

Atf için: Ceylan Z, Arslan M, Arslan T, 2021. Bir Hafif Raylı Ulaşım Sisteminde Makinist Çizelgeleme Problemi. İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11(2): 1027-1039.

To Cite: Ceylan Z, Arslan M, Arslan T, 2021. Machinist Scheduling Problem in a Light Rail Transportation System. Journal of the Institute of Science and Technology, 11(2): 1027-1039.

Bir Hafif Raylı Ulaşım Sisteminde Makinist Çizelgeleme Problemi

Zeynep CEYLAN^{1*}, Merve ARSLAN², Tuba ARSLAN²

ÖZET: Hızlı kentleşme ve nüfus artışından dolayı raylı ulaşım sisteminin kullanımı giderek artmaktadır. Ancak, raylı ulaşım sistemlerin şehir içi taşımacılıkta yaygın kullanımı beraberinde büyük boyutlu ve çözülmesi zor problemlere sebep olmaktadır. Özellikle, tren seferlerinin düzenlenmesinde dengesizlikler, makinistlerin vardiya planlamasının ve çalışma-dinlenme sürelerinin uygun şekilde ayarlanamaması gibi pek çok sorun ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, bu sistemlerin planlanması, işletilmesi ve sürekliliğin sağlanması için sorunlara hızlı ve uygun çözümler üretilmesi zorunlu hale gelmiştir. Bu çalışmada, hafif raylı ulaşım sisteminde hizmet eden bir işletmenin tüm makinistlerinin toplam çalışma süresini ve vardiya sayısını eşitleyerek adil bir görev çizelgesi oluşturulması hedeflenmektedir. Mevcut durumda işletmede makinist görev çizelgesinin manuel olarak yapılması zaman kaybına sebep olmaktadır. Ayrıca, oluşturulan çizelgede eşit iş dağılımının sağlanamaması çalışan memnuniyetsizliğine yol açmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada, söz konusu işletmede makinist çizelgeleme problemi için hedef programlama modeli geliştirilmiş ve GAMS/CPLEX programı ile çözülmüştür. Önerilen matematiksel model ile adil görev ataması sağlanmış ve çalışanların artan motivasyon ve memnuniyeti ile hizmet kalitesinin artması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Çizelgeleme, hedef programlama, raylı ulaşım sistemi, makinist, vardiya

Machinist Scheduling Problem in a Light Rail Transportation System

ABSTRACT: Due to rapid urbanization and population growth, the use of the rail transportation system is gradually increasing. However, the widespread use of rail transportation systems in urban transport causes large-scale and difficult-to-solve problems. In particular, many problems arise, such as imbalances in the planning of train trips, inability to adjust shift scheduling and working-rest periods of the machinists. For this reason, it has become obligatory to generate fast and appropriate solutions to the problems in order to plan, operate and maintain these systems. In this study, it is aimed to create a fair task schedule by equalizing the total working time and the number of shifts of all the machinists of a company serving in the light rail transportation system. In the current situation, it is very time-consuming to manually perform the task schedule of the machinist. In addition, the lack of equal work distribution in the schedule created leads to employee dissatisfaction. Therefore, in this study, the goal programming model for the machinist scheduling problem has been developed and solved by using GAMS/CPLEX program. With the proposed mathematical model, fair task assignment has been achieved and it is expected that the quality of service will increase with the increased motivation and satisfaction of the employees.

Keywords: Scheduling, goal programming, rail transportation system, machinist, shift

¹Zeynep CEYLAN ([Orcid ID: 0000-0002-3006-9768](https://orcid.org/0000-0002-3006-9768)), Samsun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye

²Merve ARSLAN ([Orcid ID: 0000-0002-8873-4732](https://orcid.org/0000-0002-8873-4732)), Tuba ARSLAN ([Orcid ID: 0000-0001-9902-8705](https://orcid.org/0000-0001-9902-8705)), Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Zeynep CEYLAN, e-mail: zeynep.ceylan@samsun.edu.tr

GİRİŞ

Çizelgeleme, üretim ve hizmet sektöründe, işlerin veya görevlerin belirli kurallar ve performans kriterleri göz önüne alınmasıyla nasıl, nerede ve ne zaman yapılacağını belirli bir sıraya dizme, atama ve zamanlama işlemidir (Pinedo, 2012; Ceylan ve ark., 2019a). Üretim faaliyetlerinde çizelgeleme, elde olan kaynakların optimum kullanımı için yapılır. Var olan işler ilgili ekipmanlara atanır. Bu atama ile işlerin hangi sırayla yapılacağı ve hangi makinelerde işlem görecekları belirlenmiş olur. Bu planlama sonucunda müşteri bekleme süresi azaltılmış, stok miktarı minimize edilmiş, müşteri memnuniyeti sağlanmış, personel ve eldeki ekipman en etkin şekilde kullanılmış olur (Kayacı ve Yiğit, 2012).

Hizmet sistemlerinde çizelgeleme, işgücünün ve kaynakların etkin kullanımı için yapılır (Huang ve ark., 2011). Günümüz ekonomisinde hizmet sektöründeki en önemli ve en pahalı olan işgücünü çizelgeleme, personele uygun olarak oluşturulan çalışma planıdır. Ancak, uygun bir çalışma planı oluşturmak için uyulması zorunlu olan yasal gereklilikler, talep ve memnuniyetlerin karşılanması gibi pek çok kısıtlama yer almaktadır. Ayrıca, sağlık, koruma hizmetleri, ulaşım ve çağrı merkezinde yer alan pek çok meslek farklı gereksinimleri karşılamak için farklı çalışma planı gerektirir. Bu nedenle, her hizmet sektörünün çalışma prensibi aynı olmadığından uygun bir çalışma planı oluşturmak için geliştirilen modeller ve çözüm teknikleri de birbirinden farklıdır (Özder ve ark., 2019).

