



Cost-based assembly line balancing and worker-cobot assignment problem under ergonomic constraints

Perihan Bekdemir^{1*}, Seren Özmehmet Taşan²

¹Department of Industrial Engineering, Faculty Engineering, Eskişehir Technical University, 26555, Eskişehir, Türkiye

²Department of Industrial Engineering, Faculty Engineering, Dokuz Eylül University, 35390, İzmir, Türkiye

Highlights:

- Cost-based assembly line balancing
- Worker-cobot assignment
- Ergonomic issues on the assembly line

Keywords:

- Cobot
- Ergonomic issues
- Mixed integer linear programming
- Linearization
- Cost-based

Article Info:

Research Article

Received: 30.09.2022

Accepted: 12.03.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1182311

Correspondence:

Author: Perihan Bekdemir
e-mail: perihanbekdemir@eskisehir.edu.tr
phone: +90 506 271 8939

Graphical/Tabular Abstract

In this study, a mixed integer programming model is proposed for the cost-based assembly line balancing and worker-cobot assignment problem under ergonomic constraints. Energy expenditure problems are also addressed from ergonomics perspective. To evaluate the effectiveness of the cobots in assembly lines, a total of four different scenarios; i.e. cost based assembly line only with the manual workforce, the cost-based assembly line balancing and worker-cobot assignment problem that ignores ergonomic constraint, the cost-based assembly line balancing and worker-cobot assignment problem that ignores ergonomic constraints investigating the effect of change in parameters on objective function, the cost-based assembly line balancing and worker-cobot assignment problem under ergonomic constraints where change in energy expenditures is addressed. The solution of sample problem is shown in Figure A.

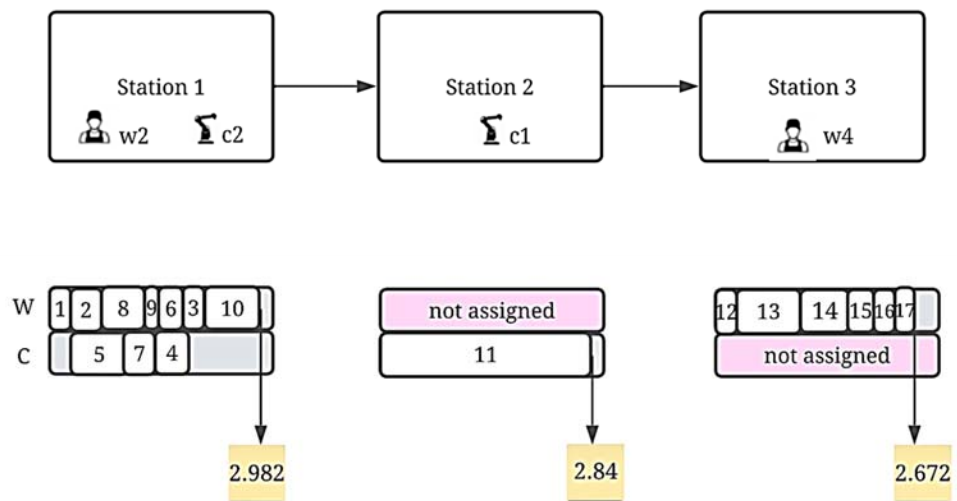


Figure A. Cost-based assembly line balancing and worker-cobot assignment problem under ergonomic constraints

Purpose: The aim of this study is to ensure that the cobots and workers with different characteristics, which are started to be used effectively in production, are correctly assigned together, to minimize the cost and to reduce the ergonomic issues of the workers.

Theory and Methods: In this study, four different scenario analyzes were conducted. A mixed integer programming model is proposed for all scenario analysis.

Results: Models of the whole scenario are solved using Cplex (version 12.7.1). On the assembly line with cobot is almost 4.3% cheaper per cycle compared to a manual assembly line, and the cost per cycle is equal compared to a assembly line where ergonomic constraints are ignored. Different scenarios in which the parameters in the model change are also taken into account and the effect on the cost per cycle is observed.

Conclusion: It has been observed that assembly lines where workers and cobots are both cheaper and more efficient than manual assembly lines. It has been realized how important the assessment of ergonomic risks is for workers.



