



# Kent Academic Repository

Ba, layda, Tosun, Özgü and Bayram, V. (2021) *Line balancing optimization under robot location and worker-station assignment considerations: A case study of a dishwasher factory*. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 27 (4). pp. 495-503. ISSN 1300-7009.

## Downloaded from

<https://kar.kent.ac.uk/99648/> The University of Kent's Academic Repository KAR

## The version of record is available from

<https://doi.org/10.5505/pajes.2021.48961>

## This document version

Publisher pdf

## DOI for this version

## Licence for this version

CC BY (Attribution)

## Additional information

## Versions of research works

### Versions of Record

If this version is the version of record, it is the same as the published version available on the publisher's web site. Cite as the published version.

### Author Accepted Manuscripts

If this document is identified as the Author Accepted Manuscript it is the version after peer review but before type setting, copy editing or publisher branding. Cite as Surname, Initial. (Year) 'Title of article'. To be published in *Title of Journal*, Volume and issue numbers [peer-reviewed accepted version]. Available at: DOI or URL (Accessed: date).

## Enquiries

If you have questions about this document contact [ResearchSupport@kent.ac.uk](mailto:ResearchSupport@kent.ac.uk). Please include the URL of the record in KAR. If you believe that your, or a third party's rights have been compromised through this document please see our [Take Down policy](https://www.kent.ac.uk/guides/kar-the-kent-academic-repository#policies) (available from <https://www.kent.ac.uk/guides/kar-the-kent-academic-repository#policies>).

# Robot yer seçimi ve işçi-istasyon ataması düşünceleri altında hat dengeleme optimizasyonu: Bir bulaşık makinesi fabrikası vaka analizi

## Line balancing optimization under robot location and worker-station assignment considerations: A case study of a dishwasher factory

İlayda BAŞ<sup>1</sup> , Özgü TOSUN<sup>2</sup> , Vedat BAYRAM<sup>3\*</sup> 

<sup>1</sup>ROKETSAN Sanayi ve Anonim Şirketi, Ankara, Türkiye.

ilayda.bas@tedu.edu.tr

<sup>2</sup>Asis Elektronik ve Bilişim Sistemleri Anonim Şirketi, Ankara, Türkiye.

ozgu.tosun@tedu.edu.tr

<sup>3</sup>Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, TED Üniversitesi, Ankara, Türkiye.

vedat.bayram@tedu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 29.08.2020

Düzeltilme Tarihi/Revision: 24.03.2021

doi: 10.5505/pajes.2021.48961

Kabul Tarihi/Accepted: 31.03.2021

Araştırma Makalesi/Research Article

### Öz

Bu makale bir Bulaşık Makinesi Fabrikasında bulunan montaj hattı üzerinde yapılması planlanan hat dengeleme çalışması üzerinedir. Çalışmanın ana motivasyonu, montaj hattını benzer işleri gruplayarak daha dengeli hale getirmek ve vardiya başına üretilen bulaşık makinesi sayısını arttırmaktır. Bu temel amaçların yanında çalışma; işçi atamasının yeniden yapılmasını, iş-stok alanı optimizasyonu ve istasyonlardaki iş gücünün dengelenmesini hedeflemektedir. İstasyonların, asansörün ve robotların yer seçimi ile istasyonlara iş ve işçi atama kararlarını dikkate alan yeni bir tam sayılı programlama modeli öneriyoruz ve problemi kesin olarak çözmek için ticari bir çözücü kullanıyoruz. Problemin çözümünden elde edilen çıktılar ışığında mevcut sistem ve iyileştirilmiş sistem sonuçları karşılaştırılmıştır. Öncelikle bulaşık makinesi üretim kapasitesinin mevcut duruma göre artış değerlendirmesi yapılmış, ardından gruplanan işlerin çevrim süresine olan etkisi değerlendirilmiştir. Yapılan duyarlılık analizleri sonuçlarına göre mevcut tempoyu, çevrim süresini ve işçi sayısını iyileştiren farklı sonuçlar önerilmiştir. Bu sonuçlara göre, problemin diğer parametreleri sabitken, işçi sayısı %36 oranında azaltılabilirken, vardiya başı üretilen bulaşık makinesi sayısını %52'ye kadar arttırılabilir. Bu çalışmada firmaya önerilen sonuçta ise benzer işler gruplanarak açılan istasyon sayısı 68% oranında azaltılmış, istasyonlar tarafından kullanılabilir alan sayısı mevcut sistem ile aynı tutularak işçi sayısı 10% oranında azaltılmış ve çevrim süresinden 4.34 sn. kazanılmıştır ve böylece vardiya başı üretilen makine sayısı %43 arttırılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Hat dengeleme, İş-İşçi-Robot/Asansör-İstasyon ataması, Montaj hattı, Tam sayılı programlama.

### Abstract

The focus of this article is on the line balancing work planned on the assembly line of a Dishwasher Factory. The main motivation is to make the assembly line more stable by grouping similar jobs and to increase the number of dishwashers produced per shift. We further aim to rearrange the number of operators, optimize work-stock area and balance the man power at the stations. We propose a novel integer programming model that takes into account the location selection of stations, elevators and robots and the decisions of assigning jobs and workers to stations and use a commercial solver to solve the problem exactly. In the light of the outputs obtained from the solution of the problem, the current system and the improved system results were compared. First, the increase in dishwasher production capacity under current operational guidelines was evaluated and then the effect of grouping jobs on cycle time was evaluated. Based on the results of the sensitivity analysis, alternative solutions were proposed to optimize the current tempo, cycle time and number of workers. The results indicate that the number of workers can be reduced by 36%, while the number of dishwashers produced per shift can be increased by up to 52%, when all other inputs of the problem are fixed. Compared to the current practice, in the solution proposed to the manufacturing firm, the number of stations opened with similar jobs grouped was reduced by 68%, the number of fields that could be used by the stations was kept the same, the number of workers was reduced by 10% and the cycle time was improved by 4.34 seconds and the number of machines produced per shift increased by 43%.

**Keywords:** Line balancing, Work-Worker-Robot/Elevator-Station assignment, Assembly line, Integer programming.

## 1 Giriş

Bu çalışma bir Bulaşık Makinesi Fabrikasının Montaj Hattı Dengeleme problemi üzerinedir. Montaj hattı dengeleme problemi, istasyonlardaki işlerin sıralı bir şekilde farklı iş istasyonlarına atanarak ürünlerin oluşturulduğu üretim sürecini dikkate alır.

