmektedir. Ayrıca, TÇP'ler iş gücü yapısına göre homojen veya karışık olarak sınıflandırılmaktadır. Homojen TÇP'de yalnızca TZP dikkate alınırken, karışık TÇP'de, YZP'de dikkate alınmaktadır. TÇP'nin çözümü için bugüne kadar çeşitli çözüm yöntemleri geliştirilmiştir. Bu çalışmalar ile ilgili literatür derlemeleri Alfares [1] ve Van den Bergh vd. [2] tarafından yapılmıştır. TÇP ilk olarak Dantzig [3] tarafından önerilen küme-kapsama formülasyonu ile modellenmiştir. Probleme ilişkin önerilen çözüm yöntemleri altı farklı kategoride incelenebilir. Bu kategoriler, tamsayı programlama, örtülü modelleme, hedef programlama, kesin çözüm yöntemleri, sezgisel yöntemler ve meta-sezgisel yöntemler olarak sıralanabilmektedir.

Tur çizelgeleme için en çok uygulanan çözüm yöntemlerinden biri tamsayı programlamadır. Beaumont [4] sürekli ve karışık bir gerçek hayat TÇP'si için tamsayı programlama modeli geliştirmiştir. Mason vd. [5], havaalanı çalışanlarına ilişkin TÇP için çok aşamalı bir yöntem önermiştir. Bir başka gerçek hayat problemi Alfares [6] tarafından tamsayı programlama kullanılarak çözülmüştür. Bu çalışmada, bir uçak bakım ekibinin tur çizelgeleri belirlenmiştir. Lin vd. [7] bir çağrı merkezinin çalışanlarının çizelgenmesi için üç aşamadan oluşan bir çözüm yöntemi geliştirmiştir. Yöntemin ilk aşamasında, regresyon ve benzetim kullanılarak gelen arama sayılarının saatlik gerekli çalışan sayısına dönüştürülmesi sağlanmıştır. Daha sonra, tamsayı programlama kullanılarak mola zamanları belirlenmiştir. En son aşamada ise vardiya ve aylık çalışma günleri, Burns ve Carter [8] algoritmasının geliştirilmesiyle elde edilmiştir. Başka bir tamsayı çözümleme yaklaşımı Brusco ve Jacobs [9] tarafından geliştirilmiştir. Bu çalışmada vardiya başlangıç zamanı kararlarının sürekli TÇP'deki etkileri analiz edilmiştir. Bard [10], farklı yetenekte iş gücü içeren, karışık tipte bir TÇP için tamsayı programlama modeli önermiştir. Stoltetz [11], uçuş öncesi kontrol kontuarlarında çalışan personele ilişkin TÇP için tamsayı programlama modeli geliştirmiştir. Oluşturulan model, daha sonra çalışan tercihlerini de dikkate alarak genişletilmiştir. Rocha vd. [12] bir cam şişe fabrikasında iş yükü dengesinin dikkate alındığı TÇP'yi tamsayı programlama kullanarak modellemiştir. TÇP'deki karar değişkeni sayısını azaltmak amacı ile literatürde pek çok örtülü modelleme çalışması yapılmıştır. Bailey [13], her iş günü için vardiya atamalarını, çalışan sayısı kısıtı altında, alternatif ÇGK'ler ile birleştiren bir örtülü model geliştirmiştir. Bechtold ve Jacobs [14] MZP'ye sahip bir TÇP'yi modellemek için bir örtülü modelleme yaklaşımı önermiştir. Bu model daha sonra, Addou ve Soumis [15]

tarafından, olağandışı mola zamanı çakışmaları dikkate alınarak genişletilmiştir. Thompson [16], TÇP için iki adet örtülü tamsayı programlama modeli geliştirmiştir. Jacobs ve Bechtold [17], tur çizelgelemede EVBZ, MZP ve YZP gibi esnek çizelgeleme politikalarının dikkate alındığı problemler için örtülü tamsayı model geliştirmiştir. Jacobs and Bechtold [18], talep değişkenliğinin ve çizelgeleme esnekliğinin, iş gücü kullanımına etkilerini test etmek amacıyla örtülü modellemeyi kullanmıştır. Çalışma sonucunda, MZP ve FVU / ÇGK esnek çizelgeleme politikalarının iş gücü kullanımını önemli ölçüde etkilediği ortaya çıkmıştır. Jarrah vd. [19], haftalık kesikli TÇP'yi vardiya çizelgeleme problemlerine ayırıştırarak bir örtülü modelleme yaklaşımı geliştirmiştir. Önerilen model, Burns ve Carter [8] ve Bechtold ve Jacobs [14]'un çalışmalarının birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Jacobs ve Brusco [20], ilk defa VBZB'nin dikkate alındığı TÇP'ler için bir örtülü tamsayı model geliştirmiştir. Brusco ve Jacobs [21] hem VBZB hem de MZP esnek çizelgeleme politikalarını içeren sürekli TÇP için örtülü tamsayı model önermiştir. Topaloglu ve Ozkarahan [22], EVBZ, MZP, FVU / ÇGK esnek çizelgeleme politikalarının uygulandığı tur çizelgeleme problemleri için bir örtülü model sunmuştur. Rekik vd. [23], MZP ve VBZB esnek çizelgeleme politikalarını içeren TÇP'ler için bir örtülü model geliştirmiştir. Daha sonra problemin çözümü için Benders ayırıştırması temelli bir yöntem uygulanmıştır. Isken [24], sağlık kuruluşlarında karşılaşılan personel çizelgeleme problemlerinden yola çıkarak, TZP ve YZP içeren, EVBZ'ye izin verilen TÇP'ler için bir örtülü model önermiştir. Rong [25], farklı yetenekte iş gücü içeren aylık TÇP için örtülü modelleme yöntemi önermiştir. Rekik vd. [26], MZP ve EVBZ içeren bir iş gücü çizelgeleme problemi için örtülü modelleme yaklaşımı önermiştir.

Hedef programlama, birden fazla amacın optimize edilmesine olanak sağlayan bir matematiksel modelleme tekniğidir. Loucks ve Jacobs [27], hazır yiyecek satan bir restorana ilişkin iki amaçlı, karışık ve kesikli TÇP'yi ele almışlardır. Öncelikli hedef, iş gücü talebini minimum sayıda çalışanla karşılamaktır. İkincil hedef ise her çalışan için hedeflenen çalışma saatlerinden sapmayı en aza indirmektir. Bechtold ve Brusco [28] karışık TÇP için, bir ayırıştırma sezgiseli ve hedef programlamanın birlikte kullanılması ile elde edilen bir çözüm yöntemi önermiştir. Problemin öncelikli amacı iş gücü maliyetini en küçükmektir. İkincil amaç ise en erken ve en geç vardiya başlangıç zamanlarının kullanımını maksimize etmektir. Yöntemin ilk aşamasında hedef programlama kullanılarak haftanın her günü için bağımsız olarak vardiya çizelgeleri belirlenmiştir. Daha sonra vardiya çizelgeleme sonuçlarına Bechtold [29] tarafından önerilen yöntem uygulanarak çalışanların haftalık tatil günleri belirlenmiştir. Son olarak Bechtold ve Showalter [30] tarafından önerilen prosedür kullanılarak tur çizelgeleri elde edilmiştir. Brusco ve Johns [31], çözümü iki aşamalı olarak elde edilen, öncelikli bir hedef programlama yaklaşımı geliştirmiştir. Önerilen yöntem iki adet doğrusal programlama modelinin ardışık olarak çözülmesinden oluşmaktadır. Easton ve Rossin [32], personel maliyeti ile gereksinim duyulan personel sayısından

olan sapmalara ilişkin maliyetlerin toplamını en küçükmek amacıyla bir stokastik hedef programlama modeli geliştirmiştir. Modelin çözümü için bir tabu arama algoritması kullanılmıştır. Mathirajan ve Ramanathan [33], bir elektronik fabrikasının pazarlama personeline ilişkin TÇP için hedef programlama yaklaşımı uygulamıştır. Topaloglu ve Ozkarahan [34], TÇP'de çalışan tercihlerini de dikkate alan bir örtülü hedef programlama modeli önermiştir. TÇP'nin çözümü için sütun üretimi, dal-sınır ve dal-fiyat gibi çeşitli kesin çözüm algoritmaları geliştirilmiştir. Easton ve Rossin [35], TÇP'yi küçük bir tur setiyle çözen, sütun üretme temelli bir algoritma önermiştir. Love ve Hoey [36], geniş ölçekli TÇP'yi ağ-akış problemlerine ayırıştırıp çözüm elde etmiştir. Brusco [37], problemin çözümü için dual kesme düzlemi tabanlı bir çözüm yöntemi geliştirmiştir. Brusco ve Jacobs [38] küme-kapsama modelindeki gereksiz sütunları ortadan kaldıracak bir çözüm yöntemi önermiştir. Ni ve Abeledo [39], EVBZ uygulamasını içeren kesikli ve sürekli TÇP için bir dal-fiyat algoritması geliştirmiştir. Brunner ve Bard [40], posta dağıtım merkezlerinde çalışan personele ilişkin TÇP için bir dal-fiyat algoritması geliştirmiştir. Ele alınan problem, EVBZ ve MZP gibi esnek çizelgeleme politikalarını içermektedir. Brunner ve Stollitz [41], havaalanı çalışanlarına ilişkin kesikli TÇP için dal-fiyat algoritması geliştirmiştir. Ele alınan problem MZP'yi içermektedir. TÇP için doğrusal programlama tabanlı ve kurucu olmak üzere iki tür sezgisel çözüm yöntemi geliştirilmiştir. Henderson ve Berry [42], üç aşamalı bir doğrusal programlama sezgiseli önermiştir. İlk aşamada personele atanabilecek tur çizelgeleri belirlenmiştir. İkinci aşamada seçilen değişkenlerin ilave edildiği doğrusal programlama modeli çözülmüş ve son aşamada tüm değerler tamsayı haline getirilmiştir. Keith [43], TÇP için doğrusal programlama tabanlı üç aşamalı ekle-bırak sezgiselini geliştirmiştir. Doğrusal programlama tabanlı bir başka sezgisel algoritma Morris ve Showalter [44] tarafından geliştirilmiştir. Brusco ve Johns [45], kesikli TÇP'nin çözümünde ardışık tamsayı programlama tabanlı bir sezgisel metod uygulamıştır. Cezik vd. [46], farklı günlere ilişkin vardiya çizelgeleme problemlerini, bir ağ-akış modeli içinde birleştirerek bir karışık tamsayı programlama modeli oluşturmuştur. Goodale ve Thompson [47], farklı tur çizelgeleme sezgisellerini, maliyet ve verimlilik olarak farklılıklara sahip iş gücü içeren TÇP üzerinde test etmiştir. Literatürdeki diğer doğrusal programlama tabanlı sezgisel çözüm yaklaşımları Mabert ve Showalter [48] ve Thompson [49] tarafından önerilmiştir. Tur çizelgeleme problemlerinde doğrusal programlama tabanlı sezgisel algoritmaların yanında kurucu sezgisel algoritmalar da araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntemler genellikle kurma ve iyileştirme olmak üzere iki aşamadan oluşur. İlk aşamada, personelin tur çizelgelerine atamaları tüm periyotlardaki talep miktarları karşılanıncaya kadar adım adım yapılır. İkinci aşamada ise çeşitli sezgisel kurallar uygulanarak elde edilen sonuçta iyileştirmeler sağlanır. Loucks and Jacobs [27], bir hazır yemek lokantası personeline ilişkin TÇP için bir kurucu sezgisel algoritma önermiştir. Gopalakrishan vd. [50], bir gazetenin yarı zamanlı çalışanlarının çizelgelemesi için iki

