



HİYERARŞİK İŞÇİ ATAMASI İLE TİP-II MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİ İÇİN BİR MATEMATİKSEL MODEL

Aslıhan KARAŞ ÇELİK^{1*}, Feriştah ÖZÇELİK²

¹Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-7317-447X>

²Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-0329-203X>

Anahtar Kelimeler

Öz

Montaj hattı,
Hat dengeleme,
Hiyerarşik işçi
ataması,
Matematiksel
modelleme

Geleneksel montaj hattı dengeleme (MHD) probleminde, görevlerin işlem sürelerinin sabit ve işçiden bağımsız olduğu varsayılmaktadır. Ancak, bu süreler; tecrübe ve yetenek gibi etmenler dolayısıyla işçiler arasında değişkenlik göstermektedir. İşçilerin hiyerarşik seviyelere ayrılarak işlem sürelerinin ve maliyetlerinin seviyeler bazında farklılık gösterdiği problem türü, hiyerarşik işçi ataması ile montaj hattı dengeleme (HİAMHD) problemi olarak bilinmektedir. Bu çalışmada, literatürde ilk kez HİAMHD problemi için iş istasyonu sayısının belirli olduğu durumda, çevrim süresinin ve toplam işçi maliyetinin enküçüklenmesi ele alınmıştır. Problemin çözümü için bir matematiksel modelleme yaklaşımı geliştirilmiş ve literatürde bulunan test problemleri uyarlanarak modelin performansı değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen matematiksel modelin küçük boyutlu problemleri makul süreler içinde optimal olarak çözebildiğini ve daha büyük boyutlu örnekler için olurlu çözümlere ulaşabildiğini göstermiştir.

*Sorumlu yazar; e-posta : aslihan.karas@ogu.edu.tr

doi : <https://doi.org/10.46465/endustrimuhendisligi.1333382>

A MATHEMATICAL MODEL FOR THE TYPE-II ASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEM WITH HIERARCHICAL WORKER ASSIGNMENT

Keywords	Abstract
<p><i>Assembly line, Line balancing, Hierarchical worker assignment, Mathematical modelling</i></p>	<p><i>In the traditional assembly line balancing (ALB) problem, the processing times of tasks are assumed to be fixed and worker independent. However, these times vary among workers due to factors such as experience and skill. The type of problem in which workers are divided into hierarchical levels and the processing times and costs differ across the levels is known as the assembly line balancing with hierarchical worker assignment (ALBHWA) problem. In this study, for the first time in the literature, the minimisation of cycle time and total worker cost for the ALBHWA problem with a given number of workstations is considered. A mathematical modelling approach is developed to solve the problem and the performance of the model is evaluated through adaptation of the test problems from the literature. The results indicate that the proposed model is able to optimally solve the small-sized problems in reasonable time and achieve feasible solutions for the larger-sized instances.</i></p>
<p>Araştırma Makalesi</p>	<p>Research Article</p>
<p>Başvuru Tarihi : 26.07.2023</p>	<p>Submission Date : 26.07.2023</p>
<p>Kabul Tarihi : 15.10.2023</p>	<p>Accepted Date : 15.10.2023</p>

1. Giriş

Montaj hatları, bir yerleşim düzeni boyunca sıralanmış iş istasyonlarında montaj işlemlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla kullanılan seri üretim sistemi bileşenleridir. Parçaların istasyonlar arasında konveyör veya benzeri bir taşıma aracı ile iletildiği bu hatlarda, belirli bir görev veya görev grubunu gerçekleştirmek üzere işçiler bulunmaktadır.

Bir montaj hattının verimli olarak çalışabilmesi için toplam iş yükünün iş istasyonlarına dengeli bir şekilde dağıtılması gerekmektedir. Hatların dengelenmesi, iş istasyonları arasındaki hız farklılıklarının mümkün olduğunca azaltılması suretiyle sistem performansının artırılması amacını desteklemektedir. Bu noktada, montaj hattı dengeleme (MHD) problemi ortaya çıkmaktadır. MHD problemi, bazı kısıtlar altında istenen performans ölçütünü eniyilecek şekilde görevlerin iş istasyonlarına mümkün olduğunca dengeli bir biçimde atanması olarak tanımlanabilir (Karas ve Ozelik, 2021). Klasik hat dengeleme probleminde genel olarak, görevleri iş istasyonlarına atarken problemin tipine göre iş istasyonu sayısı (tip-I) veya çevrim süresi (tip-II)

enküçüklenmeye çalışılır (Baykasoglu ve Demirkol Akyol, 2014).

MHD probleminde, işlem sürelerinin işçiden bağımsız ve sabit olduğu varsayılmaktadır. Ancak, gerçek hayatta yetenek ve deneyim gibi farklı faktörler sebebiyle işlem süreleri işçiler arasında değişkenlik göstermektedir. Hat dengeleme literatüründe, işlem sürelerinin işçilere bağlı olduğunun dikkate alınması, montaj hattı işçi atama ve dengeleme (MHİAD) probleminin ortaya çıkışı ile başlamıştır.

MHİAD probleminde her görevin işlem süresi, atandığı işçinin performansına göre değişmektedir. Bir işçi, bazı görevleri gerçekleştirme yeteneğine sahip olmayabildiği gibi farklı görevler konusunda yüksek veya düşük performansa sahip olabilmektedir. MHD probleminin bir türü olarak işçi atamalarının da gerçekleştirildiği MHİAD problemi, Miralles, Garcia-Sabater, Andres ve Cardós (2007) tarafından engelli bireylerin çalıştığı korunaklı iş merkezlerinde montaj hatlarının dengelenmesi için önerilmiştir. MHİAD problemi kapsamında literatürde, genellikle tek modellenmiş ve düz hat varsayımı altında istasyon sayısının bilindiği durumda çevrim süresinin enküçüklenmesi (tip-II) amaçlanmıştır. Chaves, Lorena ve Miralles (2007) problemi çözmek amacıyla kümeleyerek arama yaklaşımını kullanmıştır. Chaves, Lorena ve Miralles (2009) daha sonraki çalışmalarında kümeleyerek arama yaklaşımını tekrarlı yerel arama ile melezleyerek daha başarılı sonuçlar elde etmiştir.

MHİAD tip-II probleminin çözümü için Moreira ve Costa (2009) bir yasaklı arama algoritması, Blum ve Miralles (2011) ise ışın arama algoritması önermiştir. Moreira, Ritt, Costa ve Chaves (2012) problemi öncelik kuralları ve melez genetik algoritma ile çözmüştür. Literatürde problemin çözümü için tekrarlı genetik algoritma (Mutlu, Polat ve Supçiller, 2013), dal-sınır algoritması (Borba ve Ritt, 2014; Miralles, Garcia-Sabater, Andres ve Cardós, 2008; Vilà ve Pereira, 2014), değişken komşuluk arama algoritması (Polat, Kalayci, Mutlu ve Gupta, 2016) ve kural tabanlı kurma temelli rassallaştırılmış arama algoritması (Demirkol Akyol ve Baykasoglu, 2019a) gibi farklı yaklaşımlar da sunulmuştur.