Ergonomik kısıtlar altında maliyet tabanlı montaj hattı dengeleme ve işçi-kobot atama problemi

Perihan Bekdemir^{1*}, Seren Özmehmet Taşan²

¹Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 26555, Tepebaşı, Eskişehir, Türkiye

²Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 35390, İzmir, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Maliyet tabanlı montaj hattı dengeleme
- İşçi-kobot ataması
- Montaj hattındaki ergonomik sorunlar

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 30.09.2022

Kabul: 12.03.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1182311

Anahtar Kelimeler:

Kobot, ergonomik sorunlar, karma tamsayı doğrusal programlama, doğrusallaştırma, maliyet tabanlı

ÖZ

Uzun yıllar boyunca montaj hattı dengeleme problemi (MHDP) literatürde farklı çözüm yaklaşımlarıyla ele alınmıştır. Son zamanlarda montaj hattında işçilerle aynı istasyonda veya farklı istasyonlarda görev alabilen işbirlikçi/kolaboratif robot (kobot) kullanımı oldukça popüler hale gelmiştir. İşçilerin belirli düzeyin üzerinde enerji tüketimiyle mola sürelerinin hesaplanması problemi de ergonomi perspektifinden değerlendirilmiştir. Bu çalışmada ergonomik kısıtlar altında maliyet tabanlı montaj hattı dengeleme ve işçi-kobot atama problemi (MTMHD-İKAP) ele alınmış ve problemin çözümü için karma tamsayı doğrusal programlama (KTDP) modeli önerilmiştir. Kobotların montaj hatlarındaki etkinliğini değerlendirmek için sadece manuel işgücünün olduğu maliyet tabanlı montaj hattı (MTMH), ergonomi perspektifinin göz ardı edildiği MTMHD-İKAP, ergonomi perspektifinin göz ardı edildiği farklı parametrelerin amaç fonksiyonuna etkisini değerlendiren MTMHDİKAP ve ergonomi perspektifinin ele alındığı enerji tüketiminin değişiminin değerlendirildiği MTMHD-İKAP'nin ele alındığı toplam dört farklı senaryo kullanılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır.

Cost-based assembly line balancing and worker-cobot assignment problem under ergonomic constraints

HIGHLIGHTS

- Cost-based assembly line balancing
- Worker-cobot assignment
- Ergonomic issues on the assembly line

Article Info

Research Article

Received: 30.09.2022

Accepted: 12.03.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1182311

Keywords:

Cobot, ergonomic issues, mixed integer linear programming, linearization, cost-based

ABSTRACT

For many years, the assembly line balancing problem (ALBP) has been discussed with different solution approaches in the literature. Recently, the use of collaborative robots (cobots) that can work at the same or different stations with the workers on the assembly line has become very popular. The problem of calculating the break times with the energy expenditure of the workers above a certain level has also been evaluated from the perspective of ergonomics. In this study, the cost-based assembly line balancing and worker-cobot assignment problem (ALBWCAP) under ergonomic constraints is discussed and a mixed integer linear programming model (MILP) is proposed to solve the problem. To evaluate the effectiveness of the cobots in assembly lines, a total of four different scenarios; i.e. cost-based assembly line only with the manual workforce, the cost-based ALBWCAP where the ergonomics perspective is ignored, cost-based ALBWCAP where the ergonomics perspective is ignored with different parameters in objective function, and the cost-based ALBWCAP where the ergonomics perspective is addressed-change in energy expenditures were considered and their results were compared. and their results were compared.