aşamalı bir kurucu sezgisel önermiştir. Bechtold ve Brusco [51], üretim ve iyileştirme aşamalarından oluşan bir çözüm yöntemi önermiştir. Bu çalışmada kesikli TÇP için kurucu ve talep tabanlı sezgisel algoritmalar geliştirilmiştir. Rocha vd. [52], bir cam fabrikasındaki personel çizelgeleme problemi için bir kurucu sezgisel algoritma uygulamıştır. van der Veen vd. [53], problemin çözümünde, öncelikle hafta sonu vardiyalarının belirlendiği, sonrasında hafta içi vardiya atamalarının yapıldığı bir kurucu sezgisel algoritma önermiştir. Diğer kurucu tur çizelgeleme sezgiselleri Brusco ve Jacobs [54, 55], Thompson [56] ve Goodale ve Tunc [57] tarafından önerilmiştir. TÇP için sezgisel yöntemlerin yanı sıra meta-sezgisel algoritmalar da geliştirilmiştir. Easton ve Mansour [58], karışık tipte TÇP için bir dağıtılmış genetik algoritma önermiştir. Tanomaru [59], stokastik ve sezgisel operatörleri içeren bir genetik algoritmayı karışık tipte TÇP'ye uygulamıştır. Brusco ve Jacobs [54, 55] iki aşamalı tavlama benzetimi temelli bir algoritmayı sürekli tip TÇP için uygulamıştır. Brusco ve Jacobs [60] aynı algoritmayı MZP ve FVU / ÇGK durumlarını içeren TÇP'ye uygulamıştır. Goodale ve Tunc [57, 61] ve Easton ve Rossin [62], tavlama benzetimi algoritmasının uygulandığı diğer çalışmalarıdır. Jarrah vd. [19], örtülü modelin sonuçlarından yola çıkarak, mola zamanlarını vardiyalara atamak ve vardiyaları tur çizelgelerine atamak için tabu arama algoritması uygulamıştır. Brusco ve Johns [63], havaalanı çalışanlarının vardiya başlangıç zamanı seçimi ve tur çizelgeleri için tabu arama temelli bir sezgisel algoritma geliştirmiştir. Dahmen ve Rekik [64], karışık tipte iş gücü içeren TÇP için tabu arama ve dal-sınır algoritmalarının melezlemesinden oluşan bir çözüm yöntemi önermiştir. Diğer tabu arama tabanlı algoritmalar, Easton ve Rossin [32], Alvares-Valdes vd. [65] ve Gartner vd. [66] tarafından geliştirilmiştir. Son dönemde yapılan çalışmalar ise TÇP'lerde çok vasıflı-çok görevli çalışanların bulunduğu durumlara ve kesin çözüm yöntemlerine odaklanmıştır. Henaou vd. [67] çok vasıflı-çok görevli kesikli, Cuevas vd. [68] ise çok vasıflı-çok görevli sürekli TÇP'ler için karma tamsayılı programlama modelleri önermiştir. Bu modeller

vardiyaların ve izin günlerinin belirlenmesini, farklı görevlerin belirlenen bu vardiyalara atanmasını ve son olarak vardiyaların çalışanlara atanmasını sağlamaktadır. Restrepo vd. [69] çok vasıflı-çok görevli TÇP için dal-fiyat algoritması geliştirmiştir. Restrepo vd. [70] çok vasıflı-çok görevli TÇP'nin çözümü için Benders ayrıştırma algoritması geliştirmiştir. Bu çalışmada, çalışanların çalışma süreleri boyunca farklı görevleri gerçekleştirebildiği dikkate alınmaktadır. Ayrıca vardiya başlama zamanı, vardiya uzunluğu, tur uzunluğu ve izin günleri ile ilgili esneklikler dahil edilmiştir. Ahipasoglu vd. [71] ele alınan mekan yönetimi probleminde, oldukça değişken talep nedeniyle, çalışanlar için, çalışmaya ilişkin anlaşmanın koşullarını karşıladığı sürece esnek başlangıç ve bitiş zamanlarına sahip vardiyaları kullanmışlardır. Ele alınan problemin çözümü için karma tamsayılı programlama modeli önermişlerdir. Porto vd. [72] vardiya sürelerinde ve çalışanların toplam haftalık çalışma sürelerinde esneklik sağlayan, birden fazla görevde çalışabilen çok vasıflı işçileri dikkate alan bir karma tamsayılı programlama modeli geliştirmiştir. Önerilen model, toplam kaç kişinin çalışacağına, bunlardan kaçının çok vasıflı çalışan olduğuna ve hangi tip görevlerde çalışacağına karar vermektedir. Zeng vd. [73] klasik TÇP için daha düşük seviyedeki işgücü talebini daha yüksek hiyerarşideki çalışanlarla karşılayabilen yeni bir formülasyon önermiştir. Modelin çözümü için dal ve fiyat algoritması geliştirilmiştir. Alfares vd. [74] güvenlik görevlilerinin rotasyonel çalışma çizelgelerini oluşturmak için bir tamsayılı programlama modeli önermiştir. Bu model aynı anda birden fazla çalışan tipini, çalışma çizelgelerini ve lokasyonları dikkate almaktadır. Kiermaier vd. [75], büyük ölçekli TÇP'ler için vardiyalara birden fazla mola atanmasının karmaşıklığını incelemiştir. Çok vasıflı çalışanlar için mola atamalarının yanı sıra vardiya ve izin günlerinin planlanmasını da içeren bir karma tamsayılı programlama modeli sunmuştur. Yukarıda verilen literatürde ele alınan TÇP'ler, içerdiği özellikler, esnek çizelgeleme politikaları ve çözüm yaklaşımları açısından incelenerek Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Tur çizelgeleme problemi ile ilgili literatür (Literature related to tour scheduling problem)

Yazar(lar)	Yıl	Tip	İGY	MZP	FVU / ÇGK	EVBZ	VBZB	Çözüm metodu
Henderson ve Berry [42]	1976	K	Hom					Doğru. Prog. Sez.
Keith [43]	1979	K	Hom					Doğru. Prog. Sez.
Morris ve Showalter [44]	1983	K	Hom					Doğru. Prog. Sez.
Bailey [13]	1985	K	Hom		✓			Örtülü Modelleme
Bechtold ve Jacobs [14]	1990	K	Hom	✓				Örtülü Modelleme
Easton ve Rossin [35]	1991	K	Kar					Sütun Üretme
Loucks ve Jacobs [27]	1991	K	Kar					Hedef Prog. / İki Aşamalı Sez.
Love ve Hoey [36]	1990	K	Kar					Ağ Akış Prog.
Mabert ve Showalter [48]	1990	K	Hom					Doğru. Prog. Sez.
Thompson [16]	1992	K	Hom					Doğru. Prog. Sez.
Brusco ve Jacobs [54]	1993a	S	Hom					Kurucu Sez. / Tavlama Benzetimi
Brusco ve Jacobs [55]	1993b	S	Hom					Kurucu Sez. / Tavlama Benzetimi
Brusco ve Jacobs [60]	1993c	S	Hom	✓	✓			Tavlama Benzetimi
Easton ve Mansour [58]	1993	K	Kar					Genetik Alg.

Gopalakrishan vd. [50]	1993	K	Kar				Kurucu Sez.
Jacobs ve Bechtold [17]	1993a	K	Hom	✓		✓	Örtülü Modelleme
Jacobs and Bechtold [18]	1993b	K	Hom	✓	✓		Örtülü Modelleme
Thompson [49]	1993	K	Hom				Doğru. Prog. Sez.
Bechtold ve Brusco [28]	1994a	K	Kar				Ayrıştırma Sez. / Hedef Prog.
Bechtold ve Brusco [51]	1994b	K	Hom				Kurucu Sez.
Jarrah vd. [19]	1994	K	Kar		✓	✓	Örtülü Model. / Tabu Ara. Alg.
Brusco ve Johns [31]	1995	K	Kar				İki Aşamalı Önce. Hedef Prog.
Tanomaru [59]	1995	K	Kar				Genetik Alg.
Thompson [56]	1995	K	Hom				Kurucu Sez.
Brusco ve Johns [45]	1996	K	Hom				Tamsayı Prog. Sez.
Easton ve Rossin [32]	1996	K	Kar				Stokas. Hedef
Goodale ve Tunc [57]	1996	K	Hom				Kurucu Sez. / Tavlama Benzetimi
Jacobs ve Brusco [20]	1996	K	Hom			✓	Örtülü Mod.
Beaumont [4]	1997	S	Kar				Tamsayı Prog.
Easton ve Rossin [62]	1997	K	Hom				Tavlama Benzetimi
Brusco [37]	1998	K	Kar				Doğrusal Prog. / Kesme Düzlemi
Brusco ve Jacobs [38]	1998	S	Hom				Sütun Eleme / Tamsayı Prog.
Goodale ve Tunc [61]	1998	K	Hom				Tavlama Benzetimi
Mason vd. [5]	1998	K	Kar				Tamsayı Prog.
Alfares [6]	1999	K	Hom				Tamsayı Prog.
Alvares-Valdes vd. [65]	1999	K	Hom				Tabu Ara. Alg.
Brusco ve Jacobs [21]	2000	S	Hom	✓		✓	Örtülü Modelleme
Lin vd. [7]	2000	S	Hom				Tamsayı Prog.
Brusco ve Jacobs [9]	2001	K	Hom				Tamsayı Prog.
Cezik vd. [46]	2001	K	Hom			✓	Doğru. Prog. Sez.
Gartner vd. [66]	2001	K	Hom			✓	Tabu Ara. Alg.
Topaloglu ve Ozkarahan [22]	2003	K	Hom	✓	✓	✓	Örtülü Modelleme
Bard [10]	2004	K	Kar				Tamsayı Prog.
Goodale ve Thompson [47]	2004	K	Hom				Doğru. Prog. Sez.
Isken [24]	2004	K	Kar		✓	✓	Örtülü Modelleme
Rekik vd. [23]	2004	K	Hom	✓		✓	Benders Ayrı. Alg.
Topaloglu ve Ozkarahan [34]	2004	K	Hom	✓	✓	✓	Örtülü Hedef Prog.
Addou ve Soumis [15]	2007	K	Hom	✓			Örtülü Modelleme
Mathirajan ve Ramanathan [33]	2007	K	Hom				0-1 Hedef Prog.
Ni ve Abeledo [39]	2007	S	Hom			✓	Dal-Fiyat Alg.
Rekik vd. [26]	2010	K	Hom	✓		✓	Örtülü Modelleme
Rong [25]	2010	K	Kar	✓			Örtülü Modelleme
Brusco ve Johns [63]	2011	K	Hom				Tabu Ara. Alg.
Rocha vd. [12]	2013	K	Hom				Tamsayı Prog.
Stolletz [11]	2010	K	Hom				Tamsayı Prog.
Brunner ve Bard [40]	2013	S	Kar	✓		✓	Dal-Fiyat Alg.
Brunner ve Stolletz [41]	2014	K	Hom	✓		✓	Dal-Fiyat Alg.
Dahmen ve Rekik [64]	2014	K	Kar				Tabu Ara. Alg.
Rocha vd. [52]	2014	K	Hom				Kurucu Sez.
van der Veen vd. [53]	2015	K	Hom				Kurucu Sez.
Henao vd. [67]	2015	K	Kar		✓	✓	Tamsayı Prog.
Cuevas vd. [68]	2016	S	Kar	✓	✓	✓	Tamsayı Prog.
Restrepo vd. [69]	2016	S	Kar		✓	✓	Dal-Fiyat Alg.
Restrepo vd. [70]	2018	K	Kar		✓	✓	Benders Ayrı. Alg.
Ahipasaoglu vd. [71]	2019	K	Kar		✓	✓	Tamsayı Prog.
Porto vd. [72]	2019	K	Kar			✓	Tamsayı Prog.
Zeng vd. [73]	2019	K	Hom			✓	Dal-Fiyat Alg.
Alfares vd. [74]	2020	S	Hom				Tamsayı Prog.
Kiermaier vd. [75]	2020	S	Hom	✓	✓	✓	Tamsayı Prog.
Bu makale		S	Kar	✓	✓	✓	Mat-sezgisel Alg.