Problemi çok amaçlı (Zacharia ve Nearchou, 2016) ve karma modellenmiş (Ramezani ve Ezzatpanah, 2015) olarak ele alan yazarların bulunmasının yanı sıra U-tipi (Oksuz, Buyukozkan ve Itir Satoglu, 2017; Zhang, Tang, Han ve Li, 2019; Zhang, Tang, Ruiz ve Zhang, 2020), çift taraflı (Janardhanan, Li ve Nielsen, 2019; Janardhanan, Li, Nielsen ve Tang, 2018), paralel istasyonlu (Araújo, Costa ve Miralles, 2012, 2015) hatlarla ilgili MHİAD çalışmaları da gerçekleştirilmiştir.

Costa ve Miralles (2009) MHİAD probleminde iş rotasyonunu dikkate almıştır. Montaj görevlerinin işlem sürelerinin doğası açısından problemin stokastik (Liu, Liang ve Chu, 2019; Liu, Liu ve Chu, 2019; Liu ve diğ., 2022; Ritt, Costa ve Miralles, 2016), gürbüz (Pereira, 2018; Yilmaz, 2020) ve bulanık (Zacharia ve Nearchou, 2020) türleri de çalışılmıştır. Ayrıca, ergonomik riski (Demirkol Akyol ve Baykasoglu, 2019b), sıra bağımlı hazırlık sürelerini (Yilmaz, 2021), konum kısıtlarını (Yang, Lee ve Kim, 2021) ve enerji tüketimini dikkate alan (Liu, Liu,

Chu, Zheng ve Chu, 2021) yazarlar da bulunmaktadır. Efe, Kremer ve Kurt (2018) ise yaşa ve cinsiyete bağlı iş yükü kısıtını MHİAD problemine dahil etmiştir.

Hat dengeleme problemi çerçevesinde işçiler arasındaki performans farklılıklarının bireysel açıdan değil, hiyerarşik seviyelere bağlı olarak ele alındığı problem türü ise literatürde hiyerarşik işçi ataması ile montaj hattı dengeleme (HİAMHD) problemi olarak bilinmektedir. Bu problem türünde, görevler yetenek gereksinimlerine göre değişkenlik göstermekte ve işçilerin yetenek düzeyleri hiyerarşik olarak sıralanmaktadır. Hiyerarşik işgücü yapısında, daha yetenekli grupta bulunan bir işçi, daha yüksek maliyetle daha düşük yeteneğe sahip olanların yerine geçebilir fakat bunun tersi geçerli değildir. Kalifiye işçiler daha yüksek maliyet gerektirdiğinden dengeleme kararı toplam maliyeti etkilemektedir (Sungur ve Yavuz, 2015).

HİAMHD probleminin önerilmesiyle, işçi maliyetlerinin yetenek seviyelerine bağlı olarak ele alınması sağlanmıştır. Problemi tanıtan Sungur ve Yavuz (2015), belirli bir çevrim süresi için toplam maliyeti en küçükleme amacıyla işçilerin ve görevlerin iş istasyonlarına en uygun şekilde atanmasını sağlayan bir doğrusal tamsayılı programlama modeli önermiştir. Topaloglu Yildiz, Yildiz ve Okyay (2020) problemi konum kısıtları, paralel iş istasyonları ve görev atama kısıtları ile genişletmiştir. Çalışmada, her aşamada açılacak paralel istasyon sayısına karar verilmesi ve toplam iş istasyonu açma ve işçi maliyetinin en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Problemin çözümü için bir tamsayılı programlama modeli ve tavlama benzetimi algoritması geliştirilmiştir. Campana, Iori ve Moreira (2022) HİAMHD problemi için yeni bir matematiksel model ve iki algoritma önererek türetilen test problemleri üzerinde sayısal deneyler gerçekleştirmiştir.

Literatüre bakıldığında, MHİAD problemi konusunda gerçekleştirilen çalışmaların büyük kısmında hat dengeleme konusunda kritik öneme sahip olan ve uygulamada daha çok karşılaşılan çevrim süresi amacına odaklanılmasına rağmen, HİAMHD problemi kapsamında yapılan çalışmaların tümünde kurulum esnasında daha sık çalışılan tip-I türünün dikkate alındığı ve tip-II problemi konusunda herhangi bir çalışma bulunmadığı görülmektedir.

Bu çalışmada, literatürde ilk kez HİAMHD tip-II problemi sunulmaktadır. Bu problemde ele alınan hiyerarşik iş gücü yapısından dolayı, çevrim süresinin yanı sıra işçi maliyetleri de göz önünde bulundurulması gereken bir diğer performans ölçütü olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, belirli iş istasyonu sayısı için çevrim süresinin ve toplam işçi maliyetinin en küçüklenmesi amacıyla bir karma tamsayılı doğrusal programlama modeli önerilmiştir. Modelin performansını değerlendirmek için literatürden elde edilen test problemleri uyarlanarak kullanılmıştır.

İzleyen bölümde; HİAMHD tip-II problemi hakkında bilgilere, problemin çözümü için sunulan matematiksel modele ve küçük boyutlu bir örnek probleme yer verilmiştir. Üçüncü bölümde, uyarlanan test problemleri ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Dördüncü bölümde, sonuç ve öneriler ile çalışma sonlandırılmıştır.

2. Yöntem

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

2.1. HİAMHD Tip-II Problemi ve Önerilen Matematiksel Modelleme Yaklaşımı

HİAMHD tip-II probleminde, hiyerarşik seviyelere ayrılan işçilerin çalıştığı montaj hatlarına odaklanılmış ve işçilerin hiyerarşisinin 3 basamaktan oluştuğu varsayılmıştır. 1. seviyedeki işçiler, en kalifiye grubu oluşturmaktadır ve bu işçiler tüm görevler konusunda yeteneklidir. 2. seviyedeki işçiler, kendilerinden daha yetenekli olan 1. seviyedeki işçilere göre daha az sayıda görevi yapabilirken, işlem süreleri de daha yüksektir. 2. seviyedekiler, en az yeteneğe sahip olan 3. seviyedeki işçilerin yapabildiği tüm görevleri gerçekleştirebilir ve işlem süreleri 3. seviyedekilere göre daha kısadır. En az sayıda görev konusunda yeteneği olan ve işlem süreleri en uzun olanlar ise 3. seviye işçilerdir. Özetle, 1. seviyeden 3. seviyeye doğru yapılabilen görev sayısı azalmakta ve işlem süreleri uzamaktadır. Belirli bir seviyedeki işçiler kendinden daha az kalifiye olan diğer gruplardaki işçilerin yapabildiği tüm görevleri gerçekleştirebilmektedir. Kalifiye düzeyi arttıkça, işçi maliyeti de yükselmektedir.

Çevrim süresinin ve toplam işçi maliyetinin enküçüklenmesinin amaçlandığı karma tamsayı doğrusal programlama modelinin varsayımları aşağıdaki gibidir.