Görev çizelgeleme, son yıllarda araştırmacılar tarafından oldukça fazla incelenen çizelgeleme problemlerinden biridir. İşletmelerde, hastanelerde, okullarda, havalimanlarında ve buna benzer pek çok yerde görev çizelgeleme problemi ile karşılaşmaktayız (Jütte ve ark., 2017). Bu problemde temel amaç en düşük personel/çalışan/görevli sayısı ile en düşük maliyetli ve iş yüklerinin ve izin günlerinin dengeli olduğu uygun görev çizelgesinin bulunmasıdır. Böylelikle, çalışanın daha adil koşullarda çalışması sağlanarak memnuniyetinin ve performansının artırılması sağlanmış olur. Ayrıca, çalışanın ihtiyaç ve tercihlerinin dikkate alınması hem çalışanın hem de ilgili işletmenin planlı ve sistemli bir şekilde devam etmesini sağlar.

Ekip çizelgeleme problemi, demiryolu, havayolu ve hızlı transit gibi toplu taşıma sistemleri için önemli bir problem haline gelmiştir (Fuentes ve ark., 2019; Su ve ark., 2019; Heil ve ark., 2020). Bu çalışma kapsamında, raylı sistem taşımacılığı planlama sürecinde karşılaşılan en kapsamlı ve zor problemlerden biri olan makinist çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Bu problemde, belirlenen plan takvimi içerisinde planlanan tüm seferleri kapsayacak şekilde makinistler için çalışma çizelgesi oluşturulur. Bu çizelgede görevler, izin, dinlenme süreleri ile ilgili listeler bulunur. Bu listeler devletin çalışma politikalarına ilişkin kısıtlama ve sınırlamalar dikkate alınarak haftalık veya aylık olarak yapılır. Bu sayede makinist çizelgeleme ile hazırlanan görevler her günü içerecek şekilde her makiniste sırasıyla atanır. Literatürde, demiryolu ekip çizelgeleme ve ekip atama problemleri üzerine pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar genellikle tamsayı programlama modeli, çok amaçlı matematiksel model, küme kapsama modeli gibi çeşitli optimizasyon modelleri kullanılarak sezgisel ve meta-sezgisel algoritmalar ile çözülmüştür. Çizelge 1' de bu alanda yapılan bazı çalışmaların özeti sunulmaktadır.

Örneğin, Sarucan (1999) çalışmasında, raylı sistemde tramvay hareketleri arasındaki kalkış süresinin bulunması için simülasyon çalışması yapmış ve buna göre yeni bir tarife oluşturulmaya çalışmıştır. Geliştirilen model ile raylı sistem için gerekli vatman sayısını ve vatmanların hangi gün ve vardiyada çalışması gerektiğini belirlemiştir. Kroon ve Fischetti (2001) çalışmalarında, sürücülere uygun bir görev çizelgesinin oluşturulması ile tren hizmetlerinin daha kaliteli ve daha dakik olacağını belirtmişlerdir. Çalışmada, ek kısıtlamalar içeren küme kapsama modeli kullanılmış ve sütun türetme

algoritması, Lagrange gevşetmesi yöntemi ve sezgisel algoritmalar ile model çözülmüştür. Moudani ve ark. (2001) çalışmalarında ekip atama problemi için çok amaçlı matematiksel model önermişlerdir.

Çizelge 1. Demiryolu ekip çizelgeleme problemi üzerine yapılan bazı çalışmalar

Referans	Amaç/Vurgu	Model	Çözüm Yaklaşımı
Sarucan, 1999	-İhtiyaç duyulan vatman sayısını belirlemek ve bulunan vatmanların hangi gün ve vardiyalarda çalışacağını belirlemek.	Tamsayı doğrusal model	Steepest Ascent sezgiseli, Simülasyon
Kroon ve Fischetti, 2001	-Tren hizmetlerinin kalitesini ve dakiklığını artırmak.	Küme kapsama modeli	Sütun türetme algoritması, Lagrange gevşetme yöntemi, Sezgisel algoritma
Moudani ve ark. (2001)	-Ekip operasyon maliyetlerini en aza indirmek. -Ekip üyelerinin memnuniyetini arttırmak.	Çok amaçlı matematiksel model	Genetik algoritma
Valdes (2005)	-İhtiyaç duyulan makinist sayısını belirlemek.	Küme kapsama modeli	Doğrusal programlama gevşetmesi
Huang ve ark. (2011)	-Tüm görevleri üstlenebilecek toplam makinist sayısını en aza indirmek ve çizelgeleme planındaki boşta kalma süresini en aza indirmek.	Matematiksel model	Karınca kolonisi algoritması
Damış Öncül (2012)	-İstasyonlarda bekleyen yolcu sayısını ve sefer yapan tren sayısını en aza indirmek. -Makinistlerin tatil günü tercihlerinin ve vardiya tercihlerinin dikkate alınmamasının ceza maliyeti, dengelenmemiş iş yükünün ceza maliyeti ve 1 günde çalışan toplam makinist sayısının maliyeti gibi maliyetlerin lineer toplamını en küçüklemek.	Karma tamsayı model	Matematiksel programlama
Üstündağ (2014)	-Önceden belirlenen bir tren çizelgesindeki tüm tren seferlerini tam olarak kapsayan en düşük maliyetli ekip eşleştirmeleri kümesini bulmak. -Tren öncelikleri ve maliyetlerini dikkate alarak makinistleri trenlere atamak.	Küme kapsama modeli	Sütun türetme algoritması, Rassel atama yöntemi
Hanafi ve Kozan (2014)	-Seyahat süresi boyunca toplam âtil süreyi en aza indirerek görevli ekip sayısını en aza indirmek.	Matematiksel model	Benzetilmiş tavlama
Suyabatmaz ve Şahin (2015)	-İhtiyaç duyulan minimum ekip sayısı belirlemek.	Küme kapsama modeli	Sütun türetme algoritması, Doğrusal programlama gevşetmesi
Tapkan ve ark. (2018)	-Çalışan toplam personel sayısı, her personelin haftalık çalışma süresinin yasal çalışma süresini aşım miktarlarının toplamı ve ortalama dinlenme süresi ile gerçekleşen dinlenme süresi arasındaki en büyük farkı en aza indirmek.	Çok amaçlı matematiksel model	Hedef programlama
Lin and Tsai (2019)	-Ekip çizelgeleme ve ekip atama problemlerini entegre ederek sürücü sayısını en aza indirmek.	Karma tamsayı model	Dal-ücret/ Dal-sınır algoritması, Derinlik arama algoritması
Hoffmann ve Buscher (2019)	-Operasyon koşullarını ve yasal gereklilikleri karşılarken mürettebat maliyetlerini en aza indirmek.	Ağ akış problemi	Tam sayılı programlama
Rählmann ve Thonemann (2020)	-Operasyonel bir yük demiryolu sisteminde zaman çizelgesini ve mürettebat programını koordine etmenin etkisini araştırmak.	Küme kapsama modeli	Sütun türetme algoritması