İGY, İş Gücü Yapısı; K, Kesikli; S, Sürekli; Hom, Homojen; Kar, Karışık

Tablo 1 incelendiğinde, TÇP literatüründe, çeşitli esnek çizelgeleme politikalarının birlikte dikkate alındığı çalışmalar olmasına rağmen, EVBZ, VBZB, MZP, FVU / ÇGK ve YZP politikalarının hepsinin aynı anda ele alındığı bir çalışmanın bulunmadığı görülmektedir. Yapılan bu çalışma, bahsi geçen esnek çizelgeleme politikalarını birlikte ele alan ilk çalışmadır. Bu makalede üzerinde durulan EVBZ, VBZB, MZP, FVU/ÇGK ve YZP gibi esnek çizelgeleme politikalarının sağladığı faydalar, işverenler ve çalışanlar için farklı şekillerde ifade edilebilirler. Ancak, öncelikle, böyle bir faydadan bahsedebilmek için, bu esnek çizelgeleme politikalarının uygulanacağı sistemin talep yapısının gün içinde ve haftanın günleri arasında farklılıklar göstermesi gerekmektedir. Eğer böyle bir farklılık söz konusu değilse bu politikalarla fayda elde etmek mümkün olmamaktadır. Bu farklılıklar ne kadar fazla ise, yöntemlerin birlikte uygulanması ile sağlanan fayda o kadar yüksek olacaktır. Bu politikaların uygulanmasının işverene sağladığı faydalar şu şekilde özetlenebilir; Gün içinde ve haftanın günleri arasındaki talep yoğunluğuna ilişkin farklılıklar sebebi ile hafta boyunca ihtiyaca bağlı olarak değişen sayıda personel çalıştırmak maliyet avantajı sağlayacaktır. Örneğin, böyle bir durumda, hizmet seviyesini ve müşteri memnuniyetini yüksek tutacak şekilde, talebin en yüksek olduğu periyoda göre planlama yaparak sabit sayıda personel çalıştırmak, personelin zamanının büyük bir kısmının boş geçmesine sebep olacaktır. Ayrıca, bu durumun işverene maliyeti de gereksiz yere fazla sayıda personel çalıştırması nedeniyle daha yüksek olacaktır. EVBZ, MZP, FVU/ÇGK ve YZP gibi uygulamalar müşteri memnuniyetinden feragat etmeden daha az sayıda ve maliyette personel çalıştırılabilmesini sağlayan esneklik politikalarıdır. VBZB uygulaması ise yine işverene esneklik sağlayarak maliyet avantajına katkıda bulunurken diğer yandan çalışanların ardışık vardiyaları arasında minimum dinlenme sürelerine sahip olmalarını garanti altına almaktadır. Bu politikaların uygulanmasının çalışanlara sağladığı faydalar ise şu şekilde özetlenebilir;

Öncelikle, FVU/ÇGK uygulaması çalışanlara da çalışma saatleri ve uzunlukları ile ilgili esneklik sunarak motivasyonlarının artmasını sağlamaktadır. Ayrıca, değişen talep koşullarına göre bir planlama yapıldığı için yoğun saatlerde yeterli sayıda çalışan bulunacağından, çalışanlara düşen iş yükü makul seviyelerde olurken müşteri de istediği hizmeti daha iyi bir şekilde alabilecektir. Bu esnekliklerin birlikte ele alınması, alternatif tur çizelgesi sayısını çok fazla artırmakta ve bu artış da TÇP'nin çözümünü çok zorlaştırmaktadır. Sonuç olarak problemin hızlı ve etkin bir optimizasyon algoritması ile çözülmesi zorunlu hale gelmektedir. Bu makalede, ilk defa TÇP için, matematiksel programlama tabanlı bir meta-sezgisel olan mat-sezgisel çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Bu yaklaşım ile, çözüm uzayının farklı noktalarını arama yeteneği olan değişken komşuluk arama tabanlı bir yerel arama algoritması ile matematiksel programlamanın optimizasyon olanaklarını birlikte kullanan hızlı ve etkin bir algoritma tasarlanmıştır. Geliştirilen Mat-sezgisel Algoritmada (MSA) daha önce TÇP için hiç uygulanmamış tamsayılı programlama tabanlı

kodlama (encoding) ve çözümlenme (decoding) mekanizmaları oluşturulmuştur. Ayrıca, TÇP için tasarlanan bu MSA, küme-kapsama formülasyonu ile modellenen diğer problemlerin çözümü için de yeni bir yöntem olma özelliği taşımaktadır.

Makalenin geri kalan bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir; Bölüm 2'de, TÇP'ye ilişkin matematiksel model verilmiştir. Bölüm 3'de, TÇP'nin çözümü için önerilen mat-sezgisel çözüm yaklaşımı detayları ile anlatılmıştır. Bölüm 4'de, önerilen yöntemin doğruluğunu, performansını ve esnek çizelgeleme politikalarının amaç fonksiyonu değeri üzerindeki etkilerini değerlendirmek üzere sayısal deneyler verilmiştir. Bölüm 5'de ise makaleye ilişkin sonuçlar ve gelecek çalışmalar özetlenmiştir.

2. TUR ÇİZELGELEME PROBLEMİNİN MATEMATİKSEL MODELİ (MATHEMATICAL MODEL OF TOUR SCHEDULING PROBLEM)

TÇP'nin ilk matematiksel modeli Dantzig [3] tarafından önerilen küme-kapsama formülasyonu ile yapılmıştır. Bu formülasyonda, her bir aday tur çizelgesinde kaç personelin çalışacağı bir karar değişkeni ile temsil edilmektedir. İlgili küme-kapsama modeli aşağıdaki gibidir;

İndisler:

- i : Planlama periyodu için indis, $i = 1, \dots, P$
- j : İş günü için indis, $j = 1, \dots, G$
- r : Tur çizelgesi için indis, $r = 1, \dots, R$

Parametreler:

- a_{ijr} : i . planlama periyodunda, j . iş gününde, r . tur çizelgesinde çalışılıyorsa 1, aksi halde 0.
- c_r : r . tur çizelgesinin maliyeti
- w_{ij} : i . planlama periyodu, j . iş günü için gereksinim duyulan personel sayısı

Değişkenler:

- Y_r : r . tur çizelgesine atanan personel sayısı

Amaç fonksiyonu:

$$\text{Min } Z = \sum_{r=1}^R c_r Y_r \quad (1)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{r=1}^R a_{ijr} Y_r \geq w_{ij} \quad i = 1, \dots, P; j = 1, \dots, G \quad (2)$$

$$Y_r \geq 0 \text{ ve tamsayı } r = 1, \dots, R \quad (3)$$

Eş. 1'de verilen modelin amacı ile toplam iş gücü maliyeti en küçüklenmektedir. Eş. 2 ile i . planlama periyodu, j . iş günü için, gereksinim duyulan personel sayısı garanti edilmektedir. Eş. 3 ise karar değişkenlerinin tamsayı ve pozitif değerler almasını sağlamak için kullanılmıştır. Esnek

çizelgeleme politikalarının uygulanması ve planlama periyodlarının kısa tutulması ile olası tur çizelgelerinin sayısı çok artmakta, bu artış ise problemin yukarıda verilen matematiksel model ile çözümünü olanaksız hale getirmektedir.

İlgilenilen problemin özelliklerini ve büyüklüğünü daha iyi açıklayabilmek için, Şekil 1'deki hipotetik küçük örnek verilmiştir. Bu örnekte, bir haftanın üç günden oluştuğu varsayılarak, günde beş saat çalışan bir hizmet sistemi ele alınmıştır. Planlama periyodu bir saat olarak tanımlanmıştır. Çalışanların iki ardışık gün, günde iki saat çalışıp bir gün tatil yaptığı varsayılmıştır. VBZB genişliği ise iki saat olarak belirlenmiş ve Şekil 1'de verilen olası tüm tur çizelgeleri matrisi ortaya çıkmıştır. Matristeki her bir sütun alternatif bir tur çizelgesini ifade etmektedir. Yatay çizgilerle ayrılmış olan alanlar her bir iş gününü temsil etmektedir. Dikey çizgiler ise her biri 10 tur çizelgesinden oluşan ÇGK'ları göstermek için kullanılmıştır. Örneğin, ilk ÇGK'da, çalışma günleri ilk iki iş gününden oluşurken, ikinci ÇGK'da çalışma günleri ikinci ve üçüncü iş günleridir. Matristeki her bir hücre için girilen ikili değerler (0 veya 1), ilgili planlama periyodu ve tur çizelgesinde çalışılıp çalışılmadığını göstermektedir. Örneğin, birinci tur çizelgesine atanan bir çalışan (birinci sütun), ilk iki günün ilk iki saatinde faaliyet göstermektedir. VBZB genişliği iki saat olarak belirlendiğinden, oluşturulan tur çizelgelerinde iki ardışık günün vardiya başlangıç zamanları arasında en fazla bir saatlik fark bulunmaktadır. VBZB'nin, iş gününün ilk iki saatinden oluşması durumunda oluşan alternatif tur çizelgeleri, birinci ÇGK için ilk dört sütunda, ikinci ÇGK için, 11. ve 14. sütunlar arasında, üçüncü ÇGK için ise 21. ve 24. sütunlar arasında gösterilmektedir. Bu örnekte, MZP ve YZP uygulamaları, olası tur çizelgelerinin sayısını çok artıracığından dolayı dikkate alınmamıştır.