Üzerinde çalışma yapılan montaj hattı, üretilen bulaşık makinesi çeşidine göre sınıflandırma yapılacak olursa "Karışık Modelli Hat" ve istasyonların yerleşimine göre sınıflandırma

yapılacak olursa "U-Hat" olarak değerlendirilir. Çalışmanın yürütüldüğü Bulaşık Makinesi Fabrikası Montaj Hattı, U şeklinde dizilmiş sıralı istasyonlar, istasyonlarda görevli işçiler, robotlar ve asansörlerden oluşmaktadır. Hattaki istasyon sayısının fazla olması, benzer işlerin farklı istasyonlarda yapılması, işçiler arası iş dağılımının dengeli olmaması ve işçiler tarafından kullanılacak malzemelerin yerleşim planı gereği hazırlık istasyonundan geliş süresinin uyumlu olmaması başlıca problemlerdir. Hat üzerinde benzer işlerin farklı istasyonlarda yapılması, zaman kaybına ve fazla işgücü kullanımına neden olmaktadır. Buna ek olarak, işçiler arası iş

\*Yazışılan yazar/Corresponding author



Özçelik (2018), çevrim süresi verildiğinde iş istasyonu sayısının enküçüklenmesinin amaçlandığı Tip-1, tek modelli ve deterministik görev süreli montaj hattı dengeleme problemi üzerine çalışmaktadır [5]. Burdett ve Kozan, (2001), üretim ortamını daha verimli kullanmanın yolunu bazı üretim durumlarında, istasyon görevlerinin veya işlemlerin bitişik istasyonlara kaydırılabilir veya yeniden dağıtılabilir olması olarak ifade etmişlerdir [6]. Boysen ve Fliedner (2008), basit montaj hattı dengeleme probleminin çözümünü iki aşamalı olarak ele almıştır [7]. İlk aşamada öncelik dizisi incelenir, ikinci aşamada ise ek kısıtlar eklenir. Erel ve Sarin (1998), montaj hattı dengeleme probleminin görevler arasındaki öncelikli ilişkilerin yerine getirilmesi ve bazı performans ölçülerinin optimize edilmesi için görevlerin sıralı bir istasyon sırasına atanmasını temel aldığı ve problemlerin karmaşıklığından dolayı sezgisel prosedürlerin kullanılması gerektiğini savunmuştur [8]. Guschinskaya ve Dolgui (2009), transfer hattı dengeleme problemlerinin optimizasyonu ile ilgilenmiş, kesin ve sezgisel çözüm yollarını incelemişler ve küçük boyutlu problemlerde kesin çözüm metodlarının kullanılmasını önermişlerdir [9]. Pınarbaşı ve Alakaş (2021), verilen bir çevrim zamanı değeri için istasyon sayısının enküçüklenmesini amaçlayan ve çevrim zamanı/istasyon sayısı ve görevler arasındaki öncelik ilişkilerine yönelik kısıtları dikkate alan bir model önermişlerdir [10]. Gökçen ve Erel (1998) ise karma model montaj hattı için ikili tamsayı programlama modeli geliştirir [11]. NP-Zor sınıfında olan problemin karar değişkenlerinin ve kısıtlarının sayısındaki artışı sınırlayan birleşik bir öncelik diyagramı ve bazı değişkenler kullanılarak modelin boyutu küçültülmüştür. Benzer bir çalışmada Gökçen ve Erel (1997), karma model montaj hattı için ikili tamsayı programlama modeli önermektedir [12]. Problemin Tip-1 olması, iş-istasyon ataması yapması, çevrim süresi ve öncelik kısıtının olması bu çalışma ile benzerlik göstermektedir. Chica, Cordon ve Damas (2011), klasik montaj hattının çevrim süresi, istasyon sayısı ve/veya bu istasyonların alanı, öncelik kısıtları gibi farklı kriterlerin ortak optimizasyonunu içeren problemleri incelemişler ve problemin çözümüne yönelik sezgisel çözüm yöntemleri önermişlerdir [13]. Altuntaş ve İşler (2010), birbirinden ayrılması ve aynı istasyona atanması gereken işlerin birleştirilmesi ve hattın dengelenmesi üzerine çalışmışlardır [14]. Çalışmada, metot ve zaman etütleri ile iş elemanları tespit edilmiş ve öncelik ilişkileri çıkarılmıştır.

Blum ve Miralles (2011), montaj hattı üzerinde işçi atama ve hat dengeleme üzerine yaptıkları çalışmalarında sırasıyla işçilerin, sabit sayıda iş istasyonu verildiğinde çevrim süresini en aza indirmeyi amaçlamıştır [15]. Battaia ve Dolgui (2013), montaj hatlarının sınıflandırılması ve çözüm yollarının geliştirilmesi üzerine çalışılmıştır [16]. Gurevsky, Hazır, Battaia ve Dolgui (2013) çalışmalarında dengelenecek hat sayısı, işlerin özellikleri, iş-istasyon özellikleri, problem kısıtları ve amaç fonksiyonları gibi beş temel yaklaşımı göz önünde bulundurarak sınıflandırma ve deterministik/sezgisel çözümlere ulaşmak üzere değerlendirme yapmışlardır [17]. İşlerin tamamlanma sürelerinin iyi bilinmediği ancak belli bir aralık içinde olduğu düz montaj hatları için dengeleme problemini analiz etmişlerdir. Çalışma, işlerin istasyonlara atanması, çevrim süresinin optimize edilmesi, istasyon sayısının minimize edilmesi konularında problemimiz ile benzerlik gösterirken sabit ve yeri değişen robot/asansör atamalarını içermemesi, çalışmaların düz hat özelinde olması problemimizden ayrıştığı konulardır.