1. Giriş (Introduction)

Otomasyonun imalat sektöründeki rolü her geçen gün daha da etkin hale gelmektedir fakat ne kadar etkili olursa olsun otomasyon istenilen oranda sağlanamamaktadır çünkü çalışanların halen işin büyük bir kısmını yapmaları ve işe değer katmada oldukça aktif bir role sahip olmalarıdır. Bunun önüne geçebilmek için işçi ve robotun birlikte çalıştığı işbirlikçi/kolaboratif robotlardan (kobot) yararlanılmaktadır [1]. İşçi ve kobot bir işi hem beraber yapabilir hem de ayrı ayrı yapabilmektedirler. Aynı çalışma ortamında hem işbirliği içerisinde hem de bireysel olarak ustaca iş paylaşımı yaparlar. Son yıllarda değeri artan kobotlar hem hizmet sektöründe hem de özellikle üretim sektöründe birçok avantaja sahiptirler. Maliyeti düşük olup birçok alanda tercih edilen kobotlar, işçilerle çalışarak otomatik veya manuel üretimde kullanılmaktadır. Kobotların avantajlarından biri de normal bir işçiden çok daha fazla iş yapabilesidir. Ekonomi ve düşük enerji tüketimi açısından çok verimlidir. Esnek bir üretim ve çalışma ortamı sağlamada işçilere büyük fayda sağlarlar ve ayrıca işçilerin zorlandığı ağır ve monoton işleri yapmakta çok uzadırlar [2].

Günümüzde sıklıkla bahsedilen Endüstri 4.0 kavramı, seri üretimi artırmayı hedeflemektedir [3]. Fakat bundan sonra yerini alacak olan Endüstri 5.0'da üretilen ürün, insanların kişisel ihtiyaçlarına daha uygun olacak ve daha karmaşık detayları içerecektir. Bu nedenle üretimde el emeği daha gerekli ve işçilerle çalışan kobotlar monoton ve ağır yükler üstlenecektir. Kişiselleştirilmiş ürüne odaklanan Endüstri 5.0 zirvesi, sağlık, eğitim, tedarik zinciri, lojistik ve doğal afetler (deprem, yangın, hastalık vb.) gibi birçok sektörde çalışan kişilerin ve kobotların etkileşiminden faydalanacaktır [4]. Montaj hattı dengeleme konusunda literatürde oldukça çalışma bulunmaktadır. Bu sebepten dolayı bu çalışmada ilk olarak montaj hattı dengeleme konusunu içeren derleme makaleler incelenmiştir. Ardından teknolojik ve ergonomik gelişmeleri takip etmek adına işçi ve kobotların beraber yer aldığı montaj hattı problemini ele alan çalışmalar incelenmiştir.

Öncelikle montaj hattının önemli bir problemi olan Montaj Hattı Dengeleme (MHD) konusunun literatür çalışmaları incelenmiştir. Boysen vd. [5], montaj hattı dengeleme problemini öncelik diyagramı özelliği (ürüne özel öncelik grafikleri, öncelik grafiğinin yapısı, işleme süreleri, sıraya bağlı görev süresi artışları, atama kısıtlamaları, işleme alternatifleri), istasyon ve hat özellikleri (iş parçalarının hareketi, hat düzeni, paralelleştirme, kaynak ataması, istasyona bağlı zaman artışları, hat yapılandırmasının ek yönleri), ve ayrıca hedefler (verilen çevrim süresi ve istasyon sayısına göre hattın

uygulanabilirliği, istasyon sayısını en aza indirme (tip-1), çevrim süresini en aza indirme (tip-2), hattın verimliliğini en iyi şekilde belirlemek için istasyon sayısını ve çevrim süresini en aza indirme) olmak üzere üç farklı özelliğe göre sınıflandırmışlardır. Boysen vd. [6], daha sonraki çalışmasında bu sınıflandırmaya ek olarak hat kontrolüne (tempolu hat, temposuz senkron hat, temposuz, asenkron hat), sıklığına (ilk kurulum ve yeniden yapılandırma) ve otomasyon seviyesine göre (manuel ve otomatik) sınıflandırmışlardır. Sivasankaran ve P. Shahabudeen [7], model sayısı (tek model ve çoklu model), görev sürelerinin doğası (belirlenimsel ve olasılıksal) ve montaj hattının türü (düz tip ve U tipi) sınıflandırmasına göre literatürdeki çalışmaları incelemişlerdir. Kumar [8], toplam ekipman maliyetini ve iş istasyonu sayısını en aza indirmeyi amaçlayan çalışmaların çözüm yöntemlerini ve eğilimlerini bulmaya çalışmışlardır. Yapılan çalışmalarda ekonomik, ergonomik ve otomasyonun uygulandığı hatlara olan popülaritenin arttığı gözlemlenmiştir.