3. TUR ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN ÖNERİLEN MAT-SEZGİSEL ALGORİTMA (PROPOSED MAT-HEURISTIC ALGORITHM FOR THE TOUR SCHEDULING PROBLEM)

Bu bölümde, çözüm uzayının farklı noktalarını arama yeteneği olan değişken komşuluk arama tabanlı bir yerel arama algoritmasını ve matematiksel programlamanın optimizasyon olanaklarını birlikte kullanan önerilen MSA'ya ilişkin detaylar verilmektedir. Geliştirilen MSA'nın üç önemli bileşeni bulunmaktadır. Bunlar sırası ile rastgele başlangıç çözümü oluşturma algoritması, alternatif tur çizelgeleri kümesi oluşturma algoritması ve komşu çözüm oluşturma ve yerel arama algoritmasıdır. MSA öncelikle olurlu bir başlangıç çözüme gereksinim duyar. Bu başlangıç çözümün nasıl oluşturulduğu Bölüm 3.1'de verilmiştir. Başlangıç çözümü, mevcut çözüm olarak atandıktan sonra, MSA, mevcut çözüme alternatif tur çizelgeleri kümelerinden seçtiği yeni tur çizelgelerini ekleyerek komşu çözümler oluşturur. Alternatif tur çizelgeleri kümelerinin nasıl oluşturulduğu Bölüm 3.2'de, komşu çözümlerin nasıl oluşturulduğu Bölüm 3.3'de verilmiştir. Bölüm 3.4'de ise bu algoritmaların birlikte ne şekilde çalıştığına ilişkin açıklamalar verilmiştir.

3.1. Rastgele Başlangıç Çözümü Oluşturma Algoritması (Algorithm for Generating Random Initial Solution)

Rastgele başlangıç çözümü oluşturma algoritması iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada çözüm içinde kullanılacak olan tur çizelgeleri rastgele olarak seçilmektedir. Bu rastgele seçim için izlenen yol şu şekilde özetlenebilir; $PP = \{1, 2, 3, \dots, P \times G\}$ ve $TS = \{1, 2, 3, \dots, R\}$ sırasıyla tüm planlama periyotlarından ve olası tüm tur çizelgelerinden oluşan kümeler olsun. Her bir tur çizelgesinin ($r \in TS$) kapsadığı planlama periyotlarından oluşan küme ise PP_r ile ifade edilsin. TS_p de p planlama

Olası tüm tur çizelgeleri kümesi (Her sütun bir tur çizelgesini göstermektedir)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
G1	S1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	S2	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0
	S3	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0
	S4	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1
	S5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
G2	S1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S2	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S3	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S4	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
G3	S1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	S2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	S3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
	S4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
	S5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Şekil 1. Örnek problem için oluşturulan tur çizelgeleri matrisi (Tour scheduling matrix for the sample problem)

periyodunu içeren tur çizelgeleri kümesi olsun. Prosedürün başlangıcında PP kümesinden rastgele bir planlama periyodu p seçilir. Daha sonra p periyodunu kapsayan tüm tur çizelgeleri arasından $r \in TS_p$ olacak şekilde biri rastgele seçilerek başlangıç tur çizelgeleri kümesini gösteren ITS 'ye dahil edilir. ITS başlangıçta boş kümedir. Seçilen tur çizelgesinin kapsama kümesine dahil olan tüm planlama periyotları (PP_r), PP kümesinden çıkartılır. Bahsedilen rastgele tur çizelgesi seçme ve PP kümesini güncelleme işlemleri, PP kümesinde hiçbir planlama periyodu kalmayınca kadar devam eder. Algoritmanın ikinci aşamasında, ilk aşamada seçilmiş olan tur çizelgeleri kullanılarak küme-kapsama modeli çözülür ve her bir tur çizelgesine kaç tane çalışanın atanacağı (Y_r) belirlenir. Bu yöntem ile ilk aşamada seçilen tur çizelgeleri, her planlama periyodunu kapsayacak şekilde seçildiği için, küme-kapsama modelinin her zaman olurlu bir çözümünün olması garanti edilmiş olur. Bu işlemlerden sonra başlangıç çözümü, mevcut çözüm olarak atanır. Başlangıç çözümü oluşturmaya ilişkin algoritma A1, Şekil 2'de verilmektedir.

3.2. Alternatif Tur Çizelgeleri Kümesi (T_k) Oluşturma Algoritması (Algorithm for Generating Alternative Tour Schedules Set T_k)

Alternatif tur çizelgeleri kümesi (T_k), komşu çözümler oluşturabilmek için yaratılan bir kümedir. T_k komşu çözüm kümesinin oluşturulma süreci ise şu şekilde açıklanabilir; Başlangıç çözümü oluşturulduktan sonra, TÇP'nin Dantzig'e ait [3] klasik küme-kapsama modelinin tamsayı kısıtları kaldırılmış hali olan gevşetilmiş doğrusal

programlama modeli tüm olası tur çizelgelerini kapsayacak şekilde çözülür. Gevşetilmiş doğrusal programlama modelinin çözümü sonucunda değeri, belirlenen bir eşik değerin (ED) üzerinde olan karar değişkenlerine ($Y_r \geq ED$) ilişkin tur çizelgeleri, 1. alternatif tur çizelgeleri kümesini (T_1) oluşturur. T_1 kümesinin oluşturulmasına ilişkin algoritma A2, Şekil 3'de verilmektedir. T_1 kümesinden rastgele olarak seçilen tur çizelgelerinin eklenmesiyle oluşturulan komşuluğa ilişkin çözüm klasik küme-kapsama modeli ile elde edilir. Belirli sayıda iterasyon sonunda, T_1 kümesini kullanarak elde edilen komşuluklara ilişkin çözümler amaç fonksiyonu değerinde iyileşme sağlayamaz ise 2. alternatif tur çizelgeleri kümesi oluşturulur. Bu küme oluşturulurken, T_1 kümesinde yer alan tur çizelgeleri, olası tüm tur çizelgeleri kümesinden çıkarılır ve kalan tur çizelgeleri için gevşetilmiş doğrusal programlama modeli yine çözülür. Böylece, yukarıdaki prosedür yeniden tekrar edilerek T_2 kümesi oluşturulmuş olur. Alternatif tur çizelgeleri kümesi (T_k) oluşturma süreci belirlenen bir koşula kadar devam eder. Yeni T_k kümesinin oluşturulmasına ilişkin algoritma A3, Şekil 4'de verilmektedir.

3.3. MSA'ya İlişkin Komşu Çözüm Oluşturma ve Yerel Arama Algoritması

(Neighborhood Solution Generation and Local Search Algorithm Related to MSA)

MSA'ya ilişkin komşu çözüm oluşturma ve yerel arama algoritması A4, Şekil 5'de verilmiştir. A4 algoritması, ilk olarak, o anda geçerli olan tur çizelgeleri kümesinden (T_k)

```

ITS = ∅, DPP = PP
while DPP ≠ ∅
    rastgele olarak planlama periyodu p ∈ DPP seç
    rastgele olarak tur çizelgesi r ∈ TSp seç
    ITS = ITS ∪ {r}
    DPP = DPP - PPr
endwhile
ITS tur çizelgeleri kümesi ile küme-kapsama modelini çözerek başlangıç çözümünü oluştur

```

Şekil 2. Başlangıç çözümü oluşturma algoritması A1 (Initial solution generation algorithm A1)

```

T1 = ∅
TS tur çizelgeleri kümesi ile gevşetilmiş küme-kapsama modelini çöz
for r = 1 : R
    if Yr ≥ ED
        T1 = T1 ∪ {r}
    endif
endfor

```

Şekil 3. T_1 kümesi oluşturma algoritması A2 (T_1 set generation algorithm A2)

```

TS = TS - Tk-1, Tk = ∅
TS tur çizelgeleri kümesi ile gevşetilmiş küme-kapsama modelini çöz
for ∀ r ∈ TS
    if Yr ≥ ED
        Tk = Tk ∪ {r}
    endif
endfor

```

Şekil 4. T_k kümesi oluşturma algoritması A3 (T_k set generation algorithm A3)

belirli sayıda rastgele olarak seçilen tur çizelgelerini, küme-kapsama modelinde kullanılan mevcut tur çizelgelerine eklemektedir. Rastgele olarak seçilen bu tur çizelgeleri RTS kümesini oluşturmaktadır ve bu RTS kümesi başlangıçta boş kümedir. Mevcut tur çizelgelerine eklenen yeni tur çizelgeleriyle NTS kümesi oluşturulur ve bu kümedeki tur çizelgelerini dikkate alan küme-kapsama modeli çözümlenerek komşu çözüm (x') üretilir. Bu komşu çözüm ile hangi tur çizelgesine kaç kişinin atanacağı (Y_i) ve buna bağlı olarak amaç fonksiyonunun değeri belirlenir. Oluşturulan komşu çözüme ilişkin amaç fonksiyonu değeri, ($f(x')$), mevcut çözümün amaç fonksiyonu değerinden ($f(x)$) daha iyi ise, mevcut çözüm $x = x'$ olarak güncellenir, $D_k = 1$ olarak atanır, k değeri 1'e eşitlenir ve komşu çözüm oluşturmaya T_1 kümesinden devam edilir. k değeri algoritmanın kaçınıcı tur çizelgeleri kümesinden (T_k) komşu çözüm oluşturduğunu gösteren sayaçtır. D_k ise T_k kümesi kullanılarak iyileştirme sağlanıp sağlanmadığını gösteren değişkendir. Eğer $f(x') \geq f(x)$ ise, T_k kümesinden komşu çözüm üretmeye devam edilir

```

RTS = ∅, Dk = 0, f = 0
Etiket 1: N = Nmin
Etiket 2: for i = 1 : N
    rastgele olarak tur çizelgesi r ∈ Tk seç
    RTS = RTS ∪ {r}, Tk = Tk - {r}
endfor
NTS = NTS ∪ RTS, RTS = ∅
NTS tur çizelgeleri kümesi ile küme-kapsama modelini çözümlenerek komşu çözümü (x') oluştur
if f(x') ≤ f(x)
    x = x', Dk = 1, k = 1, f = 0
    goto Etiket 1
else
    f = f + 1
    if f > F break (Algoritma A4'ün çıkış noktası)
    else
        if N < Nmax
            N = N + 1
            goto Etiket 2
        else
            goto Etiket 1
        endif
    endif
endif
endif

```

Şekil 5. T_k kümesini kullanarak komşu çözümler oluşturma ve yerel arama algoritması A4 (Neighborhood solutions generation and local search algorithm A4 using set T_k)

```

Probleme ilişkin verileri gir, Başlangıç çözüm (x) oluştur (Algoritma A1)
k = 1, Ks = 1, NTS = ITS
Etiket 1: if k = 1
    T1 kümesini oluştur (Algoritma A2)
else
    Tk kümesini oluştur (Algoritma A3)
endif
Etiket 2: Tk kümesini kullanarak komşu çözümler oluştur (Algoritma A4)
if k = Ks
    if Dk = 0 break (MSA çıkış noktası)
    else
        k = k + 1, Ks = Ks + 1, goto Etiket 1
    endif
else
    k = k + 1, goto Etiket 2
endif

```

Şekil 6. Önerilen mat-sezgisel algoritma (Proposed mat-heuristic algorithm)

ve NTS kümesine eklenecek tur çizelgesi sayısı N bir artırılır. Bu artırma işlemi, daha iyi bir çözüm bulunamadığı süre boyunca en fazla N_{max} 'a kadar devam eder. Komşu çözüm üretme yöntemi mevcut çözümden daha iyi bir çözüm bulunduğunda ise, eklenecek çizelge sayısı tekrar N_{min} değerine düşürülür. T_k kümesinden mevcut çözüme göre daha iyi bir komşu çözüm üretilemezse, üst üste başarısızlıkları sayan f sayacı bir artırılır. T_k kümesi kullanılarak üst üste belli sayıda iterasyon (F) boyunca iyileştirme sağlanamazsa, A4 algoritmasından çıkılır ve MSA'ya ilişkin aşamalar takip edilir.