Becker ve Scholl (2006) montaj hatlarının elemanlarını ve özelliklerini tartışmakta, geleneksel hatlar dışında paralel istasyonlar, esnek hatlar ve U şeklindeki hatlardan bahsetmektedirler. Üzerine çalıştığımız montaj hattı da U şekline sahip olduğu için makale, bu hat üzerinde yapılacak çalışmaların daha iyi anlaşılmasını sağlamıştır [18]. Miltenburg ve Wijngaard (1994) tam zamanında üretim ilkelerinin kullanılması ile yaygınlaşan U şekline sahip hatlar için hat dengeleme problemini tanıtmış, modellemiş ve çözüm yöntemleri geliştirmişlerdir. Geleneksel hatlar için geliştirilen çözüm tekniklerinin yeni bir probleme nasıl uyarlanacağını tartışmışlardır [19]. Urban (1998), U şekline sahip hatlarda en uygun dengeyi belirlemek için tam sayılı programlama modeli sunmuştur [20]. U şekline sahip hatları karakterize ettikleri çalışmalarında bu hatları paralel hat ile karşılaştırmış ve her iki hattın avantajlarını kullanarak iş-istasyon ataması yapmışlardır. Kucukkoc ve Zhang (2015), U-tipi montaj hatlarındaki esneklik, değişen üretim koşullarına daha kolay adapte olabildiğini belirtmişler, bu sayede hat üzerinde işçi, istasyon, alan kısıtları üzerinde daha kolay değişiklikler yapılabileceğini ifade etmişlerdir [21]. Rabbani, Kazemi ve Manavizadeh (2012), karışık model U-tipi hat dengelemesini istasyon sayısını en aza indirmeyi amaçlayan bir çözüm yöntemi sunmuştur [22]. U-tipi hat üzerinde Hamzadayı ve Yıldız (2012) tarafından yapılan benzer bir çalışmada, istasyon sayısının azaltılması amaçlanmış olup, çalışmadaki iş-istasyon ataması, çevrim süresi ve öncelik kısıtları çalışmamız ile benzerlik göstermektedir [23].

Tablo 1 literatür taramasında incelenen çalışmalarda yer alan matematiksel modellerin karşılaştırmasını sunmaktadır. Çalışmamızda bahsedilen problem makalelerde dikkate alınan karar değişkenlerinin ve kısıtların tümünü içermektedir. Diğer çalışmalardan farklı olarak bu çalışma, U şekline sahip bir hatta yeri sabit veya değişebilen iş-işçi-robot/asansör-istasyon ve alan yer seçimi ve atama kararlarını vermektedir.

## 2.1 Bizim katkımız

İncelenen makaleler göz önünde bulundurulduğunda hat dengeleme problemlerine karşı benzer yolların izlendiğini görülmektedir. Fabrikanın montaj hattı dengeleme problemini çözmek amacıyla tam sayılı doğrusal programlama modeli oluşturulurken, amaç fonksiyonunda mevcut istasyon sayısını azaltma amacı güdülmüştür. Bu nedenle iş-istasyon, iş-işçi-istasyon, iş-işçi-robot/asansör-istasyon ve alan kısıtlarını U şekline sahip bir hat ile birleştiren yeni bir model kurulmuştur. Geliştirilen model; istasyonlara iş, işçi ve robot atamasını sağlayarak sistemi en iyi hale getirmeyi amaçlamıştır. Bir istasyona atanacak alan kararını da en iyi sistemi oluşturabilmek için vermektedir. Modelin temel verileri, işler arasındaki öncelik ilişkisi ve işlerin çevrim süresi bilgileridir. Bunların yanında; yerinin değişmesi mümkün olmayan asansör/robot bilgileri, yeri değişebilen robotların bilgisi, asansör ve robotlardan önce/sonra tamamlanması gereken işler modelin ihtiyaç duyduğu diğer verilerdir. Montaj hattının büyüklüğü sebebi ile çözüm yöntemi birçok kısıt içermektedir. Bu kısıtlar modelin özgünlüğünü artırıcı niteliktedir. Bu nedenle problemin çözmek için geliştirilen matematiksel model özgün ve yenidir. Bu sistemde, üzerinde çalışılan montaj hattında mevcut olan istasyon sayısını azaltıp tempoyu arttırmak için probleme ait kısıtlara cevap verebilecek ve olurlu bir çözüm elde etmeyi sağlayacak özgün bir model geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında önerilen model hat dengeleme literatürüne katkıda bulunacaktır.

Tablo 1. Literatürde önerilen matematiksel modellerin karşılaştırılması.

Table 1. Comparison of mathematical models suggested in the literature.

	Klasik Tip-I Karışık Modelli Hat Dengeleme Problemi	İş-İstasyon Atama	İş-İşçi- İstasyon Atama	Çevrim Süresi Kısıtı	Öncelik Kısıtı	Robot Yer Seçimi	Asansör Yer Seçimi	Alan Kısıtı	U-Tip Hat
Diri Z, Mete S, Çil ZA, Ağpak K. 2015, [3].	✓	✓	X	✓	✓	X	X	X	X
Baybars I. 1986, [4].	X	✓	X	✓	✓	X	X	X	X
Özçelik F. 2018, [5].	✓	✓		✓	✓	X	X	X	X
Burdett RL, Kozan E. 2001, [6].	X	X	X	✓	✓	X	X	X	X
Boysen N, Fliedner, M. 2008, [7].	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	X	✓
Erel E, Sarin SC. 1998, [8].	X	✓	X	✓	✓	X	X	X	X
Guschinskaya O, Dolgui A. 2009, [9].	X	✓	X	✓	✓	X	X	X	X
Pınarbaşı M, Alakaş HM. 2021, [10].	✓	✓	X	✓	✓	X	X	X	✓
Gökçen H, Erel E. 1998, [11].	✓	✓	X	✓	✓	X	X	X	X
Gökçen H, Erel E. 1997, [12].	✓	✓	X	✓	✓	X	X	X	X
Chica M, Cordon O, Damas S. 2011, [13].	X	✓	X	✓	✓	X	X	✓	X
Altuntaş S, İşlier AA. 2010, [14].	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	X	X
Blum C, Miralles C. 2011, [15].	X	✓	✓	✓	✓	X	X	X	X
Battaia O, Dolgui, A. 2013, [16].	X	✓	X	✓	✓	X	X	X	X
Gurevsky E, Hazır Ö, Battaia O, Dolgui A. 2013, [17].	✓	✓	X	✓	✓	X	X	X	X
Becker C, Schöll A. 2006, [18]. Miltenburg G].	X	✓	✓	✓	✓	X	X	X	✓
Wijngaard J. 1994, [19].	✓	✓	X	✓	✓	X	X	X	✓
Urban TL. 1998, [20].	✓		X	✓	✓	X	X	X	✓
Kucukkoc I, Zhang, DZ. 2015, [21].	X	✓	✓	✓	✓	X	X	X	✓
Rabbani M, Kazemi, SM, Manavizadeh N. 2012, [22].	✓	✓	X	✓	✓	X	X	X	✓
Hamzadayi A, Yildiz G. 2012, [23].	✓	✓	X	✓	✓	X	X	X	✓
Bu Çalışma	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Literatürde istasyon sayısı, istasyon yer seçimi, asansör/robot yer seçimi, iş-istasyon ataması, işçi-istasyon ataması kararlarını aynı anda veren modellerin önerildiği bir çalışmaya rastlanmamıştır. Model, kendi içinde yeri belirlenen ve yeri sabit olan robotlar ilave kısıtlarına; asansörler açısından önce ve sonra yapılması gereken işler ilave kısıtlarına sahiptir. Ayrıca, istasyonlarda çalışacak işçi sayısına ve her istasyonun kaç birimlik alan kullanacağına karar vermektedir. İncelenen literatür örneklerinde Tablo 1’de de görülebileceği gibi istasyon sayısı belirleme, istasyon & robot & asansör yeri belirleme, işçi sayısı kararı & önceliklendirme kısıtları altında