Literatürde, kobotların kullanıldığı Montaj Hattı Dengeleme Problemi (MHDP) çalışmalarında ele alınan konuya göre değerlendirme yapıldığında işçi-kobot işbirliğinin ergonomik faydaları, işçi-kobot montaj görevlerinin planlanması, montaj hatlarında kobot kullanımı, işçinin yokluğunda ortaya çıkan kayıp maliyeti ve Maliyet Tabanlı Montaj Hattı (MTMH) olmak üzere farklı konuların değerlendirildiği gözlemlenmiştir. Tablo 1'de incelenmiş çalışmalara ait özet bilgiler mevcuttur.

Daha önce yapılan çalışmalarda görüldüğü gibi montaj hatlarında işçi ve kobot kullanımı, kobotların ergonomik faydaları ve maliyet tabanlı montaj hatları gibi konular işlenmiş olmakla beraber bu konuların hepsini kapsayan çalışma sayısı yetersizdir ve bu çalışmalar genellikle ergonomik kısıtları ele alırken ekonomik kısıtları ele almamıştır.

Bu bilgiler ışığında bu çalışmada işçiler ve kobotların beraber çalıştığı, ergonomik kısıtların bulunduğu ve maliyet tabanlı bir montaj hattı dengeleme problemi ele alınmıştır. Ele alınan problemin amacı çevrim başına düşen maliyeti en aza indirmektir. Çevrim maliyeti, işçi ve kobotun maliyeti ile istasyon açma maliyetini içermektedir. İşçiler için belirli bir enerji tüketiminin aşılması halinde o işçiye dinlenme payı verilmektedir ve bu olay modelin ergonomik kısıtını oluşturmaktadır. Bu durum kobotlar için geçerli değildir. Problemin çözümü için iki adımlı çözüm metodolojisi önerilmiştir. İlk adım, modelin parametrelerini hesaplar. İkinci adım ise model çözümüdür. Çalışma şu şekilde devam etmektedir. Bölüm 2'de problemin tanıtımı ve matematiksel formülasyonu sunulmaktadır. Bölüm 3'te problemin

Tablo 1. Kobotların ele alındığı çalışmaların özeti (Summary of studies on cobots)

Yazar(lar)	Metot	Problemin Konusu
Zaki vd., [9]	Dinamik yol haritası algoritması	İşçi-kobot montaj görevlerinin planlanması
Zhang vd., [10]	Entegre bir verimlilik ve ergonomik performans modeli	İşçi-kobot iş birliğinin ergonomik faydaları
Li, Janardhanan ve Tang, [11]	Karma Tamsayı Doğrusal Programlama (KTDP) ve çok amaçlı göçmen kuş optimizasyon algoritması	MTMH
Cohen ve Shoval, [12]	Öğrenme eğrisi	İşçinin yokluğunda ortaya çıkan kayıp maliyeti
Weckenborg, [13]	KTDP ve hibrit Genetik Algoritma	Montaj hatlarında kobot kullanımı
Dalle Mura ve Dini, [14]	Genetik Algoritma	Montaj hatlarında kobot kullanımı
Pearce vd., [15]	KTDP	İşçi-kobot montaj görevlerinin planlanması ve işçi-kobot iş birliğinin ergonomik faydaları
Menges, Sarrey, ve Henaff, [16]	Ampirik metodoloji	İşçi-kobot iş birliğinin ergonomik faydaları,
Michalos vd., [17]	Çok kriterli metotlar	İşçi-kobot montaj görevlerinin planlanması

çözümü için önerilen iki adımlı metodolojisi açıklanmıştır. Bölüm 4’de modelin çözümü ve senaryo analizlerinin sonucu karşılaştırılmıştır. Son bölümde ise çalışmanın sonucu ve katkılarında bahsedilip, gelecek çalışmalarda ele alınacak konulardan söz edilmektedir.