3.4. MSA'nın İşleyişine İlişkin Açıklamalar (Explanations Related to the Mechanism of MSA)

Önerilen MSA'nın temel adımları Şekil 6'da gösterilmektedir. Algoritmada başlangıç çözümü, Bölüm 3.1'de önerilen algoritma A1 ile rastgele olarak oluşturulmaktadır. Sonrasında, Bölüm 3.2'de önerilen

algoritma A2 veya algoritma A3'e göre T_k kümesi oluşturulur. Komşu çözümler ise Bölüm 3.3'de verilen komşu çözüm oluşturma ve yerel arama algoritması A4 ile oluşturulmaktadır. A4 algoritması sonlandığında k değerinin K_s değerine eşit olup olmadığına bakılır. Burada K_s değeri o zamana kadar üretilen T_k kümelerinin sayısıdır. Eğer k 'nin değeri K_s 'nin değerine ve D_k da 0'a eşitse, bu durumda MSA sonlandırılır. Aksi halde, eğer $D_k=1$ ise, k ve K_s bir artırılarak yeni T_k kümesi algoritma A3 ile oluşturulur ve algoritma A4 ile yeni komşu çözümler üretmeye devam edilir. Eğer k 'nin değeri K_s 'den küçük ise bir sonraki tur çizelgeleri kümesinden komşu çözüm üretmeye ve yerel aramaya algoritma A4 ile devam edilir.

Geliştirilen MSA altrenatif tur çizelgeleri kümelerini ardışık olarak kullanarak ilerlemektedir. Bu özelliği nedeniyle algoritma bir değişken komşuluk arama algoritması [76] türü olarak düşünülebilir.

4. SAYISAL DENEYLER (COMPUTATIONAL EXPERIMENTS)

Önerilen MSA, MATLAB R2016b'de, TÇP'nin küme-kapsama modeli ise LINGO 15.0 optimizasyon yazılımında kodlanmıştır. MSA içindeki doğrusal programlama ve tamsayı programlama modelleri, MATLAB içinden çağrılan CPLEX çözücüsü kullanılarak çözülmüştür. Algoritmanın performansı, McGinnis vd. [77] tarafından sunulan, her biri bir telefon firmasının bir haftadaki saatlik talep verilerini içeren veri setleri kullanılarak test edilmiştir. Bu talep verileri kullanılarak iki farklı test problemleri kümesi oluşturulmuştur. Birinci test problemleri kümesi, McGinnis vd. [77] tarafından sağlanan altı veri setinin ilk 12 saati dikkate alınarak oluşturulmuştur. Bu test problemleri kümesi küçük boyutlu kesikli tipte TÇP'lerden oluşmaktadır. İş günü süresi 12 saat olarak belirlenmiştir. Bu problemlerde, MZP, FVU / ÇGK ve YZP gibi esnek çizelgeleme politikaları kullanılmamakta, sadece EVBZ ve VBZB uygulamalarına yer verilmektedir. Seçilen vardiya uzunluğu sekiz saat, haftalık çalışma günü sayısı arka arkaya beş gün, VBZB bir ve dört saat arasında değişmektedir. Problem özelliklerinin bu şekilde seçilmesinin sebebi, önerilen MSA kullanılarak elde edilecek olan sonuçların doğruluğunu, klasik küme-kapsama modeli ve LINGO kullanılarak elde edilecek sonuçlar ile karşılaştırabilmektir. İkinci test problemleri kümesinde ise yine McGinnis vd. [77]'deki ilk veri setinin 24 saatinin tamamı dikkate alınmıştır. Bu veri seti için farklı esnek çizelgeleme politikalarını barındıran 14 farklı test problemi oluşturulmuştur. Bu test problemleri kümesinde MZP, FVU / ÇGK, EVBZ, VBZB ve YZP gibi esnek çizelgeleme politikalarının kullanıldığı sürekli tipte TÇP'ler bulunmaktadır. Her iki test problemleri kümesinde de amaç fonksiyonu, Bölüm 2'de yer alan Eş 1'deki ifade gibi alınmıştır. Eş 1'de bulunan c_r parametresi, TZP'ye ilişkin tüm olası tur çizelgeleri için 1, YZP'ye ilişkin tüm olası tur çizelgeleri için ise 0.5 olarak alınmıştır. Bu sebep ile YZP'nin de dahil edildiği problemlerde iki YZP'nin bir TZP'ye karşılık geldiği varsayılmaktadır. Bu hali ile amaç

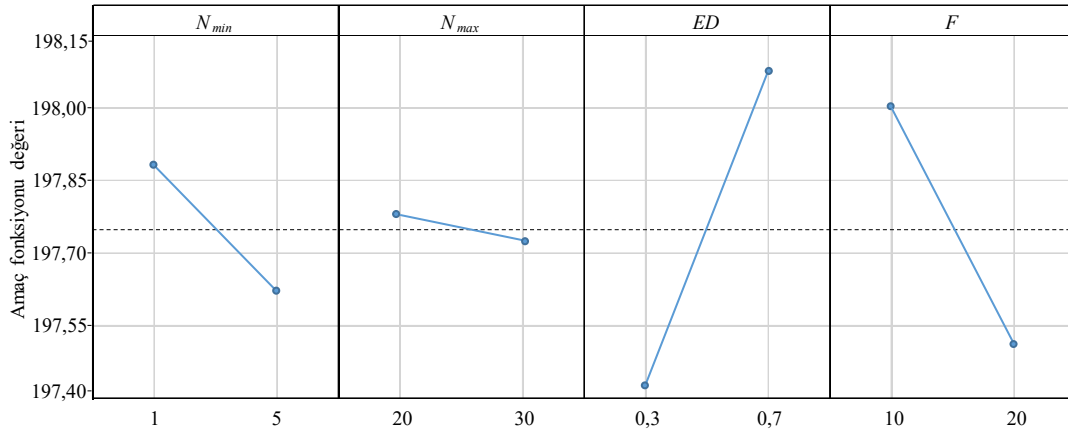
fonksiyonu değeri bir haftalık çizelgeleme döneminde görevlendirilmesi gereken toplam TZP sayısını vermektedir. Sayısal deneylerin tamamı Intel Core I5 – 4.00 GHz işlemcili ve 32 GB hafızaya sahip bir bilgisayarda yapılmıştır. Problemlerin çözümünde kullanılan MSA'ya ilişkin N_{min} , N_{max} , ED ve F parametrelerinin değerleri, 2^k tam faktöriyel deney tasarımı kullanılarak ve Bölüm 4.2'de verilen ikinci test problemlerindeki bir numaralı problem ele alınarak belirlenmiştir. Deneye ilişkin dört faktör (N_{min} , N_{max} , ED ve F) olduğu için $k=4$ olarak alınmıştır. Yapılan ön deneysel çalışmaları sonucunda, 2^4 tam faktöriyel deney tasarımındaki faktörlere ait alt ve üst seviye değerler N_{min} , N_{max} , ED ve F için sırasıyla, 1-5, 20-30, 0,3-0,7 ve 10-20 olarak seçilmiştir ve bu seviyeler -1 (alt seviye) ve +1 (üst seviye) olarak kodlanmıştır. 2^4 tam faktöriyel deney tasarımında 16 deney noktası bulunduğu ve her deney noktasında 5 tekrar yapıldığından toplam deney sayısı 80 olmuştur. Bu deneylere göre elde edilen varyans analizi sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2'de görüldüğü üzere N_{max} hariç diğer faktörlerin çıktı üzerindeki etkileri $\alpha=0,05$ için istatistiksel olarak önemlidir. 2 yönlü etkileşimlerden ise sadece $N_{min}*F$ ve $ED*F$ etkileşimleri önemli görülmektedir. Bu durum, N_{min} ve ED faktörlerindeki değişimin çıktı üzerindeki etkisinin, F faktörünün o anda hangi seviyede bulunduğu etkilediğini ifade etmektedir. 3 ve 4 yönlü faktör etkileşimleri ise bu tabloya göre önemli görülmemektedir. Şekil 7'de ise faktörlerdeki değişimin çıktığı ne yönde ve ne miktarda değiştirdiği verilmiştir. Şekil 7'de görüldüğü üzere, amaç fonksiyonu minimizasyon olduğu için N_{min} faktörünü 5, N_{max} faktörünü 30, ED faktörünü 0,3 ve F faktörünü 20 olarak seçmek çıktığı azaltıcı bir etkiye sahiptir. Bu sebeple bütün sayısal problemlerin çözümünde kullanılan MSA'ya ilişkin N_{min} , N_{max} , ED ve F parametrelerinin değerleri sırasıyla 5, 30, 0,3 ve 20 olarak belirlenmiştir.