iş-işçi-alan-istasyon kararları aynı anda dikkate alınmamıştır. Bu nedenle modelimizin literatüre yeni ve günümüz teknolojilerine uyumlu bir bakış açısı kazandıracak gibi düşünülmektedir. Bu anlamda yapılan çalışmanın literatürde özgün bir katkısı olacaktır.

### 3 Problem tanımı ve model formülasyonu

Bulaşık Makinesi Fabrikası Montaj hattı U şeklinde 157 istasyondan oluşmaktadır. Montaj hattındaki istasyon sayısının fazla olması, benzer işlerin farklı istasyonlara kullanışsız dağılımına yol açmıştır. Benzer işlerin farklı istasyonlarda

yapılması, zaman kaybına ve fazla işgücü kullanımına sebep olmaktadır. Hatta bulunan 100 işçi arasındaki iş dağılımının dengesiz olması, hat akışında duraksamaya ve ilgili istasyondaki işlerin tamamlanması için harcanan sürenin mevcut çevrim süresini aşmasına sebep olmuştur. Bunlara ek olarak, yerleşim planı gereği işçilerin buldukları istasyonda kullanacakları malzemelerin hazırlık istasyonundan gelmesi gerekmektedir.

Hazırlık istasyonundan gelecek malzemelerin geliş süresinin, hat akışı ile uyumlu olmaması da çevrim süresini arttıran bir diğer problemdir. İstasyonlarda yapılan iş sıralaması, istasyonların kullanılabileceği alan kısıtına uymamaktadır. İlgili istasyonda yapılacak iş için gerekli işçi sayısı, kullanılabilecek alana uygun olmadığından darboğaz istasyonlar oluşmasına sebep olmaktadır. Bu problemlere çözüm niteliğinde geliştirilen çalışmanın temel amacı çevrim süresinin azaltılıp vardiya başına üretilen bulaşık makinesi sayısını arttırmaktır. Montaj hattında mevcut istasyonlardaki benzer işleri gruplayarak istasyon sayısını azaltmak ise asıl amacımıza hizmet eder. İşçilerin alan kısıtına dikkat ederek istasyonlara atanması, işler arası öncelik-sonralık ilişkisine dikkat edilerek işlerin istasyonlara atanması, robotlar ve asansörlerin işler ile olan öncelik-sonralık ilişkisine dikkat edilerek istasyonlara atanması ve işlerin tamamlanma sürelerinin çevrim süresini geçmemesini garantileyen kısıtlar, matematiksel modelde dikkate alınmıştır. Hat dengeleme çalışmasında kullanılmak üzere geliştirilen modelin detayları aşağıdaki gibidir.

İndeks ve Kümeler:

- k: İstasyon indeksi,
- j: İş indeksi,
- l: Yer seçimi yapılacak robotların indeksi,
- m: Asansörlerin indeksi,
- K: İstasyonlar kümesi,
- A: İş öncelikleri kümesi,
- G: İstasyon sayısı,
- $E_m$ : m asansörünün istasyon konumu,
- R: Robotların kümesi,
- M: Asansörlerin kümesi,
- W: Kullanılabilecek maksimum işçi sayısı,
- V: İşlerin kümesi,
- $J_a^l$ : Yer seçimi yapılan l robotundan sonra tamamlanması gereken işler kümesi,
- $J_b^l$ : Yer seçimi yapılan l robotundan sonra tamamlanması gereken işler kümesi,
- $J_a^m$ : Asansör ve sabit robotlardan sonra tamamlanması gereken işler kümesi,
- $J_b^m$ : Asansör ve sabit robotlardan önce tamamlanması gereken işler kümesi.

Parametreler:

- C = Çevrim süresi,
- $t_j$ : j işinin tamamlanma süresi,
- S = Birim istasyon alanında çalışabilecek maksimum işçi sayısı,
- G = Toplam birim istasyon .

Karar Değişkenleri:

$$y_k = \begin{cases} 1, & \text{eğer } k \text{ istasyonu açıldıysa} \\ 0, & \text{eğer istasyon açılmadıysa} \end{cases}$$

$$x_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } j \text{ işi } k \text{ istasyonuna atandıysa} \\ 0, & \text{eğer atanmadıysa} \end{cases}$$

$$z_k = k \text{ istasyonuna atanan işçi sayısı}$$

$$v_{lk} = \begin{cases} 1, & \text{l robotu } k \text{ istasyonunda bulunuyorsa} \\ 0, & \text{eğer bulunmuyorsa} \end{cases}$$

$$q_k = k \text{ istasyonu tarafından kullanılan birim istasyon alanı sayısı}$$

$$\min \sum_{k \in K} y_k \quad (1)$$

s.t

$$\sum_{k \in K} x_{jk} = 1, \quad \forall j \in V \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} k * x_{ik} \leq \sum_{k \in K} k * x_{jk}, \quad \forall (i, j) \in A \quad (3)$$

$$\sum_{j \in V} t_j * x_{jk} \leq C * z_k, \quad k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} k * x_{jk} \geq E_m + 1, \quad \forall j \in J_a^m, m \in M \quad (5)$$

$$\sum_{k \in K} k * x_{jk} \leq E_m - 1, \quad \forall j \in J_b^m, m \in M \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K} k * x_{jk} \geq \sum_{k \in K} k * v_{lk} + 1, \quad \forall j \in J_a^l, l \in L \quad (7)$$

$$\sum_{k \in K} k * x_{jk} \leq \sum_{k \in K} k * v_{lk} - 1, \quad \forall j \in J_b^l, l \in L \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K} z_k \leq W \quad (9)$$