- Düz bir montaj hattında tek model ürün üretilmektedir.
- Görevler arasındaki öncelik ilişkileri bilinmektedir.
- İş istasyonu sayısı bilinmekte ve sabittir.
- İşçiler kendi aralarında hiyerarşik yetenek seviyelerine sahiptir.
- İşlem süreleri ve işçi maliyetleri, işçi seviyeleri için bilinmektedir.
- Her bir görevin gerektirdiği yetenek seviyesi bilinmektedir.
- Her görevin yalnızca bir istasyona ve bu görev konusunda yeteneği olan yalnızca bir işçiye atanması gerekmektedir.
- İşçilerin sayısı sınırsızdır.
- Her istasyonda gerekli ekipman ve aletler mevcuttur.
- Malzeme taşıma ve kurulum süreleri önemsizdir.

Kümeler ve indisler

i, j : görev

s : iş istasyonu

h : işçi yetenek seviyesi

T : görev kümesi

S : iş istasyonu kümesi

H : işçi yetenek seviyesi kümesi

P_i : i görevinin bitişik öncüllerinin kümesi

K_i : i görevini gerçekleştirebilen işçi seviyelerinin kümesi

Parametreler

n : iş istasyonu sayısı

t_{ih} : i görevinin h seviyesindeki bir işçi açısından işlem süresi

c_h : h seviyesindeki bir işçinin maliyeti

NCS : çevrim süresinin normleştirme katsayısı

NTM : toplam işçi maliyetinin normleştirme katsayısı

w_1 : çevrim süresi amacının ağırlığı

w_2 : toplam işçi maliyeti amacının ağırlığı

Karar değişkenleri

x_{ish} : iş istasyonu s 'de h seviyesinde bir işçi i görevini gerçekleştirirse 1; dd 0

y_{sh} : iş istasyonu s 'de h seviyesinde bir işçi çalışırsa 1; dd 0

CS : çevrim süresi

TM : toplam işçi maliyeti

$$\sum_{s \in S} \sum_{h \in K_i} x_{ish} = 1 \quad \forall i \in T \quad (1)$$

$$\sum_{i \in T} \sum_{h \in K_i} x_{ish} \geq 1 \quad \forall s \in S \quad (2)$$

$$\sum_{h \in H} y_{sh} = 1 \quad \forall s \in S \quad (3)$$

$$\sum_{i \in T} x_{ish} \leq M * y_{sh} \quad \forall s \in S, h \in H \quad (4)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{h \in K_i} s * x_{ish} \leq \sum_{s \in S} \sum_{h \in K_j} s * x_{jsh} \quad \forall i, j \in T, i \in P_j \quad (5)$$

$$\sum_{i \in T} t_{ih} * x_{ish} \leq CS \quad \forall s \in S, h \in H \quad (6)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{h \in H} c_h * y_{sh} = TM \quad (7)$$

$$x_{ish}, y_{sh} \in \{0,1\} \quad \forall i \in T, s \in S, h \in H \quad (8)$$

$$CS, TM \geq 0 \quad (9)$$

kısıtları altında

$$enk Z = w_1 * \left(\frac{CS}{NCS} \right) + w_2 * \left(\frac{TM}{NTM} \right) \quad (10)$$

Kısıt (1), her görevin bir istasyona ve görevi yapabilecek seviyede olan bir işçiye atanmasını garanti eder. Bu kısıt, her bir görevin, bu görev konusunda yeteneği olan bir işçiye atanmasını sağlar. Kısıt (2), her istasyona en az bir görev atanmasını kontrol eder ve çevrim süresi amacının ağırlığının çok düşük olduğu durumlarda, modelin bazı istasyonlara görev atmadan çok sayıda görevi tek istasyonda toplayarak işçi maliyetlerini düşürmeye çalışmasının önüne geçer. Kısıt (3), her istasyona bir işçinin atanmasını sağlar. x_{ish} ve y_{sh} değişkenleri arasındaki ilişki Kısıt (4) ile sağlanır. Burada M , yeterince büyük bir sayıdır ($\sum_{i \in T} \sum_{h \in H} t_{ih} < M$). Bu kısıt, bir i görevinin s istasyonunda h seviyesinde bir işçiye atanması için ilgili s istasyonunda h seviyesinde bir işçinin çalışmasını garanti eder. Kısıt (5), görevler arasındaki öncelik ilişkilerini kurar. Kısıt (6), her bir istasyonun toplam iş yükünün çevrim süresini aşmasını önler. Montaj hattının çevrim süresi, en büyük iş yüküne sahip istasyonun süresine eşittir. Buna bağlı olarak, her iş istasyonuna atanan görevlerin, istasyonun işçisi açısından sürelerinin toplamı en fazla çevrim süresi kadar olabilir. Çevrim süresi karar değişkeninin değeri, görev-iş istasyonu-işçi atamalarına bağlı olarak belirlenir. Kısıt (7), iş istasyonlarına atanan işçilerin toplam maliyetini belirler. Kısıt (8) ve (9) ise karar değişkenlerinin işaret kısıtlarıdır.

Modelin amaç fonksiyonu (10), çevrim süresinin ve toplam işçi maliyetinin normalleştirilmiş değerlerinin ağırlıklı toplamının enküçüklenmesidir. Ele alınan amaçlar, farklı birimlere sahip olduğundan amaç fonksiyonunda

normalleştirme işlemi yapılmıştır. Bu doğrultuda, her iki karar değişkeni de alabilecekleri teorik en büyük değere bölünmüştür. Görevlerin seviyeler bazında farklı işlem süreleri olduğundan, çevrim süresi için *NCS* değeri hesaplanırken her bir görevin en büyük işlem süresi dikkate alınır. *NCS* değeri, görevlerin en büyük işlem sürelerinin toplamının iş istasyonu sayısına oranı ($\frac{\sum_{i \in H} t_{ih}}{n}$) ile elde edilir. Toplam maliyet için *NTM* değeri, en maliyetli durum olan, her istasyona en kalifiye gruptan birer işçi atanması durumundaki maliyet olarak belirlenir.

2.2. Örnek Problem

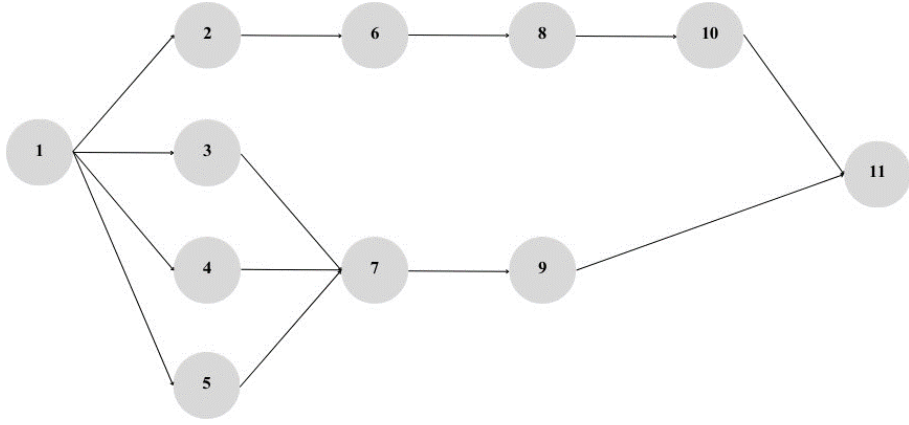
HİAMHD tip-II probleminin ve önerilen çözüm yönteminin anlaşılabilirliğini arttırmak amacıyla Sungur ve Yavuz (2015) tarafından sunulan bir örnek problem kullanılmıştır. 11 göreve ve 3 hiyerarşik işçi seviyesine sahip örnek probleme ait öncelik ilişkileri diyagramı Şekil 1’de verilmiştir.