Önerilen modelde, ekip operasyon maliyetlerinin azaltmak ve ekip üyelerinin memnuniyetini arttırmak hedeflenmiştir. Sezgisel yaklaşımı genetik algoritma ile birleştirerek maliyetleri düşürecek

çözümler aramışlardır. Ernst ve ark. (2004) çalışmalarında, literatürde makinist çizelgeleme problemi için geliştirilen model ve algoritmaları detaylı incelemişlerdir. Problemi talep modelleme, izin günü çizelgeleme, vardiya çizelgeleme, iş sıralarının oluşturulması, görev atama ve personel atama olmak üzere altı modüle ayırmış ve bu modüller için farklı çözüm yaklaşımlarının uygulanabileceğini belirtmişlerdir.

Valdes (2005) tez çalışmasında ekip çizelgeleme ve ekip atama problemini entegre etmiştir. Her iki problemi aynı anda çözmek için ihtiyaç duyulan toplam makinist sayısını optimize eden bir küme kapsama modeli önermiştir. Huang ve ark. (2011) makinist çizelgeleme problemini araç rotalama problemine dönüştürmüşlerdir. Problemi çözmek için karınca kolonisi optimizasyonu algoritmasına dayalı bir algoritma geliştirmişlerdir. Tayvan Demiryolları İdaresi'nden alınan gerçek veriler ile önerilen model ve algoritmayı test etmişlerdir. Sonuçlar, model ve algoritmanın problemi etkili ve verimli bir şekilde çözebildiğini ve daha az makinist ve daha kısa boşta kalma süresi açısından daha iyi bir çözüm elde edebildiğini göstermiştir.

Danış Öncül (2012) tez çalışmasında, hafif-raylı sistem tarife oluşturma ve makinist atama problemi için iki yeni matematiksel model önermiştir. Geliştirilen tarife oluşturma modelinde istasyonlarda bekleyen yolcu sayısının ve sefer yapan tren sayısının azaltmak hedeflenmiştir. Üstündağ (2014) Eskişehir merkezli bir işletme için tren çizelgesinde yer alan 62 adet tren seferi için ekip çizelgeleme ve ekip atama problemini çalışmıştır. Daha sonra, ekip eşleştirme probleminin sonuçlarını kullanarak makinist atama problemi için sezgisel bir algoritma geliştirmiştir. Hanafi ve Kozan (2014) çalışmalarında, demiryolu ekip çizelgeleme probleminin çözümü için yeni bir matematiksel model önermişlerdir. Matematiksel model ile, seyahat süresi boyunca toplam âtil süreyi en aza indirerek görevli ekip sayısını en aza indirmeyi amaçlamışlardır. Geliştirilen model çok sayıda karar değişkeni ve kısıt içerdiğinden dolayı modelin çözümü için yeni bir hibrit sezgisel algoritma geliştirmişlerdir.

Suyabatmaz ve Şahin (2015) çalışmalarında demiryolu ekip çizelgeleme problemi üzerinde durmuşlardır. Gerekli ekip sayısını en küçükleyen matematiksel model geliştirmişlerdir. Tapkan ve ark. (2018) Kayseri Ulaşım A.Ş.'nin raylı sistem planlama sürecinde yer alan görev çizelgeleme problemi için çok amaçlı 0-1 karma tam sayılı matematiksel model geliştirmişlerdir. Önerilen matematiksel model ile çalışan toplam personel sayısını, her personelin haftalık yasal çalışma süresinin aşım miktarlarının toplamını ve ortalama dinlenme süresi ile gerçekleşen dinlenme süresi arasındaki en büyük farkı en küçükleme çalışmışlardır. Lin and Tsai (2019) ekip çizelgeleme ve ekip atama problemlerini entegre eden karma tamsayı programlama modeli önermişlerdir. Problemin çözümü için, dal-ücret/sınır algoritması ve derinlik arama algoritmasını kullanmışlardır.