4.1. Birinci Test Problemleri Kümesine İlişkin Sonuçlar (Results Related to the First Set of Test Problems)

Birinci test problemleri kümesi için elde edilen sonuçlar Tablo 3'de gösterilmektedir. İlgili tabloda ilk sütunda McGinnis vd. [77]'de yer alan kaçıncı veri setinin kullanıldığı gösterilmektedir. İkinci, üçüncü ve dördüncü sütunlarda sırası ile saat olarak VBZB uzunluğu, LINGO optimizasyon yazılımı ile çözülen küme-kapsama modelinin değişken sayısı ve kısıt sayısı gösterilmektedir. Beşinci ve altıncı sütunlarda, her bir problem için sırası ile LINGO tarafından bulunan optimal amaç fonksiyonu değeri ve modelin çözüm süresi verilmektedir. Önerilen MSA her bir problem için 10 defa çalıştırılmıştır. Son üç sütunda ise her bir problem için MSA'nın bu 10 çalıştırma sonucunda elde ettiği en iyi ve ortalama amaç fonksiyonu değerleri ve ortalama çözüm süresi verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde MSA'nın tüm test problemleri için optimal çözümü bulduğu görülmektedir. Ayrıca MSA'nın elde ettiği ortalama ve en iyi değerler karşılaştırıldığında, iki problem haricinde bu değerlerin birbirine eşit olduğu gözlemlenmektedir. Bu sonuç, önerilen algoritmanın tutarlılığını göstermektedir. Çözüm süreleri incelendiğinde ise, LINGO ve MSA'nın ortalama çözüm sürelerinin sırası

Tablo 2. Varyans analizi sonuçları (The results of ANOVA)

Kaynak	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Ortalama kareler	F-değeri	P-değeri
Model	15	19,0000	1,26667	13,51	0,000
Doğrusal	4	14,7500	3,68750	39,33	0,000
N_{min}	1	1,2500	1,25000	13,33	0,001
N_{max}	1	0,0500	0,05000	0,53	0,468
ED	1	8,4500	8,45000	90,13	0,000
F	1	5,0000	5,00000	53,33	0,000
2 Yönlü Etkileşimler	6	3,9500	0,65833	7,02	0,000
$N_{min} * N_{max}$	1	0,0000	0,00000	0,00	1,000
$N_{min} * ED$	1	0,2000	0,20000	2,13	0,149
$N_{min} * F$	1	1,2500	1,25000	13,33	0,001
$N_{max} * ED$	1	0,0000	0,00000	0,00	1,000
$N_{max} * F$	1	0,0500	0,05000	0,53	0,468
$ED * F$	1	2,4500	2,45000	26,13	0,000
3 Yönlü Etkileşimler	4	0,2500	0,06250	0,67	0,617
$N_{min} * N_{max} * ED$	1	0,0500	0,05000	0,53	0,468
$N_{min} * N_{max} * F$	1	0,0000	0,00000	0,00	1,000
$N_{min} * ED * F$	1	0,2000	0,20000	2,13	0,149
$N_{max} * ED * F$	1	0,0000	0,00000	0,00	1,000
4 Yönlü Etkileşimler	1	0,0500	0,05000	0,53	0,468
$N_{min} * N_{max} * ED * F$	1	0,0500	0,05000	0,53	0,468
Hata	64	6,0000	0,09375		
Toplam	79	25,0000			

**Şekil 7.** Faktörlerin çıktı üzerindeki etkileri (The effects of factors on the output)

ile 114 ve 3,6 saniye olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, MSA'nın LINGO'ya göre optimal sonuçları çok daha hızlı bir şekilde elde ettiğini göstermektedir.

4.2. İkinci Test Problemleri Kümesine İlişkin Sonuçlar (Results Related to the Second Set of Test Problems)

İkinci test problemleri kümesinde, daha önce de belirtildiği üzere, McGinnis vd. [77]'deki ilk veri seti dikkate alınmıştır. Bu veri seti için farklı esnek çizelgeleme politikalarını barındıran 14 farklı test problemi oluşturulmuştur. İkinci test problemleri kümesi için oluşturulan çizelgeleme ortamları ve problem özellikleri sırası ile Tablo 4 ve Tablo 5'de gösterilmektedir. Tablo 4'de görüldüğü üzere dört farklı tip çizelgeleme ortamı tanımlanmıştır. FVU / ÇGK sütunu günlük vardiya uzunluğu ve ona karşılık gelen haftalık

çalışma günü sayısını göstermektedir. MZP sütunu ise vardiya uzunluklarına göre belirlenmiş olan MZP uzunluğunu vermektedir. Örneğin iki numaralı çizelgeleme ortamında, günde 8 saat / haftada arka arkaya 5 gün, günde 10 saat / haftada arka arkaya 4 gün, günde 12 saat / haftada arka arkaya 3 gün çalışma biçiminde olan tüm olası tur çizelgeleri içerilmektedir. Ayrıca, bu çizelgeleme ortamı için, 8 saatlik vardiyalarda, tam vardiya ortasına denk gelecek şekilde 1 saatlik mola zamanı, 10 ve 12 saatlik vardiyalarda ise yine bu vardiya uzunluklarının ortasına yerleştirilen 2 saatlik MZP'lerde yer alan 1 saatlik mola zamanları tanımlanmıştır.

Tablo 5'de görüldüğü üzere ilk üç çizelgeleme ortamı için dört farklı VBZB uzunluğu, dördüncü çizelgeleme ortamı için ise iki farklı VBZB uzunluğu belirlenmiştir.

Tablo 3. Birinci test problemleri kümesine ilişkin sonuçlar (Results Related to the First Set of Test Problems)

Veri seti no.	VBZB	Değişken sayısı	LINGO	MSA				
			Kısıt sayısı	Opt. Süre(s)	Min. Ort.	Süre(s)		
1	1	84	84	114	1	114	114,0	1
1	2	2604	84	113	2	113	113,0	1
1	3	17724	84	111	29	111	111,0	1
1	4	65604	84	111	358	111	111,0	4
2	1	84	84	114	1	114	114,0	1
2	2	2604	84	113	1	113	113,0	1
2	3	17724	84	111	52	111	111,7	2
2	4	65604	84	111	452	111	111,0	4
3	1	84	84	108	1	108	108,0	1
3	2	2604	84	108	1	108	108,0	1
3	3	17724	84	106	67	106	106,0	3
3	4	65604	84	106	652	106	106,0	5
4	1	84	84	97	1	97	97,0	5
4	2	2604	84	95	18	95	95,0	28
5	1	84	84	114	1	114	114,0	1
5	2	2604	84	111	4	111	111,0	1
5	3	17724	84	110	30	110	110,0	1
5	4	65604	84	109	355	109	109,9	4
6	1	84	84	102	1	102	102,0	1
6	2	2604	84	99	2	99	99,0	3
6	3	17724	84	99	73	99	99,0	3
6	4	65604	84	99	410	99	99,0	7

Vardiyaların, 24 saatlik iş gününde, her saat başı başlayabileceği kabul edilmiştir. Bu şekilde, ikinci test problemleri kümesinde toplam 14 problem oluşturulmuştur. İkinci test kümesi problemlerine ilişkin elde edilen sonuçlar Tablo 6'da gösterilmektedir. Tablo 6'daki ilk üç sütunda problemlerin özelliklerine ait bilgiler, dördüncü ve beşinci sütunlarda küme-kapsama modeline ilişkin karar değişkeni ve kısıt sayıları, altıncı ve yedinci sütunlarda LINGO optimizasyon yazılımı ile elde edilen amaç fonksiyonu değerleri ve çözüm süreleri yer almaktadır. Son üç sütunda ise her bir problem için MSA'nın bu 10 çalıştırma sonucunda elde ettiği en iyi ve ortalama amaç fonksiyonu değerleri ve ortalama çözüm süresi verilmektedir. LINGO optimizasyon yazılımı en fazla 7200 saniye çalışacak şekilde sınırlanmıştır.

Tablo 4. İkinci test problemleri kümesi için çizelgeleme ortamları (Scheduling environments for the second set of test problems)

Çizelge. Ortamı (ÇO)	FVU (saat)/ ÇGK (gün)	MZP Uzunluğu
1	8/5, 10/4, 12/3	8, 10, 12 için 1 saat
2	8/5, 10/4, 12/3	8 için 1 saat, 10, 12 için 2 saat
3	8/5, 10/4, 12/3	8, 10, 12 için 2 saat
4	8/5, 10/4, 12/3	8, 10, 12 için 3 saat

Tablo 6'da verilen sonuçlar incelendiğinde, LINGO optimizasyon yazılımının 14 problemten sadece 4'ü için optimal çözümü bulabildiği görülmektedir. Diğer 10 problemin 7'si için 7200 saniye süre içinde olurlu bir çözüme ulaşamamıştır. MSA'nın sonuçları incelendiğinde ise, optimal çözümü bilinen tüm problemler için MSA'nın optimal sonuca ulaştığı görülmüştür. Ayrıca LINGO optimizasyon yazılımının olurlu çözüm ürettiği 3 problemde,

MSA, daha iyi amaç fonksiyonu değerine sahip olurlu çözümler elde etmiştir. Çözüm süreleri incelendiğinde ise, MSA'nın tüm test problemlerinde LINGO optimizasyon yazılımına göre çok daha kısa zamanda sonuç ürettiği görülmektedir.

Tablo 5. İkinci test problemleri kümesi özellikleri (Features of the second set of test problems)

Problem No. (PN)	ÇO	VBZB Uzunluğu (saat)
1	1	1
2	1	2
3	1	3
4	1	4
5	2	1
6	2	2
7	2	3
8	2	4
9	3	1
10	3	2
11	3	3
12	3	4
13	4	1
14	4	2

Esnek çizelgeleme politikalarının TÇP'ye etkileri analiz edildiğinde, VBZB uzunluğunun birden ikiye çıkarılmasının gerekli personel sayısını ortalama iki kişi azalttığı görülmektedir. Fakat VBZB uzunluğunun ikiden üçe veya üçten dörde çıkarılması ile genel olarak daha iyi bir çözüm elde edilememektedir. Yalnızca iki numaralı ÇO'da 3 saatlik VBZB uzunluğundan 4 saatlik VBZB uzunluğuna geçişte amaç fonksiyonu değeri 193'den 192'ye inmiştir. Ayrıca, MZP uzunluğundaki artışın amaç fonksiyonu değerini

Tablo 6. İkinci problem kümesi için elde edilen sonuçlar (Results obtained from the second set of problems)

PN	ÇO	VBZB	LINGO			MSA			
			Değişken sayısı	Kısıt sayısı	Amaç fon. değeri	Süre(s)	Min.	Ort.	Süre(s)
1	1	1	504	168	197	210	197	197,1	41
2	1	2	8904	168	195*	7200	194	194,7	112
3	1	3	49560	168	195*	7200	194	195,0	188
4	1	4	166824	168	-	7200	194	194,2	241
5	2	1	4200	168	196	38	196	196,0	19
6	2	2	54936	168	195*	7200	193	193,6	84
7	2	3	235704	168	-	7200	193	193,9	124
8	2	4	651336	168	-	7200	192	192,7	110
9	3	1	9408	168	191	48	191	191,0	34
10	3	2	216384	168	-	7200	190	190,6	76
11	3	3	1334592	168	-	7200	190	190,5	236
12	3	4	4718784	168	-	7200	190	190,7	786
13	4	1	79296	168	188	890	188	188,6	32
14	4	2	2040192	168	-	7200	187	188,0	291

*7200 saniye içinde elde edilebilen en iyi amaç fonksiyonu değeri
 -7200 saniye içinde olurlu bir çözüm elde edilememiştir

önemli ölçüde azaltarak iyileştirdiği gözlemlenmiştir. En esnek ve en katı mola zamanı politikasının uygulandığı ve diğer faktörlerin eşit olduğu problemler incelendiğinde, bir numaralı problemde 197 olan amaç fonksiyonu değerinin 13 numaralı problemde 188'e, iki numaralı problemde 194 olan amaç fonksiyonu değerinin 14 numaralı problemde 187'ye düştüğü tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre MZP esnek çizelgeleme politikasının VBZB esnek çizelgeleme politikasına göre amaç fonksiyonu değerini daha fazla azalttığı görülmektedir.