Sungur ve Yavuz (2015) çalışmasında olduğu gibi işçi maliyet katsayıları 1., 2. ve 3. seviye işçiler için sırasıyla 100, 70 ve 49 para birimi (pb) olarak alınmıştır. Yazarlar, bu problemi çevrim süresinin bilindiği durumda istasyon sayısını enküçükleme amacıyla çözmüştür. Ancak, bu çalışmada, tip-II problemi ele alındığından dolayı iş istasyonu sayısının bilindiği durumda çevrim süresini enküçükleme amaçlanmaktadır. Örnek problemde iş istasyonu sayısı 3, w_1 ve w_2 ağırlıkları ise 0,50 olarak alınmıştır.

Örnek probleme ait işlem süresi değerleri saniye cinsinden Tablo 1’de özetlenmiştir. H1, H2 ve H3 sütunlarındaki değerler, ilgili satırda numarası yazılı olan görevin ilgili seviyedeki işçiler açısından işlem sürelerini göstermektedir. “X” ile gösterilen durumlar, ilgili satırdaki görevin o seviyedeki işçiler tarafından gerçekleştirilemediğini ifade etmektedir. 5 ve 10 numaralı görevler 1. seviye işçilik gerektirdiğinden, 2. ve 3. seviye işçiler için işlem süresi bulunmamaktadır ve sadece 1. seviye işçilere ait işlem süresi verilmiş durumdadır. 3, 6 ve 7 numaralı görevler, 1. veya 2. seviyede bulunan işçilere atanabilir. Kalan görevler ise tüm seviyelerdeki işçiler tarafından gerçekleştirilebilmektedir.

Çevrim süresi amacını normalleştirmek amacıyla *NCS* değerini hesaplamak için her bir görevin en büyük işlem süresi kullanılmaktadır. Bu yüzden, tüm satırlarda en büyük süreler dikkate alınmalıdır. Bu değerler 11 görev için koyu renkle işaretlenmiştir ve sırasıyla 10, 4, 6, 11, 1, 3, 4, 10, 8, 5 ve 6’dır. Bu değerlerin toplamının iş istasyonu sayısına oranı *NCS* değerini verir. Buradan,
$$NCS = \frac{10+4+6+11+1+3+4+10+8+5+6}{3} \cong 23$$
 olarak elde edilir.

NTM değeri ise her istasyona en kalifiye gruptan birer işçinin atanması durumundaki maliyete eşit olduğundan $NTM = 100 + 100 + 100 = 300$ olarak bulunur.



Şekil 1. Örnek Problemin Öncelik İlişkileri Diyagramı

Tablo 1

Örnek Problemin İşlem Süreleri (s)

Görev	H1	H2	H3
1	6	8	10
2	2	3	4
3	5	6	X
4	7	9	11
5	1	X	X
6	2	3	X
7	3	4	X
8	6	8	10
9	5	6	8
10	5	X	X
11	4	5	6

Örnek problem için elde edilen sonuçlar Tablo 2’de sunulmuştur. 1 ve 4 numaralı görevlerin İstasyon 1’e; 2, 5, 6, 8 ve 10 numaralı görevlerin İstasyon 2’ye atandığı görülmektedir. İstasyon 3’te ise 3, 7, 9 ve 11 numaralı görevler bulunmaktadır. Bu atamaların, görevler arasındaki öncelik ilişkilerini sağladığı görülmektedir. İstasyonlara atanan işçilerin seviyelerine bakıldığında İstasyon 1’de 2. seviyeden bir işçi, İstasyon 2’de ve İstasyon 3’te ise 1. seviyeden birer işçi çalışmaktadır. Hiçbir istasyona 3. seviyeden bir işçi atanmamıştır. Her bir istasyonda bulunan görevlerin o istasyondaki işçi açısından işlem sürelerinin toplamı “İstasyonun yükü” satırında verilmiştir. İstasyonlar arasında en büyük yüke sahip olan, İstasyon 1 ve İstasyon 3’tür ve bu istasyonların yükü (17) çevrim süresinin (CS) değerini belirlemektedir. Toplam işçi maliyeti (TM) ise hatta atanan işçilerin

maliyetlerinin toplamından (70+100+100) oluşmaktadır ve 270 pb olarak bulunmuştur.

Tablo 2

Örnek Problem için Elde Edilen Sonuçlar

İstasyon	İstasyon 1	İstasyon 2	İstasyon 3
İstasyona atanan işçinin seviyesi	H2	H1	H1
İstasyona atanan işçinin maliyeti	70	100	100
	1	2	3
	4	5	7
Görev-iş istasyonu atamaları		6	9
		8	11
		10	
İstasyonun yükü	17	16	17

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Test Problemleri

Önerilen modelin sınanması amacıyla Chaves ve diğ. (2007) tarafından sunulan MHİAD tip-II test problemleri uyarlanarak kullanılmıştır. Bu problemler; Roszieg, Heskia, Tonge ve Wee-Mag olmak üzere 4 problem ailesine aittir. Her aile 8 gruptan oluşmakta ve her grup 10 test problemini içermektedir. MHİAD tip-II için toplam 320 adet test problemi bulunmaktadır. Bir problem ailesinde bulunan tüm problemlerin öncelik ilişkileri aynı iken, işlem süresi değerleri birbirinden farklıdır.

Roszieg ve Heskia, sırasıyla, 25 ve 28 görev bulunan küçük boyutlu problemleri içeren ailelerdir. Her iki ailenin de ilk dört grubunda iş istasyonu sayısı 4'tür. Roszieg ailesinin son dört grubundaki problemler 6 iş istasyonuna sahiptir. Heskia problemlerinin son dört grubunun iş istasyonu sayısı ise 7'dir.

Tonge ve Wee-Mag problemleri, büyük boyutlu olup sırasıyla 70 ve 75 görev içermektedir. Tonge ailesinin ilk dört grubunda 10 istasyon, son dört grubunda ise 17 istasyon bulunmaktadır. Wee-Mag ailesinin ilk dört grubunda 11 ve son dört grubunda 19 iş istasyonu vardır.

HİAMHD tip-II problemi bu çalışmada ilk kez ele alındığından, literatürde problemin bu türü için sunulan test problemleri bulunmamaktadır. Bu yüzden, MHİAD tip-II test problemleri uyarlanarak kullanılmıştır. Sunulan matematiksel modelleme yaklaşımı, farklı ağırlık setleriyle çözüldüğünden dolayı belirli sayıda MHİAD problemi seçilmiştir.