Hoffmann ve Buscher (2019) demiryolu ekip çizelgeleme problemi için bir ark akış modeli sunmuşlardır. Rählmann ve Thonemann (2020) ekip çizelgeleme problemi için matematiksel model geliştirmiş ve sütun türetme yöntemi ile çözüm elde etmişlerdir. Geliştirdikleri modeli büyük bir Avrupa Nakliye Demiryolu Operatörünün üç gerçek veri kümesi üzerinde test etmişlerdir. Modelin çözümü ile boşta kalma süresi ve maliyette önemli bir azalma elde ettiklerini göstermişlerdir. Bu çalışmada, bir hafif raylı ulaşım sisteminde hizmet veren bir şirketin planlama sürecindeki makinist çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Tüm yasal kısıtlamalar ve sınırlamalar dikkate alınarak hedef programlama modeli geliştirilmiş ve GAMS programında CPLEX çözücü kullanılarak çözülmüştür. Geliştirilen model ile bir aylık zaman periyodunda haftanın her gününü kapsayacak şekilde makinistlerin izin sayısı ve görev yükünün dengelenmesi ve böylece iş memnuniyetlerinin ve performanslarının artırılması hedeflenmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmanın bu bölümünde ele alınan makinist çizelgeleme probleminin tanımı, çözümü için geliştirilen yöntemler ve önerilen matematiksel programlama modeline ilişkin ayrıntılara yer verilmiştir.

Problemin Tanımı

Bu çalışmada, Türkiye’de ulaşım sektöründe faaliyet gösteren bir firmanın hafif raylı sistem işletmesinde yer alan makinistlerin vardiyalarının çizelgelenmesi incelenmiştir. Söz konusu işletmede, toplam 72 makinist bulunmaktadır. Makinistler her gün 06:15-23:45 saatleri arasında sabah ve akşam vardiyası olmak üzere iki vardiya halinde çalışmaktadır. Sabah vardiyasında ihtiyaç duyulan makinist sayısı minimum 26, 3 yedek ile maksimum 29 olmaktadır. Akşam vardiyasında ise minimum 27, 3 yedek ile birlikte maksimum 30 makiniste ihtiyaç duyulmaktadır.

Hafif raylı sistem işletmesinde makinist çizelgelemede bazı kurallar dikkate alınmalıdır. Bu kuralların bir kısmı çalışma politikalarındaki yasal sınırlamalardan doğan kurallar, diğer kurallar ise hafif raylı sistem işletmesinde uygulanan operasyonel kurallardır. Çalışma kapsamında dikkate alınan tüm kurallar aşağıda listelenmiştir.

- Makinist ataması için planlama süresi bir haftadır. Her hafta pazartesi günü başlar ve pazar günü biter.
- Bir personel haftalık maksimum 6 gün çalışabilir. Çalışma şartları gereğince haftalık izin süresi 5 çalışma günü için 2, 6 çalışma günü için 1 gündür.
- Bir personelin günlük çalışma süresi 11 saati geçemez.
- Bir makinistin haftalık çalışma süresi yasalarla 45 saat olarak belirlenmiştir. Haftalık 5 gün çalışma planı için günlük vardiya süresi 9 saat, 6 gün çalışma planı için ise günlük vardiya süresi 7,5 saattir.
- Makinistlerin vardiya tatilleri dengeli olmalıdır.
- Bir makinist 1 haftanın tüm iş günlerinde aynı vardiya tipinde (ya akşam ya da sabah) çalışmalıdır.

Hedef Programlama

Hedef programlama modeli, birden fazla amacı olan problemi tek bir amacı olan probleme dönüştürmeye çalışan optimizasyon yöntemidir. Hedef programlama üzerine çalışmalar 1970’li yıllarda Charnes ve Chooper tarafından başlatılmıştır (Charnes ve Chooper, 1977). Bu çalışmaların ilk aşamasında hedef programlama modelinin genel yapısı belirlenmiş, ikinci aşamasında hedef fonksiyonunun öncelik kavramlarına değinilmiş ve son olarak ortaya koyulan önceliklere ait ağırlıklar belirlenmiştir. Hedef programlama modeli oluşturulurken ilk önce hedefler belirlenir, amaçlar birer kısıt haline dönüştürülür. Bu modelde, hedefleri doğrudan optimize etmek yerine tahmini/beklenen hedef değerlere ulaşılmak istenir.

Hedef programlama modelinde amaç, tahmini/beklenen hedef değerlerinden sapma miktarını en küçükmeye çalışmaktır. Sapma değişkeni, hedeflenen amaç ile modelin çözümü ile elde edilen sonuç arasındaki farkı ölçer. Bu sapma miktarları pozitif ve negatif olarak ikiye ayrılmaktadır. Ulaşılmak istenen hedef aşıldıysa sapma pozitif (S_i^+), hedefin altında bir değer elde edildiyse sapma negatiftir (S_i^-). Burada i ulaşılmak istenen hedef sayısını gösterir (Kaçmaz ve ark., 2019; Bakhtavar ve ark., 2020).

Literatürde hedef programlama çeşitleri tek hedefli programlama, eşit ağırlıklı çok hedefli programlama, ağırlıklı hedef programlama, öncelikli hedef programlama ve ağırlıklı öncelikli hedef

programlama olarak sınıflandırılmaktadır (Ünal ve ark., 2019). Ağırlıklı, öncelikli ve ağırlıklı öncelikli hedef programlama modellerinde karar vericinin belirlediği önem derecesi ve önceliğe göre sapma değişkenlerine ağırlıklar ve/veya öncelikler verilir. Hedef programlama modellerinde kullanılan amaç fonksiyonlarının genel gösterimi Eşitlik (1-5)' te gösterilmiştir.