$$\sum_{k \in K} v_{lk} = 1, \quad \forall l \in L \quad (10)$$

$$z_k \leq S * q_k, \quad \forall k \in K \quad (11)$$

$$q_k \leq G * y_k, \quad \forall k \in K \quad (12)$$

$$\sum_{k \in K} q_k \leq G \quad (13)$$

$$\sum_{l \in L} v_{lk} + y_k \leq 1, \quad \forall k \in K \quad (14)$$

$$x_{jk} \in \{0,1\}, \quad \forall k \in K \quad (15)$$

$$y_k \in \{0,1\}, \quad \forall j \in V, k \in K \quad (16)$$

$$z_k \geq 0, \text{ integer}, \quad \forall j \in V, k \in K \quad (17)$$

$$v_{lk} \in \{0,1\}, \quad \forall l \in L, k \in K \quad (18)$$

$$q_k \in Z_+, \quad \forall k \in K \quad (19)$$

### 3.1 Matematiksel model

Modelin amaç fonksiyonu (1), kısıtları sağlayacak en az sayıdaki istasyonu açmayı hedefler. Bulaşık Makinesi Fabrikası Montaj hattı farklı işlerden sorumlu birçok sayıda işçi, asansör ve robottan oluşmaktadır. Bu durum işler arası öncelik/sonralık ilişkisini önemli hale getirmektedir. İşlerin yapılış sırası robot ve asansörlerin konumunu etkilediğinden,

bu problemi daha karmaşık bir hale getirmektedir. Kısıt (2) her işin sadece bir istasyona atanmasını, kısıt (3) ise iş atamalarının iş önceliklerine uygun olarak yapılmasını sağlar. Kısıt (4) bir istasyona atanan işlerin tamamlanma süresini, çevrim süresini ve işçi sayısını göz önünde bulundurarak kısıtlar. Açılan istasyona atanan işin tamamlanma süresinin, çevrim süresi ve o istasyonda çalışan kişi sayısının çarpımını geçmemesini garantiler. Kısıt (5) ve kısıt (6) asansörlerden ve sabit robotlardan önce/sonra yapılması gereken işleri gruplayan ve iş önceliklerinin kontrolünü sağlayan kısıtlardır. Aynı şekilde kısıt (7) ve (8) yer seçimi yaptığımız robotlardan önce ve sonra yapılması gereken işleri gruplayan ve iş önceliklerinin kontrolünü sağlayan kısıtlardır. Kısıt (9) açılacak istasyonlara ataması yapılacak toplam işçi sayısının kullanılabilen (mevcut) işçi sayısını geçmemesini garantiler. Kısıt (10) asansör/robotların tek bir istasyona atanmasını kontrol eder. Kısıt (11) açılan istasyonda çalışabilecek işçi sayısının alana göre düzenlemesini yaparken kısıt (12) açılması planlanan istasyonların alan atamasından sorumludur. 1 m<sup>2</sup>lik birim alanda 1 işçinin çalışabileceği varsayılmıştır. Kısıt (13) mevcut alanı belirtir ve ataması planlanan alanın kontrolünü sağlar. Son olarak kısıt (14) aynı istasyona sadece bir robot/asansör veya sadece bir istasyon atanmasının yapılmasını sağlar. Kısıt (14)'ün amacı atanması yapılabilen asansör/robotların tek bir istasyona yığılmasının önüne geçmektir. Modelin geçerlenmesi için firmanın belirlediği kısıt ve ölçütleri sağlayıp sağlamadığı test edilmiştir. Kısıt (15), (19) değişken alanlarını tanımlar.

### 3.2 Hesapsal sonuçlar ve duyarlılık analizi

Montaj hattı dengeleme probleminin çözümüne yönelik olarak oluşturulan matematiksel model GAMS Programlama dili kullanılarak çözülmüştür. 314 tamsayılı ve 10,676 ikili değişkenin ve 6,591 kısıtın bulunduğu problemin çözümü 11.81 sn. sürmüştür. Matematiksel model için kullanılan

girdiler üzerinde bulaşık makinesi fabrikası montaj hattı mevcut yerleşim planına uygun olarak değişiklikler yapılmış ve koşum sonuçları irdelenmiştir. Ayrıca, bunun sonucunda alınan çıktılar incelenerek önerilen sistemlerin tüm bu olası değişikliklere olan duyarlılığı tespit edilmiştir. Duyarlılık analizi ile 66 farklı sonuçtan 13 farklı durum şirkete önerilebilir. Bu durumlar içinden bir sonuç şirkete önerilmiştir. Açılan istasyon sayısı, çevrim süresi, hatta çalışan işçi sayısı, kullanılan alan ve üretim kapasitesi karşılaştırmaları Tablo 2'de detaylı olarak açıklamıştır. Mevcut sistem ve önerilen sistem karşılaştırmasına göre asıl amacımızın gerçekleştiği görülmektedir. İstasyonlara aynı alan tahsis edildiğinde, işçi sayısının %10 oranında, istasyon sayısının %68 oranında azaldığını, vardiya başına üretilen bulaşık makinesi sayısının 1,500'ten 2,155'e çıkarak hattın üretim kapasitesinin %43.6 oranında arttığı görülmüştür. Önerilen çözüm benzer görevleri gruplayarak daha az istasyonlu bir sistem önerir. Mevcut sisteme göre işlerin gruplanması ile daha az istasyon açılması ve daha iyi stoklama alanları sağlar. Aynı zamanda dengesizlik işgücü dağılımını da azaltır. Duyarlılık analizi yapılırken işçi sayısı, çevrim süresi ve istasyonlar tarafından kullanılabilir alan girdileri üzerinden değişiklik yapılmıştır. İstasyonlar tarafından kullanılabilir birim alan 1 m<sup>2</sup>, 2 m<sup>2</sup> ve 3 m<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda kullanılabilir maksimum işçi sayısı değerleri de farklı kombinasyonlar ile değerlendirilmiştir. Değiştirilen diğer bir değer ise çevrim süresidir. Çevrim süresi 11 sn.'ye kadar düşürülmüş, 16,34, 16, 15, 14, 13, 12, 11 sn. değerleri için duyarlılık analizi yapılmıştır. Farklı çevrim süreleri, farklı açılan istasyon sayısı ve farklı çalışan işçi sayısı seçenekleri sunulmuştur. Bu 13 seçeneğin detayları Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 3'te ise işçi sayısı sabit tutularak elde edilen değerler sunulmuştur.

Tablo 2. Duyarlılık analizi ve alternatif çözümler.

Table2. Sensitivity analysis and alternative solutions.