Her bir MHİAD problem ailesinden iş istasyonu sayısı eşit olan ikişer örnek, böylelikle her aileden dörder örnek olmak üzere toplam 16 problem uyarlanmak üzere seçilmiştir. Her ailede toplam 80 problem bulunduğundan, her 20 örnekten bir tanesi seçilerek HİAMHD tip-II problemi olarak uyarlanmıştır. Seçilen problemlere ait görev sayısı ve işçi sayısı bilgileri Tablo 3'te özetlenmiştir.

Tablo 3

Seçilen Test Problemlerinin Özellikleri			
Aile	Problem	İstasyon sayısı	Görev sayısı
Roszieg	R-1	4	25
	R-21	4	
	R-41	6	
	R-61	6	
Heskia	H-1	4	28
	H-21	4	
	H-41	7	
	H-61	7	
Tonge	T-1	10	70
	T-21	10	
	T-41	17	
	T-61	17	
Wee-Mag	W-1	11	75
	W-21	11	
	W-41	19	
	W-61	19	

Sungur ve Yavuz (2015) tarafından sunulan çalışmada olduğu gibi 3 farklı yetenek seviyesi olduğu varsayılmıştır. Görevlerin %20'si 1. seviye, %30'u 2. seviye ve kalan %50'si ise 3. seviye olarak belirlenmiştir. MHİAD test problemlerinden her bir görevin en büyük işlem süresi 1. seviye işçilerin işlem süresi olarak alınmış ve her sonraki seviyeye geçişte bu süreler 1,10 çarpanı ile çarpılmıştır. En yetenekli işçilerin maliyet katsayısının 100 pb olduğu ve sonraki seviyelere geçişte maliyet değerinin 0,70 çarpanı ile çarpıldığı varsayılmıştır. Çevrim süresi ve toplam maliyet amaçları için 0-1 arasında toplam 11 farklı ağırlık seti seçilmiştir (Tablo 4).

Tablo 4

Çevrim Süresi ve Toplam Maliyet Amaçları için Ağırlık Değerleri

Ağırlık	Ağırlık seti										
w_1	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
w_2	1.00	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	0,00

3.2. Test Sonuçları

Ele alınan problemin çözümü için geliştirilen model, Intel Core i5 1.80GHz işlemciye ve 8 GB RAM'e sahip bir bilgisayarda GAMS programı ile kodlanmış ve çözücü olarak CPLEX kullanılmıştır. 16 test problemi ve 11 ağırlık seti kullanılarak toplam 176 adet çözüm elde edilmiştir. Her problemin her bir ağırlık seti ile çözülmesi için 3600 saniye süre limiti belirlenmiştir.

Küçük boyutlu problemlerden oluşan Roszieg ve Heskia ailelerine ait sonuçlar sırasıyla Tablo 5'te ve Tablo 6'da, büyük boyutlu problemlerden oluşan Tonge ve Wee-Mag ailelerine ait sonuçlar ise sırasıyla Tablo 7'de ve Tablo 8'de sunulmuştur.

Sonuç tablolarında CS çevrim süresini, TM ise toplam işçi maliyetini göstermektedir. Verilen süre limiti içinde optimal çözüme ulaşılması durumundaki çözüm değerleri koyu renk ile işaretlenmiştir. "Süre" sütunlarında ise saniye cinsinden çözüm süreleri bulunmaktadır.

Roszieg ve Heskia test problemlerinin tamamında 1 dakikadan daha kısa süreler içinde optimal çözümlere ulaşılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, çevrim süresi amacına ait ağırlığı ifade eden w_1 değerinin düşük olduğu durumlarda, çevrim süresinin yüksek değerler aldığı ve ilgili ağırlığın değeri arttıkça çevrim süresinin düştüğü görülmektedir.

Çevrim süresini azaltmak için daha kalifiye işçiler çalışması gerektiğinden, düşük çevrim süresi değerlerinde toplam işçi maliyetleri yüksek değerler almaktadır. Çevrim süresinin daha az ağırlığa sahip olduğu durumlarda ise model mümkün olduğunca daha az maliyetli işçileri istasyonlara atamaya çalışmaktadır.

Çevrim süresi ve toplam işçi maliyetlerine ait ağırlıklardan birinin 0 değerini aldığı durumlarda, model tek amaçlı bir yapıya dönüşmektedir. Buna bağlı olarak ağırlığı 0 olan amacın aldığı değer, amaç fonksiyonunu etkilememektedir.

Tablo 5

Roszieg Problemlerine Ait Sonuçlar

w_1	R-1			R-21			R-41			R-61		
	CS	TM	Süre	CS	TM	Süre	CS	TM	Süre	CS	TM	Süre
0,00	110	247	0,09	171	247	0,08	64	345	0,19	109	345	0,22
0,10	37	268	0,41	54	268	0,38	32	366	0,63	57	366	0,30
0,20	37	268	0,52	54	268	0,55	32	366	1,09	51	387	0,72
0,30	37	268	0,64	54	268	0,52	25	417	1,36	44	417	0,95
0,40	37	268	0,64	54	268	0,61	25	417	1,80	44	417	1,48
0,50	35	289	0,83	54	268	0,59	24	438	3,34	44	417	2,77
0,60	35	289	0,83	54	268	0,75	22	510	2,74	41	468	2,00
0,70	34	310	0,78	54	268	0,72	22	510	2,56	41	468	1,75
0,80	33	340	0,86	49	370	0,67	21	570	2,55	38	570	1,33
0,90	32	400	0,88	49	370	0,61	21	570	1,41	38	570	1,74
1,00	32	400	0,58	49	370	0,39	21	600	0,74	38	600	1,45

Tablo 6

Heskia Problemlerine Ait Sonuçlar

w_1	H-1			H-21			H-41			H-61		
	CS	TM	Süre	CS	TM	Süre	CS	TM	Süre	CS	TM	Süre
0,00	559	247	0,09	944	247	0,09	714	394	0,19	1247	394	0,20
0,10	297	268	0,19	504	268	0,30	200	436	0,64	368	436	0,73
0,20	297	268	0,41	504	268	0,30	200	436	1,59	368	436	1,58
0,30	297	268	0,59	431	289	0,36	168	487	11,16	278	508	4,97
0,40	297	268	0,48	431	289	0,69	168	487	25,89	278	508	10,34
0,50	281	289	0,84	431	289	0,56	162	508	17,00	278	508	6,58
0,60	281	289	0,97	431	289	0,64	162	508	12,83	278	508	11,06
0,70	281	289	0,63	431	289	0,55	159	529	9,64	269	550	10,88
0,80	256	400	0,74	401	370	7,78	150	649	52,98	257	640	38,17
0,90	256	400	0,72	393	400	10,17	147	700	5,08	251	700	11,98
1,00	256	400	0,47	393	400	0,52	147	700	8,30	251	700	28,06

Tonge ailesine ait 4 problemin 11 ağırlık setiyle çözülmesiyle elde edilen 44 durumdan 9 tanesi için optimal çözümlere ulaşılmıştır. Çevrim süresi amacının ağırlığının 0 olduğu durumlarda, çözüm süresi oldukça kısarken ilgili ağırlık değeri arttıkça çözüm süresinin de arttığı görülmektedir. Bunun sebebi, çevrim süresinin 0'dan büyük bir ağırlığa sahip olmadığı durumda, modelin tek amaçlı bir yapı kazanarak istasyonların çoğuna birer görev atayıp belirli bir istasyonun ağırlığını oldukça artırmasıdır. Böylelikle, yükü çok fazla olan istasyona en kalifiye gruptan bir işçi atamakta ve kalan istasyonlarda daha az maliyetli birer işçi kullanarak maliyeti düşürmektedir. Ancak, çevrim süresinin de ağırlığının 0'dan büyük olduğu durumlarda, en yüklü istasyonun yükünü olabildiğince azaltmak için iş yükünü mümkün olduğunca dengeli bir biçimde dağıtmak gerekmektedir.