- Tek hedefli hedef programlama

$$\min Z = (S_1^+ + S_1^-) \quad (1)$$

- Eşit ağırlıklı çok hedefli hedef programlama

$$\min Z = \sum_{i=1}^m (S_i^+ + S_i^-) \quad \forall i \quad (2)$$

- Ağırlıklı hedef programlama

$$\min Z = \sum_{i=1}^m w_i (S_i^+ + S_i^-) \quad \forall i \quad (3)$$

- Öncelikli hedef programlama

$$\min Z = \sum_{i=1}^m P_i (S_i^+ + S_i^-) \quad \forall i \quad (4)$$

- Ağırlıklı öncelikli hedef programlama

$$\min Z = \sum_{i=1}^m w_i P_i (S_i^+ + S_i^-) \quad \forall i \quad (5)$$

Bu çalışma kapsamında, tek hedefli programlama modeli geliştirilmiştir. Tek hedefli programlama, hedef programlama çeşitleri içerisinde en basit olanıdır. Amaç fonksiyonuna etki eden öncelik ve ağırlıklar olmadığı için amaç fonksiyonu sadece sapma değişkenlerinden oluşmaktadır. Bu modelde, ulaşılmak istenen tek bir hedef olduğu için sapma değişkenlerinden biri ya da her ikisi amaç fonksiyonunda kullanılabilir (Ceylan ve ark., 2019b).

Önerilen Matematiksel Model

Çalışmanın bu bölümünde yukarıda listelenen tüm bilgiler eşliğinde bir hafif raylı sistem işletmesine özel makinist çizelgeleme problemi tanımlanmış ve yeni tek hedefli hedef programlama modeli geliştirilmiştir. Önerilen matematiksel modele ait indeks kümeleri, parametreleri, karar değişkenleri, amaç fonksiyonu ve kısıtlar aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

Geliştirilen hedef programlama modelinde, 6. denklem hedef için belirlenen değerden pozitif ve negatif sapma değerlerinin toplamının minimize edilmesini sağlar. 7. kısıt sabah vardiyası için gerekli olan makinist sayısının en az 26 olmasını sağlar. 8. kısıt sabah vardiyası için gerekli makinist sayısının en fazla 29 olmasını sağlar. 9. kısıt akşam vardiyası için gerekli makinist sayısının en az 27 olmasını sağlar. 10. kısıt akşam vardiyası için gerekli makinist sayısının en fazla 30 olmasını sağlar. 11. kısıt her makinistin günde sadece bir vardiyada çalışmasını veya o gün izinli olmasını sağlar. 12. ve 13. kısıtlar çalışma politikaları gereği her makinistin haftada 5 ya da 6 gün çalışmasını sağlar. 14. ve 15. kısıtlar söz konusu işletmenin operasyonel kuralları gereği bir makinistin bir hafta boyunca ya sabah vardiyasında ya da akşam vardiyasında çalışmasını sağlar.

16. kısıt bir makinist herhangi bir hafta sabah vardiyasına atanmıyorsa o haftanın tüm çalışma günlerinde sabah vardiyasında çalışmasını engeller. 17. kısıt bir makinist herhangi bir hafta akşam vardiyasına atanmıyorsa o haftanın tüm çalışma günlerinde akşam vardiyasında çalışmasını engeller. 18. ve 19. kısıtlar işletmenin operasyonel kısıtlarıdır. 18. kısıt herhangi bir hafta sabah vardiyasında çalışan

bir makinistin gelecek hafta akşam vardiyasına atanmasını sağlar. 19. kısıt herhangi bir hafta akşam vardiyasında çalışan bir makinistin gelecek hafta sabah vardiyasına atanmasını sağlar. 20-26 aralığındaki kısıtlar her makinistin arka arkaya en fazla 6 gün çalışmasını sağlar. 27. ve 28. kısıtlar her makinistin arka arkaya 3 gün izin yapmasını engeller. 29. kısıt her makinistin bir ay boyunca izinli olduğu günlerin en az 2 gününün hafta sonuna denk gelmesini sağlar. 30. kısıt hedef kısıttır ve her makinistin bir ay boyunca çalıştığı gün sayısını 22 gün olacak şekilde birbirine eşitler. 31. ve 32. numaralı kısıtlar matematiksel modelde yer alan karar değişkenlerine ait işaret kısıtlarıdır.

<i>İndisler</i>	<i>Tanım Kümesi</i>	
i	Gün indisi	$i = \{1,2, \dots, I\}$
k	Makinist indisi	$k = \{1,2, \dots, K\}$
h	Hafta indisi	$h = \{1,2, \dots, H\}$
I	Gün sayısı	$I = 7$
K	Makinist sayısı	$K = 72$
H	Hafta sayısı	$H = 4$

<i>Parametre</i>	<i>Parametre Tanımı</i>
M	Çok büyük pozitif bir sayı

Karar Değişkenleri

$Y_{h,k}$	k . makinist h . haftada sabah vardiyasına atanırsa 1; aksi takdirde 0.
$T_{h,k}$	k . makinist h . haftada akşam vardiyasına atanırsa 1; aksi takdirde 0.
$X_{h,i,k}$	k . makinist h . haftanın i . gününde sabah vardiyasına atanırsa 1; aksi takdirde 0.
$Z_{h,i,k}$	k . makinist h . haftanın i . gününde akşam vardiyasına atanırsa 1; aksi takdirde 0.
$C_{h,i,k}$	k . makinist h . haftanın i . gününde izinli ise 1; aksi takdirde 0.
S_1^-	Hedef için belirlenen değerden negatif sapma miktarı
S_1^+	Hedef için belirlenen değerden pozitif sapma miktarı