Birim Alan	Çevrim Süresi (C)	Optimal İstasyon Sayısı	İşçi Sayısı (W)	Üretim Kapasitesi
1 m <sup>2</sup>	14 sn.	100	100	1,800
	15 sn.	100	88	1,680
	16,34 sn.	100	79	1,542
2 m <sup>2</sup>	11 sn.	50	95	2,290
	12 sn.	50	90	2,155
	13 sn.	50	80	1,938
	14 sn.	50	75	1,800
	15 sn.	50	75	1,666
	16.34 sn.	50	74	1,542
	11 sn.	34	90	2,290
3 m <sup>2</sup>	12 sn.	34	90	2,100
	13 sn.	34	80	1,938
	14 sn.	35	76	1,800
	15 sn.	34	73	1,680
	16.34 sn.	35	64	1,542

Tablo 3. İşçi sayısının sabit olduğu alternatif çözümler.

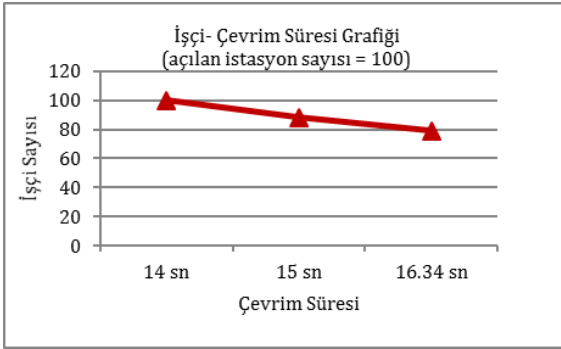
Table 3. Alternative solutions where the number of workers fixed.

Birim Alan	Çevrim Süresi (C)	Optimal İstasyon Sayısı	İşçi Sayısı (W)	Üretim Kapasitesi
1 m <sup>2</sup>	14 sn.	100	100	1,800
	15 sn.	100	100	1,680
	11 sn.	51	100	2,290
2 m <sup>2</sup>	12 sn.	50	100	2,100
	11 sn.	34	100	2,290
3 m <sup>2</sup>	12 sn.	34	100	2,100

Önerilen 13 durum için tercihen alan girdisi farklı olanlar aşağıdaki şekillerde "Pareto Grafiği" ile gösterilmiştir.

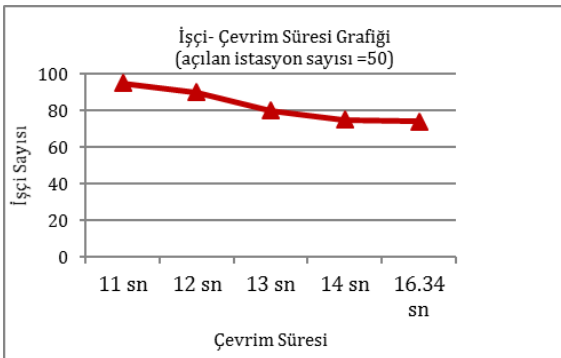
Şekil 2'de verilen grafik her istasyonun 1 birim alan kullanmasına izin verildiğinde ve çevrim süresi farklı sayılar (14, 15, 16.34) ile çalıştırıldığında hatta çalışan toplam işçi sayısının değişimini gösterir. Çevrim süresi 16.34 sn. olarak belirlendiğinde hatta çalışan toplam işçi sayısının 79 olduğu; çevrim süresi 15 sn. olarak belirlendiğinde hatta çalışan toplam işçi sayısının 88 olduğu; çevrim süresi 14 sn. olarak belirlendiğinde hatta çalışan toplam işçi sayısının 100 olduğu görülmektedir. Açılan istasyon sayısı ise 100 olarak belirlenmiştir.

Şekil 3'te verilen grafik her istasyonun 2 birim alan kullanmasına izin verildiğinde ve çevrim süresi farklı sayılar (11, 12, 13, 14, 16.34) ile çalıştırıldığında hatta çalışan toplam işçi sayısının değişimini gösterir. Çevrim süresi 16.34 sn. olarak belirlendiğinde hatta çalışan toplam işçi sayısının 74 olduğu; çevrim süresi 14 sn. olarak belirlendiğinde hatta çalışan toplam işçi sayısının 75 olduğu; çevrim süresi 13 sn. olarak belirlendiğinde hatta çalışan toplam işçi sayısının 80 olduğu; çevrim süresi 12 sn. olarak belirlendiğinde hatta çalışan toplam işçi sayısının 90 olduğu; çevrim süresi 11 sn. olarak belirlendiğinde hatta çalışan toplam işçi sayısının 95 olduğu görülmektedir.



Şekil 2. İşçi sayısı ve çevrim süresi grafiği (Birim alan 1 m<sup>2</sup>).

Figure 2. Number of workers and cycle time chart  
(Unit area 1 m<sup>2</sup>).

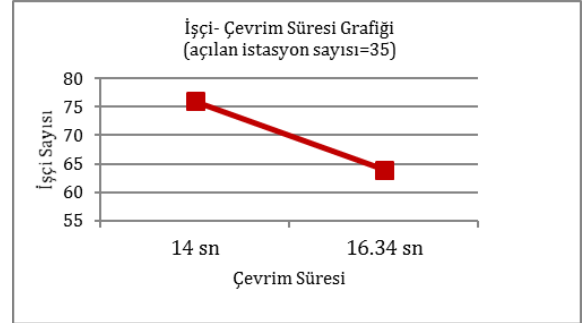


Şekil 3. İşçi sayısı ve çevrim süresi grafiği. (Birim alan 2 m<sup>2</sup>).

Figure 3. Number of workers and cycle time chart.  
(Unit area 2 m<sup>2</sup>).

Açılan istasyon sayısı ise 50 olarak belirlenmiştir. Şekil 4'te verilen grafik her istasyonun 3 birim alan kullanmasına izin verildiğinde ve çevrim süresi farklı sayılar (11, 13, 15) ile çalıştırıldığında hatta çalışan toplam işçi sayısının değişimini gösterir. Çevrim süresi 15 sn. olarak belirlendiğinde hatta çalışan toplam işçi sayısının 76 olduğu görülmektedir.