Çevrim süresinin ağırlığının 1 olduğu durumda, Tonge problemlerinden sadece T-21 problemi için verilen süre limiti içinde optimal çözüme ulaşılmıştır. Diğer problemler ile farklı bir durumla karşılaşılmasının sebebi, her bir problemin işlem süresi değerlerinin birbirinden farklı olmasıdır. İşlem sürelerinin farklı olması; çevrim süresini, atanacak işçilerin seviyesini ve dolayısıyla iki amaç arasındaki ödünleşmeyi ve çözüm süresini etkilemektedir.

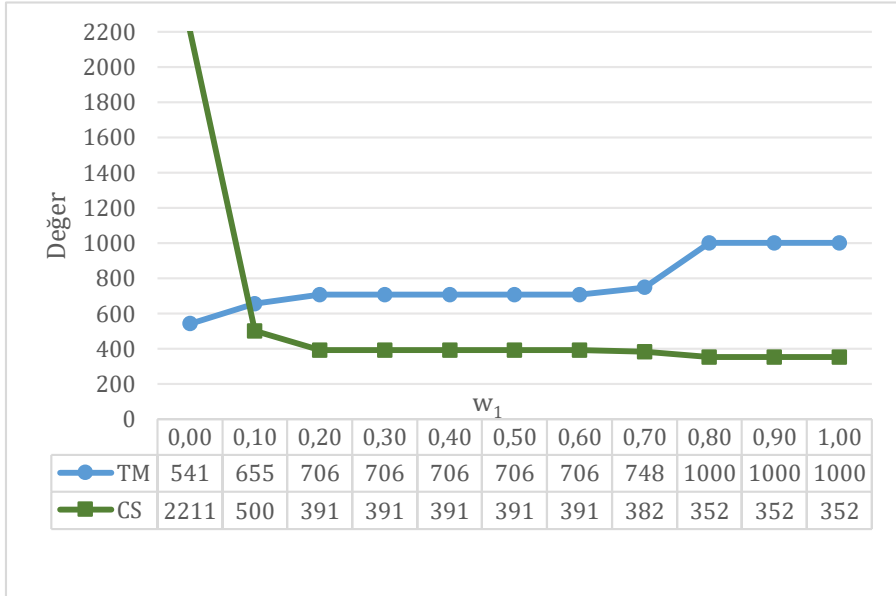
Tablo 7

Tonge Problemlerine Ait Sonuçlar

w_1	T-1			T-21			T-41			T-61		
	CS	TM	Süre	CS	TM	Süre	CS	TM	Süre	CS	TM	Süre
0,00	2211	541	0,25	3988	541	0,17	2229	884	0,20	4130	884	0,30
0,10	500	655	378,78	1040	634	258,58	343	1070	3600,00	643	1070	3600,00
0,20	391	706	1554,28	712	706	3600,00	269	1142	3600,00	468	1163	3600,00
0,30	391	706	3600,00	713	706	3600,00	232	1214	3600,00	425	1214	3600,00
0,40	391	706	3600,00	712	706	3600,00	231	1214	3600,00	423	1214	3600,00
0,50	391	706	3600,00	712	706	3600,00	230	1214	3600,00	424	1214	3600,00
0,60	391	706	3600,00	712	706	3600,00	228	1235	3600,00	415	1286	3600,00
0,70	382	748	3600,00	705	727	3600,00	227	1265	3600,00	417	1265	3600,00
0,80	352	1000	3600,00	643	1000	3600,00	224	1337	3600,00	392	1580	3600,00
0,90	352	1000	3600,00	642	1000	601,52	213	1580	3600,00	388	1640	3600,00
1,00	352	1000	3600,00	642	1000	2165,63	209	1700	3600,00	385	1700	3600,00

Şekil 2'deki grafikte, T-1 probleminin farklı ağırlık setleriyle elde edilen çözüm değerleri ve bu değerlerin çeliştiği görülmektedir. Küçük boyutlu problemlerde olduğu gibi çevrim süresi amacının ağırlığı 0 olduğunda, model düşük maliyetli

işçileri kullanmaya çalışmaktadır. Bu durumda, çevrim süresi en yüksek değerine ulaşmıştır. Çevrim süresinin ağırlığını ifade eden w_1 değeri artmaya başladığında ilgili amaç değeri hızla düşmüştür. Çevrim süresinin ağırlığı arttıkça, en yüksek istasyon süresine sahip olan istasyonun süresini azaltmak için daha yetenekli işçilerin atanması gerekmektedir. Buna bağlı olarak çevrim süresinin en yüksek ağırlığa sahip olduğu durumda, tüm istasyonlara en kalifiye gruptan birer işçi atanmış ve işçi maliyetleri olabilecek en yüksek değere erişmiştir.



Şekil 2. T-1 Problemi için Farklı Ağırlık Değerleriyle Elde Edilen Çözüm Değerleri

Wee-Mag problem ailelerinden seçilen test problemleri üzerinde elde edilen sonuçlara göre bu aileye ait 4 problemin 11 ağırlık seti ile çözülmesiyle elde edilen 44 durumdan 8 tanesi için optimal çözümler bulunmuştur. Kalan durumlar için verilen süre limiti içinde olurlu çözümlere ulaşılmıştır. Diğer ailelere ait problemlerde olduğu gibi ele alınan amaçların çeliştiği, ağırlık değerlerine bağlı olarak bir amacın değeri artarken diğerinin değerinin azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Aynı aileye ait problemlerin işlem süresi değerlerinin farklı olması sebebiyle ele alınan amaçların değerleri ve çözüm süreleri değişmektedir.