Amaç Fonksiyonu ve Kısıtlar

Geliştirilen modelde, tüm makinistlerin aylık toplam vardiya atamalarının mümkün olduğunca eşit ve her bir makinistin 22 gün çalışması 6 gün izin yapması hedeflenmiştir. Aşağıda, önerilen modele ait amaç fonksiyonu ve kısıtlar yer almaktadır.

$$\text{Min } Z = S_1^- + S_1^+ \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^{72} X_{h,i,k} \geq 26 \quad \forall i,h \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^{72} X_{h,i,k} \leq 29 \quad \forall i,h \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^{72} Z_{h,i,k} \geq 27 \quad \forall i,h \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^{72} Z_{h,i,k} \leq 30 \quad \forall i,h \quad (10)$$

$$X_{h,i,k} + Z_{h,i,k} + C_{h,i,k} = 1 \quad \forall i,h,k \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^7 Z_{h,i,k} + \sum_{i=1}^7 X_{h,i,k} \geq 5 \quad \forall h,k \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^7 Z_{h,i,k} + \sum_{i=1}^7 X_{h,i,k} \leq 6 \quad \forall h,k \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^7 Z_{h,i,k} \leq M \times (1 - Y_{h,k}) \quad \forall h,k \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^7 X_{h,i,k} \leq M \times (1 - T_{h,k}) \quad \forall h,k \quad (15)$$

$$X_{h,i,k} \leq Y_{h,k} \quad \forall i,h,k \quad (16)$$

$$Z_{h,i,k} \leq T_{h,k} \quad \forall i,h,k \quad (17)$$

$$X_{h,i,k} + X_{h+1,i,k} \leq 1 \quad \forall i,k,h=1,2,3 \quad (18)$$

$$Z_{h,i,k} + Z_{h+1,i,k} \leq 1 \quad \forall i,k,h=1,2,3 \quad (19)$$

$$C_{h,i_1,k} + C_{h,i_2,k} + C_{h,i_3,k} + C_{h,i_4,k} + C_{h,i_5,k} + C_{h,i_6,k} + C_{h,i_7,k} \geq 1 \quad \forall k,h=1,2,3 \quad (20)$$

$$C_{h,i_2,k} + C_{h,i_3,k} + C_{h,i_4,k} + C_{h,i_5,k} + C_{h,i_6,k} + C_{h,i_7,k} + C_{h+1,i_1,k} \geq 1 \quad \forall k,h=1,2,3 \quad (21)$$

$$C_{h,i_3,k} + C_{h,i_4,k} + C_{h,i_5,k} + C_{h,i_6,k} + C_{h,i_7,k} + C_{h+1,i_1,k} + C_{h+1,i_2,k} \geq 1 \quad \forall k,h=1,2,3 \quad (22)$$

$$C_{h,i_4,k} + C_{h,i_5,k} + C_{h,i_6,k} + C_{h,i_7,k} + C_{h+1,i_1,k} + C_{h+1,i_2,k} + C_{h+1,i_3,k} \geq 1 \quad \forall k,h=1,2,3 \quad (23)$$

$$C_{h,i_5,k} + C_{h,i_6,k} + C_{h,i_7,k} + C_{h+1,i_1,k} + C_{h+1,i_2,k} + C_{h+1,i_3,k} + C_{h+1,i_4,k} \geq 1 \quad \forall k,h=1,2,3 \quad (24)$$

$$C_{h,i_6,k} + C_{h,i_7,k} + C_{h+1,i_1,k} + C_{h+1,i_2,k} + C_{h+1,i_3,k} + C_{h+1,i_4,k} + C_{h+1,i_5,k} \geq 1 \quad \forall k,h=1,2,3 \quad (25)$$

$$C_{h,i_7,k} + C_{h+1,i_1,k} + C_{h+1,i_2,k} + C_{h+1,i_3,k} + C_{h+1,i_4,k} + C_{h+1,i_5,k} + C_{h+1,i_6,k} \geq 1 \quad \forall k,h=1,2,3 \quad (26)$$

$$C_{h,i_6,k} + C_{h,i_7,k} + C_{h+1,i_1,k} \leq 2 \quad \forall k,h=1,2,3 \quad (27)$$

$$C_{h,i_7,k} + C_{h+1,i_1,k} + C_{h+1,i_2,k} \leq 2 \quad \forall k,h=1,2,3 \quad (28)$$

$$C_{h_1,i_6,k} + C_{h_1,i_7,k} + C_{h_2,i_6,k} + C_{h_2,i_7,k} + C_{h_3,i_6,k} + C_{h_3,i_7,k} + C_{h_4,i_6,k} + C_{h_4,i_7,k} \geq 2 \quad \forall k \quad (29)$$

$$\sum_{h=1}^4 \sum_{i=1}^7 X_{h,i,k} + \sum_{h=1}^4 \sum_{i=1}^7 Z_{h,i,k} + S_1^- - S_1^+ = 22 \quad \forall k \quad (30)$$

$$Y_{h,k}, T_{h,k}, X_{h,i,k}, Z_{h,i,k}, C_{h,i,k} \in \{0,1\} \quad \forall i,h,k \quad (31)$$

$$S_1^-, S_1^+ \geq 0 \quad (32)$$

BULGULAR VE TARTIŞMA

Modelin çözümü için Intel CORE (TM) i5-CPU 2.70 GHz işlemcisi, 8 GB belleği ve Windows 10 işletim sistemine sahip bilgisayar kullanılmıştır. Geliştirilen hedef programlama modeli GAMS/CPLEX paket programı kullanılarak çözülmüş ve amaç fonksiyonun değeri sıfır çıkmıştır. Başka bir deyişle, belirlenen hedef değerinden pozitif ve negatif sapmaların değeri 0 çıkmış ve her makiniste aylık 22 vardiya olacak şekilde eşit sayıda atama yapılarak vardiya sayısı dengelenmiştir. Geliştirilen hedef programlama modelin çözümü ile;