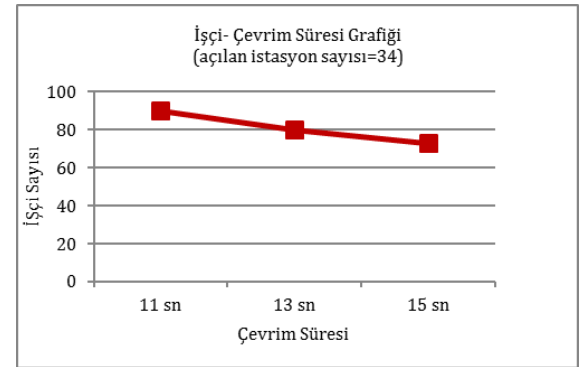
çalışan toplam işçi sayısının 73 olduğu; çevrim süresi 13 sn. olarak belirlendiğinde hatta çalışan toplam işçi sayısının 80 olduğu; çevrim süresi 11 sn. olarak belirlendiğinde hatta çalışan toplam işçi sayısının 90 olduğu görülmektedir. Açılan istasyon sayısı ise 34 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. İşçi sayısı ve çevrim süresi grafiği. (Birim alan 3 m<sup>2</sup>).

Figure 4. Number of workers and cycle time chart.  
(Unit area 3 m<sup>2</sup>).

Şekil 5'te verilen grafik her istasyonun 3 birim alan kullanmasına izin verildiğinde ve çevrim süresi farklı sayılar (14, 16.34) ile çalıştırıldığında hatta çalışan toplam işçi sayısının değişimini gösterir. Çevrim süresi 16.34 sn. olarak belirlendiğinde hatta çalışan toplam işçi sayısının 64 olduğu; çevrim süresi 14 sn. olarak belirlendiğinde hatta çalışan toplam işçi sayısının 76 olduğu görülmektedir.



Şekil 5. İşçi sayısı ve çevrim süresi grafiği. (Birim alan 3 m<sup>2</sup>).

Figure 5. Number of workers and cycle time chart.  
(Unit area 3 m<sup>2</sup>).

### 3.3 Performans ölçümü

Şirket tarafından sağlanan 2018 yılı Ekim ayı verilerine göre 157 istasyonda sıralanan 64 farklı işin 16.34 çevrim süresi karşılığı vardiya başına 1,500 bulaşık makinesidir. Yerleşim planı girdileri dikkate alınarak işçi sayısı, çevrim süresi ve istasyonlar tarafından kullanılabilir alan girdileri üzerinden yapılan değişikliklerden elde edilen önerilen en iyi çözümlerin karşılaştırması Tablo 4'te gösterilmiştir. Önerilen sistem, mevcut sistem ile karşılaştırıldığında benzer işlerin en iyi şekilde gruplanması ile istasyon sayısı ciddi bir oranda azalmış olup vardiya başına üretilen bulaşık makinesi sayısı %43.6 oranında artmıştır. Diğer alternatifler ise istasyonlar tarafından 1 m<sup>2</sup>lik alan kullanılması durumunda çevrim süresinin 15 sn. açılan istasyon sayısının 100, istasyonda çalışabilecek işçi sayısının 100 ve bulaşık makinesi üretim kapasitesinin vardiya başına 1,680 makine olması durumudur. Bu sistem, mevcut durum ile karşılaştırıldığında bulaşık makinesi üretim



kapasitesi %12 arttırılmıştır. Bir diğer alternatif ise istasyonlar tarafından kullanılacak alanın  $3 m^2$  olması durumudur. Bu sisteme göre açılacak istasyon sayısı 34'e kadar düşmüş ve işçi sayısı 80 olmuştur, çevrim süresinin 13 saniye olması ile birlikte kapasite %29 artış 1,938 olmuştur. Önerilen sistemler, şirket tarafından verilecek yönetsel karara bırakılmıştır. Yerleşim planı ve hatlarda çalışacak işçi sayısı parametreleri şirketin stratejik ve yönetsel kararını kapsamaktadır.

#### 4 Sonuçlar

Bulaşık Makinesi Fabrikası Montaj hattı üzerinde yapılan çalışmaların temel amacı hat temposunu arttırmaktır. Hat temposu bir vardiyada üretilen bulaşık makinesi sayısıdır. Üretilen bulaşık makinesi sayısının artırılması yanı sıra işgücü dengesinin sağlanması, stok alanı optimizasyonunun sağlanması, çevrim süresinin düşürülmesi hedeflenmektedir. Bu amaca ulaşmak için montaj hattı analiz edilmiş, gerekli veriler toplanmıştır. Literatür taraması ile hat dengeleme alanında yapılmış çalışmalar incelenmiştir. Hat üzerinde yeri sabit veya değişebilen asansör-robot bulunması, hattın U şekline sahip olması, problemi daha karmaşık bir hale getirmektedir. Sistem kısıtların içeren ve açılan istasyon sayısını işleri gruplayarak minimize etmeyi amaçlayan bir tam sayılı yeni bir model önerilmiştir. Matematiksel model, robotların yer seçimine, işlerin ve işçilerin istasyonlara atanmasına, istasyonların sahip olacağı fiziksel alana karar vermektedir. Literatür de bu kararları aynı anda veren bir model ile karşılaşılmamıştır. Bu nedenle literatüre yeni bir bakış açısı kazandıracığımızı düşünmekteyiz. Kesin bir sonuca ulaşmak için model "GAMS" programında kodlanmıştır. Çıktılar incelenerek sistemin olası değişikliklere olan duyarlılığı test edilmiştir. Duyarlılık analizi sırasında işçi sayısı, çevrim süresi ve istasyonlar tarafından kullanılacak alan değerleri değiştirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde tempo, çevrim süresi ve işçi sayısını optimize eden farklı çıktılar olduğu görülmüştür. En ideal işçi sayısını elde ettiğimiz çıktı; işçi sayısını %10 azaltabilirken, vardiya başı üretilen bulaşık makinesi sayısını %43.6 oranında arttırabilmektedir. Bu çalışmada önerilen çıktının şirkette kullanılması durumunda açılan istasyon sayısı mevcut durumun %30'u kadar olacaktır. Üzerinde çalışma yapılan bulaşık makinesi fabrikası montaj üretim hattı için istasyon sayısının minimum olması benzer işleri aynı istasyonda toplayarak benzer işler üzerinde koordinasyon kolaylığı sağlamak amacıyla önemlidir. Bu çalışmada amaç fonksiyonu olarak toplam istasyon sayısının en küçüklenmesi kullanılmıştır. Çevrim süresini en küçükmek veya toplam çıktıyı en büyükmek gibi alternatif amaç fonksiyonları da kullanılabilir, ya da bu amaç fonksiyonlarının tamamını dikkate alan bir çok-amaçlı optimizasyon formülasyonu bu çalışmanın devamı olarak geliştirilebilir.

Tablo 4. Mevcut sistem ve önerilen sistemlerin karşılaştırılması.

Table 4. Comparison of existing system and proposed systems.