4.3. Yarı Zamanlı Personelin Tur Çizelgeleme Problemine Etkileri (The Effects of Part-Time Personnel on the Tour Scheduling Problem)

Bu bölümde, ikinci test problemleri kümesi içinde yer alan ilk dört probleme, YZP için tasarlanan olası tur çizelgelerinin de eklenmesi ile ortaya çıkan yeni problemlere ilişkin sonuçlar incelenmiştir. Bu problemlerde YZP için, günde 4 saat / haftada arka arkaya 5 gün, günde 5 saat / haftada arka arkaya 4 gün, günde 6 saat / haftada arka arkaya 3 gün çalışma biçiminde olan tüm olası tur çizelgeleri içerilmektedir. Gerçek hayatta, YZP sayısının TZP sayısına oranının belirli bir değeri geçmemesi istenmektedir. Bu bölümdeki sayısal deneylerde, bu oranın (yzo) aldığı farklı değerlere göre gözlemlenen değişimler incelenmiştir. MSA'nın 10 kez çalıştırılması sonucunda elde edilen bu deneylere ilişkin sonuçlar Tablo 7'de gösterilmektedir.

Tablo 7'deki sonuçlar incelendiğinde, YZP'nin amaç fonksiyonu değerini önemli oranda düşürdüğü görülmektedir. TZP sayısının %10'u kadar YZP çalıştırılmasına izin verilmesi ($yzo = 0,1$), ortaya çıkan ortalama amaç fonksiyonu değerini 194,8'den 188,1'e düşürmektedir. yzo değeri artırıldıkça amaç fonksiyonu değeri azalmaktadır, fakat düşüş miktarı azalarak devam etmektedir. Örneğin, ortalama amaç fonksiyonu değerindeki en büyük azalış (6,7) yzo 'nun 0,0'dan 0,1'e artırılmasıyla elde edilmiştir. Ortalama amaç fonksiyonu değerindeki en

küçük azalış (1,4) ise ilgili parametrenin 0,4'den 0,5'e çıkarılmasıyla oluşmuştur.

Tablo 7. YZP'yi içeren problemlere ilişkin elde edilen sonuçlar (The obtained results related to the problems including part-time personnel)

	MSA			
	PN	Min.	Ort.	Süre(s)
$yzo = 0,0$	1	197	197,1	41
	2	194	194,7	112
	3	194	195,0	188
	4	194	194,2	241
	Ort.	194,8	195,3	145,5
$yzo = 0,1$	1	190	190,0	130
	2	187,5	187,8	244
	3	187,5	187,5	298
	4	187,5	188,2	211
	Ort.	188,1	188,4	220,8
$yzo = 0,2$	1	185,5	186,2	178
	2	182	182,7	292
	3	182	183,0	272
	4	182	182,3	338
	Ort.	182,9	183,5	270,0
$yzo = 0,3$	1	183	183,3	202
	2	180	180,2	194
	3	180	180,7	208
	4	180	181,0	187
	Ort.	180,8	181,3	197,8
$yzo = 0,4$	1	181	181,0	171
	2	178	178,3	129
	3	178	178,3	80
	4	178	179,0	104
	Ort.	178,8	179,2	121,0
$yzo = 0,5$	1	180	180,0	64
	2	177,5	177,8	155
	3	176	176,9	183
	4	176	177,0	202
	Ort.	177,4	177,9	151,0

Sonuç olarak, *yzo*'nun en yüksek olduğu senaryoda, YZP kullanılmayan senaryoya göre ortalama amaç fonksiyonu değerindeki düşüş 17,4 gibi büyük bir değere karşılık gelmektedir. Bu sonuç, YZP kullanımının iş gücü maliyetini düşürmedeki etkisini açıkça göstermektedir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu makalede personel tur çizelgeleme problemi (TÇP) ele alınmıştır. TÇP, müşteri talebinin gün içinde ve iş günleri arasında değiştiği hastane, banka, restoran, havaalanı, süpermarket, çağrı merkezi gibi gün içinde birden fazla vardiyaya ve farklı vardiya uzunluklarına sahip olan hizmet sistemlerinde ortaya çıkan bir problemdir. Değişen müşteri talebine istenilen hizmet kalitesinde cevap verirken, personel maliyetini en küçüklemeye çalışmak bu tip hizmet sistemlerinin en önemli amaçlarından biridir. Bu amacı sağlamak için, literatürde TÇP için kullanılabilir Esnek Vardiya Başlangıç Zamanları (EVVZ), Vardiya Başlangıç Zamanı Bandı (VBZB), Mola Zamanı Pencere (MZP), Farklı Vardiya Uzunlukları (FVU) / Çalışma Günü Kalıpları (ÇGK), Yarı Zamanlı Personel (YZP) kullanımı gibi esnek çizelgeleme politikaları tanımlanmıştır. Bu makale, bahsi geçen esnek çizelgeleme politikalarını birlikte ele alan ilk çalışmadır. Ayrıca, bu makalede ilk defa TÇP için, matematiksel programlama tabanlı bir meta-sezgisel olan mat-sezgisel çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Bu yaklaşım ile değişken komşuluk arama tabanlı bir yerel arama algoritması ile matematiksel programlamayı birlikte kullanan hızlı ve etkin bir mat-sezgisel algoritma (MSA) tasarlanmıştır. TÇP için tasarlanan bu MSA, küme-kapsama formülasyonu ile modellenebilen diğer problemlerin çözümünü için de yeni bir yöntem olma özelliği taşımaktadır. Önerilen MSA'nın performansını ölçebilmek için, çizelgeleme esnekliği azaltılmış daha küçük boyutlu problemlerden oluşan bir test problemleri kümesi oluşturulmuş ve bu kümedeki problemler hem küme-kapsama modeli ile hem de MSA ile çözülmüşlerdir. Karşılaştırma sonucunda, her iki yöntemde de optimal sonuçlara ulaşıldığı tespit edilmiştir. Ancak MSA'nın bu problemleri çözmek için kullandığı ortalama sürenin çok daha kısa olduğu görülmüştür. Daha sonra, çizelgeleme esnekliği gittikçe artan daha büyük boyutlardaki problemlerden oluşan başka bir test problemleri kümesi oluşturulmuştur. Bu test problemleri kümesinde yer alan problemler yine hem küme-kapsama modeli ile hem de MSA ile çözülmeye çalışılmıştır.

Bu sayısal deneylere göre, küme-kapsama modelinin çoğu problemin çözümünde yetersiz kaldığı, yani bazı problemleri hiç çözemediği, bazılarında ise MSA'nın bulmuş olduğu sonuçlardan daha iyi bir sonuç bulamadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, bu sonuçlara göre MZP esnek çizelgeleme politikasının VBZB esnek çizelgeleme politikasına göre amaç fonksiyonu değerini daha fazla azalttığı görülmüştür. Deneylerin son aşamasında ise YZP'nin amaç fonksiyonu değeri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deney sonuçları, YZP sayısındaki artışın amaç fonksiyonu değerini azalttığını göstermiştir. Yapılan bu çalışmalara ek olarak gelecek çalışmalarda, TÇP'ye, çalışanların tercihlerini de dahil

etmek mümkün olabilir. Tur çizelgelerinin oluşturulması ve tercihler doğrultusunda çalışanlara tur çizelgelerinin atanması aynı anda gerçekleştirilebilir. Bu makalede geliştirilen çözüm yaklaşımının son kullanıcılar tarafından etkin bir şekilde kullanılabilmesi için kullanıcı dostu ara yüze sahip bir yazılım geliştirilebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, 2017.KB.FEN.024 numaralı BAP kapsamında Dokuz Eylül Üniversitesi tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Alfares, H.K., Survey, categorization, and comparison of recent tour scheduling literature, *Annals of Operations Research*, 127 (1-4), 145-175, 2004.
2. Van den Bergh, J., Beliën, J., De Bruecker, P., Demeulemeester, E., De Boeck, L., Personnel scheduling: A literature review, *Eur. J. Oper. Res.*, 226 (3), 367-385, 2013.
3. Dantzig, G., Scheduling toll collectors, *Oper. Res.*, 2 (3), 339-341, 1954.
4. Beaumont, N., Scheduling staff using mixed integer programming, *Eur. J. Oper. Res.*, 98 (3), 473-484, 1997.
5. Mason, A.J., Ryan, D.M., Panton, D.M., Integrated simulation, heuristic and optimisation approaches to staff scheduling, *Oper. Res.*, 46 (2), 161-175, 1998.
6. Alfares, H.K., Aircraft maintenance workforce scheduling A case study, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 5 (2), 78-89, 1999.
7. Lin, C.K.Y., Lai, K.F., Hung, S.L., Development of a workforce management system for a customer hotline service, *Computers & Operations Research*, 27 (10), 987-1004, 2000.
8. Burns, R.N., Carter, M.W., Work force size and single shift schedules with variable demands, *Manage. Sci.*, 31 (5), 599-607, 1985.
9. Brusco, M.J., Jacobs, L.W., Starting-time decisions in labor tour scheduling: An experimental analysis and case study, *Eur. J. Oper. Res.*, 131 (3), 459-475, 2001.
10. Bard, J.F., Staff scheduling in high volume service facilities with downgrading, *IIE Trans.*, 36 (10), 985-997, 2004.
11. Stollitz, R., Operational workforce planning for check-in counters at airports, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46 (3), 414-425, 2000.
12. Rocha, M., Oliveira, J.F., Carravilla, M.A., Cyclic staff scheduling: optimization models for some real-life problems, *Journal of Scheduling*, 16 (2), 231-242, 2013.
13. Bailey, J., Integrated days off and shift personnel scheduling, *Comput. Ind. Eng.*, 9 (4), 395-404, 1985.
14. Bechtold, S.E., Jacobs, L.W., Implicit modeling of flexible break assignments in optimal shift scheduling, *Manage. Sci.*, 36 (11), 1339-1351, 1990.
15. Addou, I., Soumis, F., Bechtold-jacobs generalized model for shift scheduling with extraordinary overlap, *Annals of Operations Research*, 155 (1), 177-205, 2007.