Tablo 8

Wee-Mag Problemlerine Ait Sonuçlar

w_1	W-1			W-21			W-41			W-61		
	CS	TM	Süre	CS	TM	Süre	CS	TM	Süre	CS	TM	Süre
0,00	873	590	0,52	1585	590	0,47	852	982	0,42	1634	982	0,48
0,10	158	704	3600,00	280	704	368,73	114	1168	3600,00	211	1168	3600,00
0,20	158	704	3600,00	282	704	3600,00	97	1189	3600,00	182	1210	3600,00
0,30	158	704	3600,00	282	704	3600,00	95	1210	3600,00	177	1240	3600,00
0,40	158	704	3600,00	282	704	3600,00	95	1210	3600,00	175	1240	3600,00
0,50	155	725	3600,00	280	704	1875,53	92	1240	3600,00	177	1240	3600,00
0,60	153	746	3600,00	282	704	3600,00	89	1321	3600,00	175	1261	3600,00
0,70	149	797	3600,00	271	797	3600,00	89	1312	3600,00	169	1363	3600,00
0,80	142	950	3600,00	249	1070	3600,00	86	1486	3600,00	166	1486	3600,00
0,90	137	1100	3600,00	247	1100	3600,00	88	1342	3600,00	165	1456	3600,00
1,00	137	1100	814,98	247	1100	394,72	85	1618	3600,00	158	1840	3600,00

4. Sonuç ve Öneriler

Manuel montaj hatlarında çalışan işçiler, sahip oldukları farklı deneyim ve yetenek düzeyleri sebebiyle aynı görevleri gerçekleştirmek için farklı işlem sürelerine ihtiyaç duymaktadır. Hat dengeleme çerçevesinde hiyerarşik yetenek seviyelerinin dikkate alındığı HİAMHD problemi, geleneksel hat dengeleme probleminin sabit işlem süresi varsayımını kaldırmasına rağmen az çalışılan bir problem türüdür. HİAMHD problemi kapsamında literatürde, iş istasyonu sayısının enküçüklenmesinin amaçlandığı tip-I türü ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmada, HİAMHD literatüründeki boşluğu doldurmak için sistem performansı üzerinde önemli bir etkisi bulunan çevrim süresinin ve problemin hiyerarşik yapısı gereği toplam işçi maliyetinin eşzamanlı olarak enküçüklenmesi amacıyla HİAMHD tip-II problemi ilk kez ele alınmıştır. Problemin çözümü için yeni bir matematiksel model önerilmiş ve literatürde bulunan test problemlerinin uyarlanması ile modelin sınanması sağlanmıştır.

16 test probleminin 11 ağırlık seti ile çözülmesiyle elde edilen toplam 176 durumda, çevrim süresi ve toplam işçi maliyeti amaçlarının çeliştiğini görülmüştür. Önerilen matematiksel modelleme yaklaşımı ile küçük boyutlu problemlerin optimal çözümlerine tüm durumlarda 1 dakikadan kısa süreler içinde ulaşılmıştır. Büyük boyutlu örneklerde, çevrim süresinin ağırlığı 0 iken modelin belirli bir istasyona çok fazla sayıda görev atamak suretiyle istasyon yükünü diğer istasyonlara nazaran oldukça artırdığı ve böylelikle daha az sayıda istasyona daha yetenekli işçiler atarken, az sayıda görevin bulunduğu diğer istasyonlara daha az maliyetli ve yavaş çalışan birer işçi atayarak işçi maliyetini

düşürdüğü gözlemlenmiştir. Bu gibi durumlarda optimal çözümlere ulaşmak kolaylaşırken, çevrim süresi amacının kayda değer bir ağırlık değeri aldığı durumlarda iş yükünü dengeli bir şekilde dağıtmak gerektiğinden çözüm zorlaşmıştır. Çevrim süresini düşürmek, dengeli bir iş yükü dağılımının yanı sıra istasyonların süresini de azaltmayı gerektirdiğinden istasyonlara daha hızlı çalışan işçiler atanmalıdır. İşçilerin yetenek seviyesi arttıkça maliyeti de yükseldiğinden, çevrim süresi ağırlığının yüksek olduğu durumlarda daha yüksek işçi maliyeti değerleri elde edilmiştir.

Bu çalışma sayesinde endüstriyel uygulayıcılara, farklı tecrübe düzeyi ve yeteneklere sahip heterojen iş gücünü montaj hatlarına daha etkin bir şekilde atama ve çevrim süresi ile işçi maliyetleri arasında ödünleşme elde etme imkanı sunulmaktadır. Gelecek çalışmalarda, farklı amaç fonksiyonlarının ve bazı özel kısıtların probleme dahil edilmesi önerilmektedir. Ayrıca, büyük boyutlu problemlerin çözülmesi için meta-sezgisel çözüm yaklaşımlarının geliştirilmesi planlanmaktadır.

Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Aslıhan KARAŞ ÇELİK, matematiksel programlama modelinin kurulması, test problemlerinin türetilmesi ve çözümü, makalenin yazımı; Feriştah ÖZÇELİK, çalışmanın danışmanlığının yürütülmesi, matematiksel programlama modelinin geliştirilmesi ve makalenin yazımı konularında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

- Araújo, F. F. B., Costa, A. M., & Miralles, C. (2012). Two extensions for the ALWABP: Parallel stations and collaborative approach. *International Journal of Production Economics*, 140(1), 483-495. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.06.032>
- Araújo, F. F. B., Costa, A. M., & Miralles, C. (2015). Balancing parallel assembly lines with disabled workers. *European Journal of Industrial Engineering*, 9(3), 344-365. Doi: <https://doi.org/10.1504/EJIE.2015.069343>
- Baykasoğlu, A. ve Demirkol Akyol, Ş. (2014). Ergonomik montaj hattı dengeleme. *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(4), 785-792. Doi: <https://doi.org/10.17341/gummfd.00296>

- Blum, C. & Miralles, C. (2011). On solving the assembly line worker assignment and balancing problem via beam search. *Computers & Operations Research*, 38(1), 328-339. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2010.05.008>
- Borba, L. & Ritt, M. (2014). A heuristic and a branch-and-bound algorithm for the assembly line worker assignment and balancing problem. *Computers & Operations Research*, 45, 87-96. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.12.002>
- Campana, N. P., Iori, M., & Moreira, M. C. O. (2022). Mathematical models and heuristic methods for the assembly line balancing problem with hierarchical worker assignment. *International Journal of Production Research*, 60(7), 2193-2211. Doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1884767>
- Chaves, A. A., Lorena, L. A. N., & Miralles, C. (2007). Clustering search approach for the assembly line worker assignment and balancing problem. *Proceedings of the 37th International Conference on Computers & Industrial Engineering*, 1469-1478, Alexandria, Egypt.
- Chaves, A. A., Lorena, L. A. N., & Miralles, C. (2009). Hybrid metaheuristic for the assembly line worker assignment and balancing problem. *Proceedings of the 6th International Workshop on Hybrid Metaheuristics*, 1-14, Udine, Italy. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-04918-7_1
- Costa, A. M. & Miralles, C. (2009). Job rotation in assembly lines employing disabled workers. *International Journal of Production Economics*, 120(2), 625-632. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.04.013>
- Demirkol Akyol, S. & Baykasoğlu, A. (2019a). A multiple-rule based constructive randomized search algorithm. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(2), 557-573. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10845-016-1262-6>
- Demirkol Akyol, S. & Baykasoglu, A. (2019b). ErgoALWABP: A multiple-rule based constructive randomized search algorithm for solving assembly line worker assignment and balancing problem under ergonomic risk factors. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(1), 291-302. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10845-016-1246-6>
- Efe, B., Kremer G. E. O., & Kurt, M. (2018). Age and gender-based workload constraint for assembly line worker assignment and balancing problem in a textile firm. *International Journal of Industrial Engineering*, 25(1), 1-17. Erişim adresi: <https://eds.p.ebscohost.com/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid=0&sid=82051d6d-1d31-4836-abf6-d3b82821d70b%40redis>
- Janardhanan, M. N., Li, Z., & Nielsen, P. (2019). Model and migrating birds optimization algorithm for two-sided assembly line worker assignment and balancing problem. *Soft Computing*, 23(21), 11263-11276. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00500-018-03684-8>