	İstasyon Sayısı	İşçi Sayısı	Birim Alan	Çevrim Süresi	Bulaşık Makinesi Sayısı
Mevcut Sistem	157	100	$2 m^2$	16.34 sn.	1,500
Önerilen Sistem-1	50	90	$2 m^2$	12 sn.	2,155
Önerilen Sistem-2	100	88	$1 m^2$	15 sn.	1,680
Önerilen Sistem-3	34	80	$3 m^2$	13 sn.	1,938

#### 5 Conclusions

The main purpose of the work on the Dishwasher Factory assembly line is to increase the speed of the line. Line tempo is the number of dishwashers produced in one shift. In addition to increasing the number of dishwashers produced, we aim to balance the workforce, optimize the stock area and reduce the cycle time. To achieve this goal, the assembly line was analyzed and the necessary data were collected. Studies conducted in the field of line balancing were examined. The presence of a fixed or changeable elevator-robot on the line and the U-shape of the line make the problem more complicated. A novel Integer Programming model, which aims to minimize the number of opened stations by grouping jobs has been proposed. The mathematical model makes decisions about locations of robots, assignments of jobs and workers to stations, the space area a station will have. In the literature, no model that makes these decisions at the same time has been encountered. For this reason, we think that we will bring a new perspective to the literature. In order to reach a definite conclusion, the model is coded in the "GAMS" program. The sensitivity of the system to possible changes was tested by examining the outputs. During the sensitivity analysis, the number of workers, cycle time and area values that can be used by the stations were changed. When the results were examined, it was seen that there were different outputs that optimize tempo, cycle time and number of workers. It turned out that the ideal solution reduces the number of workers by 10% and increases the number of dishwashers produced per shift by 43.6%. If the proposed solution is used by the company, the number of stations opened will be 30% of the current practice. The minimum number of stations for the dishwasher factory assembly line is important in order to facilitate coordination on similar works by collecting similar works in the same station.

In this work, minimizing total number of stations was used as an objective function. Alternative objective functions such as minimizing cycle time or maximizing throughput could be used or an alternative multi-objective optimization that incorporates all of these could be developed as an extension.

#### 6 Yazar katkı beyanı

İlayda BAŞ ve Özgü TOSUN, literatür taraması, sistemin incelenmesi ve veri toplanmasında, modelin GAMS programlama dilinde kodlanmasında ve koşturulmasında, test sonuçlarının analiz edilmesinde ve makalenin yazımında, Vedat BAYRAM ise fikrin oluşması, problem tanımının yapılması, optimizasyon modelinin hazırlanması ve yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

#### 7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

#### 8 Kaynaklar

- [1] Boysen N, Flidner M, Scholl A. "A classification of assembly line balancing problems". *European Journal of Operational Research*, 183(2), 674-693, 2007.
- [2] Boysen N, Flidner M, Scholl A. "Assembly line balancing: Which model to use when?". *International Journal of Production Economics*, 111(2), 509-528, 2008.

- [3] Diri Z, Mete S, Çil ZA, Ağpak K. "Stokastik sıra-bağımlı hazırlık zamanlı montaj hattı dengeleme problemi". *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 21(4), 152-157, 2015.
- [4] Baybars I. "A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem". *Management Science*, 32(8), 909-932, 1986.
- [5] Özçelik F. "Basit düz ve U-tipi montaj hattı dengeleme problemleri için diferansiyel evrim algoritması". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(1), 130-140, 2018.
- [6] Burdett RL, Kozan E. "Sequencing and scheduling in flowshops with task redistribution". *Journal of the Operational Research Society*, 52(12), 1379-1389, 2001.
- [7] Boysen N, Fliedner M. "A versatile algorithm for assembly line balancing". *European Journal of Operational Research*, 184(1), 39-56, 2008.
- [8] Erel E, Sarin SC. "A survey of the assembly line balancing procedures". *Production Planning & Control*, 9(5), 414-434, 1998.
- [9] Guschinskaya O, Dolgui A. "Comparison of exact and heuristic methods for a transfer line balancing problem". *International Journal of Production Economics*, 120(2), 276-286, 2009.
- [10] Pınarbaşı M, Alakaş HM. "Atama kısıtlı tip-1 montaj hattı dengeleme problemi: Bir kısıt programlama modeli yaklaşımı". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(4), 532-541, 2021.
- [11] Gökçen H, Erel E. "Binary integer formulation for mixed-model assembly line balancing problem". *Computers & Industrial Engineering*, 34(2), 451-461, 1998.
- [12] Gökçen H, Erel E. "A goal programming approach to mixed-model assembly line balancing problem". *International Journal of Production Economics*, 48(2), 177-185, 1997.
- [13] Chica M, Cordon O, Damas S. "An advanced multiobjective genetic algorithm design for the time and space assembly line balancing problem". *Computers & Industrial Engineering*, 61(1), 103-117, 2011.
- [14] Altuntaş S, İşlier AA. "Birliktelik kısıtları altında montaj hattı dengeleme problemi için bir çözüm yaklaşımı önerisi ve bir işletmede uygulama". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(1), 29-44, 2010.
- [15] Blum C, Miralles C. "On solving the assembly line worker assignment and balancing problem via beam search". *Computers & Operations Research*, 38(1), 328-339, 2011.
- [16] Battaia O, Dolgui A. "A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches". *International Journal of Production Economics*, 142(2), 259-277, 2013.
- [17] Gurevsky E, Hazır Ö, Battaia O, Dolgui A. "Robust balancing of straight assembly lines with interval task times". *Journal of the Operational Research Society*, 64(11), 1607-1613, 2013.
- [18] Becker C, Scholl A. "A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing". *European Journal of Operational Research*, 168(3), 694-715, 2006.
- [19] Miltenburg GJ, Wijngaard J. "The U-line line balancing problem". *Management Science*, 40(10), 1378-1388, 1994.
- [20] Urban TL. "Optimal balancing of U-shaped assembly lines". *Management Science*, 44(5), 738-741, 1998.
- [21] Kucukkoc I, Zhang DZ. "Balancing of parallel U-shaped assembly lines". *Computers & Operations Research*, 64, 233-244, 2015.
- [22] Rabbani M, Kazemi SM, Manavizadeh N. "Mixed model U-line balancing type-1 problem: A new approach". *Journal of Manufacturing Systems*, 31(2), 131-138, 2012.
- [23] Hamzadayi A, Yildiz, G. "A genetic algorithm based approach for simultaneously balancing and sequencing of mixed-model U-lines with parallel workstations and zoning constraints". *Computers & Industrial Engineering*, 62(1), 206-215, 2012.