- Her makiniste aylık eşit sayıda vardiya (22 gün) ve izin günü (6 gün) sağlanarak adil bir iş çizelgesi oluşturulmuştur.
- Her makinistin 1 günde en fazla 1 vardiyaya atanması ya da o gün izinli olması sağlanmıştır.
- Oluşturulan çizelge ile işletme tarafından belirlenen sabah ve akşam vardiyalarında ihtiyaç duyulan makinist sayısı sağlanmıştır. Çizelge 2’ de sabah ve akşam vardiyalarına atanan makinist sayısı verilmiştir.
- Her makinistin haftada en az 5, en fazla 6 gün çalışması sağlanmıştır.
- Hafta içerisinde 5 günlük (9 saat/gün) veya 6 günlük (7,5 saat/gün) çalışma planı ile her makinistin haftada 45 saatten fazla çalışması engellenmiştir.
- Makinistlerin herhangi bir haftanın tüm görev günlerinde sadece ya sabah ya da akşam vardiyasında çalışması sağlanmıştır. Örneğin, 1.makinist 1. haftanın 6 iş gününde sadece akşam vardiyasında, 2. makinist ise aynı haftanın 5 iş gününde sadece sabah vardiyasında çalışmaktadır.
- Bir makinistin 2 hafta üst üste aynı vardiyada çalışması engellenmiştir. Örneğin, 1. makinist 1. hafta sabah vardiyasında çalışırken 2. hafta akşam vardiyasında çalışmaktadır. 3. makinist ise 1. hafta akşam vardiyasında çalışırken 2. hafta sabah vardiyasında çalışmaktadır.
- Bir makinistin art arda en fazla 6 gün çalışabilme kısıtı yerine getirilmiştir.
- Makinistlerin aylık izinlerinin en az 2 gününün hafta sonuna denk gelme kısıtı yerine getirilmiştir. Örneğin, 1. makinist 2.ve 4. haftanın 7. gününde izinli iken, 2.makinist 1. haftanın 7. günü ve 2. haftanın 6. gününde izinli olmuştur (Haftanın 6. ve 7. günlerinin sırasıyla cumartesi ve pazar günleri olduğu varsayılarak model geliştirilmiştir).
- Her makinistin arka arkaya 3 gün izin yapması engellenmiştir.

Çizelge 2. Sabah ve akşam vardiyalarına atanan makinist sayısı

Vardiya	Hafta	Gün						
		1	2	3	4	5	6	7
<i>Sabah</i>	1	29	29	29	27	28	26	28
	2	28	28	28	29	29	26	26
	3	29	28	29	29	29	27	26
	4	29	26	29	28	29	28	26
<i>Akşam</i>	1	30	29	29	30	30	27	27
	2	30	30	27	28	27	27	27
	3	29	28	30	30	28	27	29
	4	30	28	30	29	30	27	27

Çizelge 3’te makinistlerin yasal şartlar ve operasyonel kurallar dikkate alınarak gerçekleştirilen makinist çizelgeleme tablosu yer almaktadır.

Çizelge 3. Aylık vardiya çizelgesi

Gün/ Makinist	1.Hafta							2.Hafta							3.Hafta							4.Hafta						
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
17	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
18	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
19	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
21	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
22	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
23	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
24	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
26	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
28	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
29	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
30	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
31	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
32	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
33	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
34	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
35	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
36	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
37	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
38	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
39	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
40	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
41	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
42	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

Çizelge 3. Aylık vardiya çizelgesi (devamı)

Gün/ Makinist	1.Hafta							2.Hafta							3.Hafta							4.Hafta						
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
43	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
44	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
45	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
46	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
47	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
48	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
49	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
50	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
51	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
52	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
53	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
54	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
55	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
56	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
57	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
58	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
59	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
60	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
61	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
62	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
63	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
64	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
65	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
66	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
67	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
68	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
69	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
70	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
71	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
72	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	



Akşam Vardiyası



Sabah Vardiyası



İzinli gün

SONUÇ

Bu çalışmada, ülkemizde hafif raylı sistemlerin kullanımının yaygınlaşmasıyla ortaya çıkan makinist çizelgeleme problemi üzerinde durulmuş ve bir hafif raylı sistem işletmesinin planlama sürecinde bulunan makinist çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Mevcut durumda firmada makinist görev ataması manuel olarak yapılmaktadır. Bu şekilde hazırlanan görev çizelgesi ile adil bir çizelge oluşturulması ve uygun çalışma şartlarının sağlanması zor ve yorucu bir süreç olup bu durum zaman kaybına sebep olmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada tüm operasyonel ve yasal kısıtlar göz önünde alınarak makinistlere dengeli görev yükü sağlayabilmek için hedef programlama modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model GAMS/CPLEX paket programı ile çözülmüş ve aylık görev çizelgesi elde edilmiştir.