- Janardhanan, M. N., Li Z., Nielsen P., & Tang Q. (2018). Artificial bee colony algorithms for two-sided assembly line worker assignment and balancing problem. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 620, 11–18. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-62410-5_2
- Karas, A. & Ozcelik, F. (2021). Assembly line worker assignment and rebalancing problem: A mathematical model and an artificial bee colony algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 156, 107195. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107195>
- Liu, M., Liang, B., & Chu, F. (2019). A risk-averse assembly line worker assignment and balancing problem with uncertain processing time. *Proceedings of the 2019 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, IESM*, 266-271, Shanghai, China. Doi: <https://doi.org/10.1109/IESM45758.2019.8948211>
- Liu, M., Liu, R., & Chu, F. (2019). An improved model for assembly line worker assignment and balancing problem considering stochastic worker availability. *Proceedings of the 2019 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, IESM*, 731-736, Shanghai, China. Doi: <https://doi.org/10.1109/IESM45758.2019.8948125>
- Liu, M., Liu, Z., Chu, F., Liu, R., Zheng, F., & Chu, C. (2022). Risk-averse assembly line worker assignment and balancing problem with limited temporary workers and moving workers. *International Journal of Production Research*, 60(23), 7074–7092. Doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.2002960>
- Liu, R., Liu, M., Chu, F., Zheng, F., & Chu, C. (2021). Eco-friendly multi-skilled worker assignment and assembly line balancing problem. *Computers & Industrial Engineering*, 151, 106944. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106944>
- Miralles, C., Garcia-Sabater, J. P., Andres, C., & Cardós, M. (2007). Advantages of assembly lines in sheltered work centres for disabled. A case study. *International Journal of Production Economics*, 110(1-2), 187-197. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.02.023>
- Miralles, C., Garcia-Sabater, J. P., Andres, C., & Cardós, M. (2008). Branch and bound procedures for solving the assembly line worker assignment and balancing problem: Application to sheltered work centers for disabled. *Discrete Applied Mathematics*, 156(3), 352–367. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.dam.2005.12.012>
- Moreira, M. C. O. & Costa, A. M. (2009). A minimalist yet efficient tabu search algorithm for balancing assembly lines with disabled workers. *Proceedings of the XLI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, 660–671, Porto Seguro, Bahia, Brazil.

- Moreira, M. C. O., Ritt, M., Costa, A. M., & Chaves, A. A. (2012). Simple heuristics for the assembly line worker assignment and balancing problem. *Journal of Heuristics*, 18(3), 505-524. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10732-012-9195-5>
- Mutlu, O., Polat, O., & Supciller, A. A. (2013). An iterative genetic algorithm for the assembly line worker assignment and balancing problem of type-II. *Computers & Operations Research*, 40(1), 418-426. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.07.010>
- Oksuz, M. K., Buyukozkan, K., & Itir Satoglu, S. (2017). U-shaped assembly line worker assignment and balancing problem: A mathematical model and two meta-heuristics. *Computers & Industrial Engineering*, 112, 246-263. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.08.030>
- Pereira, J. (2018). The robust (minmax regret) assembly line worker assignment and balancing problem. *Computers & Operations Research*, 93, 27-40. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.01.009>
- Polat, O., Kalayci, C. B., Mutlu, O., & Gupta, S. M. (2016). A two-phase variable neighbourhood search algorithm for assembly line worker assignment and balancing problem type-II: An industrial case study. *International Journal of Production Research*, 54(3), 722-741. Doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1055344>
- Ramezani, R. & Ezzatpanah, A. (2015). Modeling and solving multi-objective mixed-model assembly line balancing and worker assignment problem. *Computers & Industrial Engineering*, 87, 74-80. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.04.017>
- Ritt, M., Costa, A. M., & Miralles, C. (2016). The assembly line worker assignment and balancing problem with stochastic worker availability. *International Journal of Production Research*, 54(3), 907-922. Doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1108534>
- Sungur, B. & Yavuz, Y. (2015). Assembly line balancing with hierarchical worker assignment. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 290-298. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.08.004>
- Topaloglu Yildiz, S., Yildiz, G., & Okyay, R. (2020). Assembly line balancing problem with hierarchical worker assignment, positional constraints, task assignment restrictions and parallel workstations. *International Journal of Industrial Engineering-Theory Applications and Practice*, 27(3), 345-377. Doi: <https://doi.org/10.23055/ijietap.2020.27.3.5953>
- Vilà, M. & Pereira, J. (2014). A branch-and-bound algorithm for assembly line worker assignment and balancing problems. *Computers & Operations Research*, 44, 105-114. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.10.016>

- Yang, H., Lee, J. H., & Kim, H. J. (2021). Assembly line worker assignment and balancing problem with positional constraints. *Proceedings of the International-Federation-of-Information-Processing-Working-Group-5.7 (IFIP WG 5.7) International Conference on Advances in Production Management Systems (APMS)*, 3-11, Nantes, France. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85914-5_1
- Yilmaz, H. (2021). Modeling and solving assembly line worker assignment and balancing problem with sequence-dependent setup times. *Soft Computing*, 25(20), 12899–12914. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00500-021-06107-3>
- Yilmaz, O. F. (2020) Robust optimization for U-shaped assembly line worker assignment and balancing problem with uncertain task times. *Croatian Operational Research Review*, 11(2), 229–239. Doi: <https://doi.org/10.17535/crorr.2020.0018>
- Zacharia, P. T. & Nearchou, A. C. (2016). A population-based algorithm for the biobjective assembly line worker assignment and balancing problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 49, 1-9. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2015.11.007>
- Zacharia, P. T. & Nearchou, A. C. (2020). The fuzzy assembly line worker assignment and balancing problem. *Cybernetics and Systems*, 52(3), 221–243. Doi: <https://doi.org/10.1080/01969722.2020.1840144>
- Zhang, Z., Tang, Q., Han, D., & Li, Z. (2019). Enhanced migrating birds optimization algorithm for U-shaped assembly line balancing problems with workers assignment. *Neural Computing & Applications*, 31(11), 7501-7515. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3596-9>
- Zhang, Z., Tang, Q., Ruiz, R., & Zhang, L. (2020). Ergonomic risk and cycle time minimization for the U-shaped worker assignment assembly line balancing problem: A multi-objective approach. *Computers & Operations Research*, 118, 104905. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.104905>