16. Thompson, G.M., Improving the utilization of front-line service delivery system personnel, *Decision Sciences*, 23 (5), 1072-1098, 1992.
17. Jacobs, L.W., Bechtold, S.E., Microcomputer-based workforce scheduling, *International Journal of Service Industry Management*, 4 (1), 36-48, 1993.
18. Jacobs, L.W., Bechtold, S.E., Labor utilization effects of labor scheduling flexibility alternatives in a tour scheduling environment, *Decision Sciences*, 24 (1), 148-166, 1993.
19. Jarrah, A.I., Bard, J.F., deSilva, A.H., Solving large-scale tour scheduling problems, *Manage. Sci.*, 40 (9), 1124-1144, 1994.
20. Jacobs, L.W., Brusco, M.J., Overlapping start-time bands in implicit tour scheduling, *Manage. Sci.*, 42 (9), 1247-1259, 1996.
21. Brusco, M.J., Jacobs, L.W., Optimal models for meal-break and start-time flexibility in continuous tour scheduling, *Manage. Sci.*, 46 (12), 1630-1641, 2000.
22. Topaloglu, S., Ozkarahan, I., Implicit optimal tour scheduling with flexible break assignments, *Comput. Ind. Eng.*, 44 (1), 75-89, 2003.
23. Rekik, M., Cordeau, J.F., Soumis, F., Using Benders decomposition to implicitly model tour scheduling, *Annals of Operations Research*, 128 (1-4), 111-133, 2004.
24. Isken, M.W., An implicit tour scheduling model with applications in healthcare, *Annals of Operations Research*, 128 (1-4), 91-109, 2004.
25. Rong, A., Monthly tour scheduling models with mixed skills considering weekend off requirements, *Comput. Ind. Eng.*, 59 (2), 334-343, 2010.
26. Rekik, M., Cordeau, J.F., Soumis, F., Implicit shift scheduling with multiple breaks and work stretch duration restrictions, *Journal of Scheduling*, 13 (1), 49-75, 2010.
27. Loucks, J.S., Jacobs, F.R., Tour scheduling and task assignment of a heterogeneous work, *Decision Sciences*, 22 (4), 719-738, 1991.
28. Bechtold, S.E., Brusco, M.J., A microcomputer-based heuristic for tour scheduling of a mixed workforce, *Computers & Operations Research*, 21 (9), 1001-1009, 1994.
29. Bechtold, S.E., Implicit optimal and heuristic labor staffing in a multiobjective, multilocation environment, *Decision Sciences*, 19 (2), 353-372, 1988.
30. Bechtold, S.E., Showalter, M.J., A methodology for labor scheduling in a service operating system, *Decision Sciences*, 18 (1), 89-107, 1987.
31. Brusco, M.J., Johns, T.R., Improving the dispersion of surplus labor in personnel scheduling solutions, *Comput. Ind. Eng.*, 28 (4), 745-754, 1995.
32. Easton, F.F., Rossin, D.F., A stochastic goal program for employee scheduling, *Decision Sciences*, 27(3), 541-568, 1996.
33. Mathirajan, M., Ramanathan, R.A., (0-1) goal programming model for scheduling the tour of a marketing executive, *Eur. J. Oper. Res.*, 179 (2), 554-566, 2007.
34. Topaloglu, S., Ozkarahan, I., An implicit goal programming model for the tour scheduling problem considering the employee work preferences, *Annals of Operations Research*, 128 (1-4), 135-158, 2004.
35. Easton, F.F., Rossin, D.F., Sufficient working subsets for the tour scheduling problem, *Manage. Sci.*, 37 (11), 1441-1451, 1991.
36. Love, R.R., Hoey, J.M., Management science improves fast-food operations, *Interfaces*, 20 (2), 21-29, 1990.
37. Brusco, M.J., Solving personnel tour scheduling problems using the dual all-integer cutting plane, *IIE Trans.*, 30 (9), 835-844, 1998.
38. Brusco, M.J., Jacobs, L.W., Eliminating redundant columns in continuous tour scheduling problems, *Eur. J. Oper. Res.*, 111 (3), 518-525, 1998.
39. Ni, H., Abeledo, H., A branch-and-price approach for large-scale employee tour scheduling problems, *Annals of Operations Research*, 155 (1), 167-176, 2007.
40. Brunner, J.O., Bard, J.F., Flexible weekly tour scheduling for postal service workers using a branch and price, *Journal of Scheduling*, 16 (1), 129-149, 2013.
41. Brunner, J.O., Stollitz, R., Stabilized branch and price with dynamic parameter updating for discontinuous tour scheduling, *Computers & Operations Research*, 44, 137-145, 2014.
42. Henderson, W.B., Berry, W.L., Heuristic methods for telephone operator shift scheduling: an experimental analysis, *Manage. Sci.*, 22 (12), 1372-1380, 1976.
43. Keith, E. G., Operator scheduling, *AIIE Transactions*, 11 (1), 37-41, 1979.
44. Morris, J.G., Showalter, M.J., Simple approaches to shift, days-off and tour scheduling problems, *Manage. Sci.*, 29 (8), 942-950, 1983.
45. Brusco, J.M. Johns, T.R., A sequential integer programming method for discontinuous labor tour scheduling, *Eur. J. Oper. Res.*, 95 (3), 537-548, 1996.
46. Cezik, T., Günlük, O., Luss, H., An integer programming model for the weekly tour scheduling problem, *Nav. Res. Logist.*, 48 (7), 607-624, 2001.
47. Goodale, J.C., Thompson, G.M., A comparison of heuristics for assigning individual employees to labor tour schedules, *Annals of Operations Research*, 128 (1-4), 47-63, 2004.
48. Mabert, V.A., Showalter, M.J., Measuring the impact of part-time workers in service organizations, *J. Oper. Manage.*, 9 (2), 209-229, 1990.
49. Thompson, G.M., Representing employee requirements in labour tour scheduling, *Omega*, 21 (6), 657-671, 1993.
50. Gopalakrishnan, M., Gopalakrishnan, S., Miller, D.M., A decision support system for scheduling personnel in a newspaper publishing environment, *Interfaces*, 23 (4), 104-115, 1993.
51. Bechtold, S.E., Brusco, M.J., Working set generation methods for labor tour scheduling, *Eur. J. Oper. Res.*, 74 (3), 540-551, 1994.
52. Rocha, M., Oliveira, J.F., Carravilla, M.A., A constructive heuristic for staff scheduling in the glass

- industry, *Annals of Operations Research*, 217 (1), 463-478, 2014.
53. van der Veen, E., Hans, E.W., Post, G.F., Veltman, B., Shift rostering using decomposition: assign weekend shifts first, *Journal of Scheduling*, 18 (1), 29-43, 2015.
 54. Brusco, M.J., Jacobs, L.W., A simulated annealing approach to the cyclic staff-scheduling problem, *Nav. Res. Logist.*, 40 (1), 69-84, 1993.
 55. Brusco, M.J., Jacobs, L.W., A simulated annealing approach to the solution of flexible labour scheduling problems, *Journal of the Operational Research Society*, 44, 1191-1200, 1993.
 56. Thompson, G.M., Labor scheduling using NPV estimates of the marginal benefit of additional labor capacity, *J. Oper. Manage.*, 13 (1), 67-86, 1995.
 57. Goodale, J.C., Tunc, E., Labor Scheduling with Learning Effects, 27th Annual Meeting of the Decision Science Institute, Atlanta, GA, 432, 24-26 Kasım, 1996.
 58. Easton, F., Mansour, N., A Distributed Genetic Algorithm for Employee Scheduling Problems, *Genetic Algorithms: Proceedings of the 5th International Conference*, Editör: Forest S., Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, 360-367, 1993.
 59. Tanomaru, J., Staff scheduling by a genetic algorithm with heuristic operators, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Vancouver, BC, Canada, 1951-1956, 1995
 60. Brusco, M.J., Jacobs, L.W., Developing flexible personnel schedules using a microcomputer, *Work Study*, 42 (5), 5-8, 1993.
 61. Goodale, J.C., Tunc, E., Tour scheduling with dynamic service rates, *International Journal of Service Industry Management*, 9 (3), 226-247, 1998.
 62. Easton, F.F., Rossin, D.F., Overtime schedules for full-time service workers, *Omega*, 25 (3), 285-299, 1997.
 63. Brusco, M.J., Johns, T.R., An integrated approach to shift-starting time selection and tour-schedule construction, *Journal of the Operational Research Society*, 62 (7), 1357-1364, 2011.
 64. Dahmen, S., Rekik, M., Solving multi-activity multi-day shift scheduling problems with a hybrid heuristic, *Journal of Scheduling*, 18 (2), 207-223, 2014.
 65. Alvarez-Valdes, R., Crespo, E., Tamarit, J.M., Labour scheduling at an airport refuelling installation, *Journal of the Operational Research Society*, 50 (3), 211-218, 1999.
 66. Gartner, J., Musliu, N., Slany, W., Rota: a research project on algorithms for workforce scheduling and shift design optimization, *AI Commun.*, 14 (2), 83-92, 2001.
 67. Henao, C.A., Muñoz, J.C., Ferrer, J.C., The impact of multi-skilling on personnel scheduling in the service sector: a retail industry case, *Journal of the Operational Research Society*, 66 (12), 1949-1959, 2015.
 68. Cuevas, R., Ferrer, J.C., Klapp, M., Munoz, J.C., A mixed integer programming approach to multi-skilled workforce scheduling, *Journal of Scheduling*, 19 (1), 91-106, 2016.
 69. Restrepo, M.I., Gendron, B., Rousseau, Louis-Martin, Branch-and-price for personalized multiactivity tour scheduling, *INFORMS Journal on Computing*, 28 (2), 334-350, 2016.
 70. Restrepo, M.I., Gendron, B., Rousseau, Louis-Martin, Combining Benders decomposition and column generation for multi-activity tour scheduling, *Computers & Operations Research*, 93, 151-165, 2018.
 71. Ahipasaoglu, O., Erkip, N., Karasan, O.E., The venue management problem: setting staffing levels, shifts and shift schedules at concession stands, *Journal of Scheduling*, 22, 69-83, 2019.
 72. Porto, A.F., Henao, C.A., López-Ospina, H., González, E.R., Hybrid flexibility strategy on personnel scheduling: retail case study, *Comput. Ind. Eng.*, 133, 220-230, 2019.
 73. Zeng, L., Zhao, M., Liu, Y., Airport ground workforce planning with hierarchical skills: a new formulation and branch-and-price approach, *Annals of Operations Research*, 275, 245-258, 2019.
 74. Alfares, H.K., Abdulaziz, S.A., Optimum workforce scheduling for multiple security gates, *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 58 (3), 438-455, 2020.
 75. Kiermaier, F., Frey, M., Bard, J.F., The flexible break assignment problem for large tour scheduling problems with an application to airport ground handlers, *Journal of Scheduling*, 23, 177-209, 2020.
 76. Mladenović, N., Hansen, P., Variable neighborhood search, *Computers & Operations Research*, 24 (11), 1097-1100, 1997.
 77. McGinnis, L.F., Culver, W.D., Deane, R.H., One- and two-phase heuristics for workforce scheduling, *Comput. Ind. Eng.*, 2 (1), 7-15, 1978.