Modelin çözümünde makinistlere eşit sayıda görev dağıtılıp ve izin günlerinin sayısı dengelenmiştir. Bu çalışma ile makinistlerin etkin ve adil şekilde vardiyalara atanması sağlanarak performanslarının ve memnuniyetinin artırılması hedeflenmiştir.

Bu çalışmada, 72 makiniste ait 1 aylık görev çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Geliştirilen modelde, makinistlerin hastalık, izin vs. gibi durumları dikkate alınmamıştır. Gelecek çalışmalarda, daha fazla çalışan ve daha fazla çalışma günü için matematiksel model güncellenebilir. Ayrıca, görevlilerin özel istekleri dikkate alınarak özel kısıtlı hedef programlama ile yeni çözümler üretilebilir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedirler.

Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

KAYNAKLAR

- Bakhtavar E, Prabatha T, Karunathilake H, Sadiq R, Hewage K, 2020. Assessment of renewable energy-based strategies for net-zero energy communities: A planning model using multi-objective goal programming. *Journal of Cleaner Production*, 272, 122886.
- Ceylan Z, Karan RE, Bakırcı Ç, Sabuncu S, 2019a. Sıra Bağımlı Hazırlık Süreli Tek Makine Çizelgeleme Problemi: Beyaz Eşya Sektöründe Bir Uygulama. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 3(1): 14-21.
- Ceylan Z, Yüksel A, Yıldız A, Şimşak B, 2019b. Sınav Çizelgeleme Problemi için Hedef Programlama Yaklaşımı ve Bir Uygulama. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12(2): 942-956.
- Charnes A, Cooper WW, 1977. Goal programming and multiple objective optimizations: Part 1. *European Journal of Operational Research*, 1(1): 39-54.
- Danış Öncül S, 2012. Hafif raylı sistemlerde tarife oluşturma ve ekip atama problemlerinin bütünleştirilmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi.
- Ernst AT, Jiang H, Krishnamoorthy M, Sier D, 2004. Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models. *European journal of operational research*, 153(1): 3-27.
- Fuentes M, Cadarso L, Marín Á, 2019. A hybrid model for crew scheduling in rail rapid transit networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 125: 248-26.
- Hanafi R, Kozan E, 2014. A hybrid constructive heuristic and simulated annealing for railway crew scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, 70: 11-19.
- Heil J, Hoffmann K, Buscher U, 2020. Railway crew scheduling: Models, methods and applications. *European Journal of Operational Research*, 283(2), 405-425.
- Hoffmann K, Buscher U, 2019. Valid inequalities for the arc flow formulation of the railway crew scheduling problem with attendance rates. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 1143-1152.
- Huang SH, Yang TH, Wang RT, 2011. Ant colony optimization for railway driver crew scheduling: from modeling to implementation. *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 28(6): 437-449.
- Jütte S, Müller D, Thonemann UW, 2017. Optimizing railway crew schedules with fairness preferences. *Journal of Scheduling*, 20(1), 43-55.
- Kaçmaz Ö, Alakaş HM, Eren T, 2019. Shift scheduling with the goal programming method: a case study in the glass industry. *Mathematics*, 7(6): 561.
- Kayacı M, Yiğit, V, 2012. Üretim çizelgeleme problemlerine bulanık yaklaşım. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 26(3-4): 287-296.
- Kroon L, Fischetti M, 2001. Crew scheduling for Netherlands railways “destination: customer”. *Computer-Aided Scheduling of Public Transport*, Springer, pp: 181-201.
- Lin DY, Tsai MR, 2019. Integrated crew scheduling and roster problem for trainmasters of passenger railway transportation. *IEEE Access*, 7, 27362-27375.

- Moudani El W, Cosenza, CAN, MoraCamino F, 2001. An Intelligent Approach for Solving the Airline Crew Rostering Problem. ACS/IEEE International Conference on Computer Systems and Applications, Beirut, Lebanon, June 25-29, 2001, pp: 73-79.
- Özder EH, Özcan E, Eren, T, 2019. Staff Task-Based Shift Scheduling Solution with an ANP and Goal Programming Method in a Natural Gas Combined Cycle Power Plant. *Mathematics*, 7(2): 192.
- Pinedo M, 2012. *Scheduling*, 29, Springer, New York.
- Rählmann C, Thonemann UW, 2020. Railway crew scheduling with semi-flexible timetables. *OR Spectrum*, 42(4), 835-862.
- Sarucan A, 1999. Bir raylı ulaşım sisteminde personel çizelgeleme problemine bütünlük yaklaşım, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi.
- Su Z, Jamshidi A, Núñez A, Baldi S, De Schutter B, 2019. Integrated condition-based track maintenance planning and crew scheduling of railway networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 105, 359-384.
- Suyabatmaz AÇ, Şahin G, 2015. Railway crew capacity planning problem with connectivity of schedules. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 84: 88-100.
- Tapkan P, Özbakır L, Kulluk S, Telcioğlu B, 2018. Raylı sistemlerde görev çizelgeleme probleminin modellenmesi ve çözümü. *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 33(3): 953-965.
- Ünal Z, Güven S, Çetin Eİ, 2019. Otel İşletmelerinin Tedarikçi Seçiminde Bulanık AHP ile Ağırlıklandırılmış Hedef Programlama Uygulaması. *Hitit Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 12(1), 188-204.
- Üstündağ Y, 2014. Ekip Çizelgeleme Problemi. *Demiryolu Mühendisliği*, (1): 72-83.
- Valde VA, 2010. Integrating Crew Scheduling and Rostering Problems. *Universit di Bologna*, PhD thesis.