2. İşbirlikçi Ortamda İşçi-Kobot Atama Problemi (Worker-Cobot Assignment Problem in A Collaborative Environment)

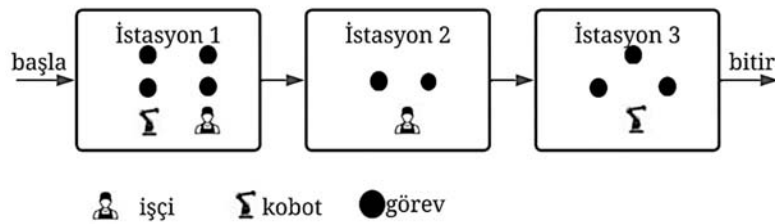
İşçiler ve kobotlar aynı çalışma alanında ve aynı ürün üzerinde çalışabilirler. Bu bölüm işbirlikçi ortamda montaj hatlarındaki iş istasyonlarındaki problemin tanımını ve problemin formülasyonunu sunmaktadır.

2.1. Problem Tanımı (Problem Description)

Üretim görevlerini insanlara ve kobotlara etkin bir şekilde tahsis ederek bu görev dağılımlarını verimli bir şekilde barındırabilecek detaylı alternatif hücre yerleşimlerinin oluşturulması ve incelenmesi, işçi-kobot görev paylaşımı uygulamalarının sistematik olarak tasarlanıp uygulanmasının sağlanması gerekmektedir [17]. İşbirlikçi robotların ortaya çıkış amacı, robotların işçilerle beraber aynı istasyonda bulunmasının sakıncalı olması ve robotların kullanımının oldukça pahalı olmasıdır. Burada daha ucuz bir üretim elde edip işçileri desteklemesi adına yarı otomatik sistem olan kobotlar ortaya çıkmıştır. Kobotlar, robotlardan daha güvenilir ve ucuz olması dolayısıyla işçileri destekler ve aynı istasyonda beraber çalışabilirler. Geçmişte yapılan çalışmalar incelenmiş ve kobotlarla işçilerin aynı istasyona atanması durumu, bazı çalışmalar da paralel istasyon olarak değerlendirilmediği görülmüştür [11]. Şekil 1, işçiler ve kobotların aynı montaj hattında işbirliği yaptığını göstermektedir.

Şekilde görüldüğü gibi işçi ve kobot farklı istasyonlara atanabildiği gibi aynı istasyona da atanabilmektedir. İşçi ve kobot aynı istasyona atandığında, kobota atanan görevler farklı, işçiye atanan görevlerden farklıdır [13]. Sistemin istasyonlarına bir dizi n adet $i \in I$ görevi tahsis edilmelidir. Farklı $r \in R$ adet süreç alternatifleri mevcuttur. Süreç alternatifinin bir işçi ($r \in I$) veya bir kobot ($r \in 2$) olduğu varsayılır. Problemden ele alınan her işçi ve kobot farklı türdedir. İşlerin işlem süreleri, süreç alternatifinin türüne bağlıdır [11], [18]. Her alternatif türü yalnızca bir kez atanabilir. Süreç alternatifinin türünü $w \in W$ kümesi ifade eder. İşlem süreleri t_{irw} (min olarak) her bir görev i , süreç alternatif r ’nin w türü için deterministik ve sabittir. s_i değişkeni, $(i,j) \in E$ öncelik ilişkisine sahip görevlerin (i görevi j görevinin öncülüdür) atandığı istasyonda i görevin başlangıç zamanını belirtmek için tanımlanır. İstasyonlara atanan görevlerin toplam süresi, döngü süresini c (dakika olarak) aşmamalıdır. x_{ikrw} bize i görevinin k istasyonuna, r süreç alternatifine ve w türüne atanıp atanmadığını söyler. y_{krw} , r süreç alternatifinin w türünün k istasyonuna atanıp atanmadığını gösterir. k istasyonuna atanan i görevi j görevinden önce gelirse Z_{kij} değer alır. Problemin varsayımları şunlardır:

- Hatta tek tip ürün montajı yapılır; tek model MHDP’dir.
- Deterministik ve bilinen işlem sürelerine sahip görevler vardır.
- Görevlerin öncelik diyagramı bilinmektedir.
- İşlerin işlem süreleri, süreç alternatifinin türüne bağlıdır.



Şekil 1. Montaj hattındaki işçiler-kobotlar (Workers-cobots in the assembly line)

- Döngü süresi bilinmektedir; tip 1- MHDP’dir.
- Bu çalışmada görevlerin bölünebilirliği kabul edilmemiştir.
- Malzemenin taşınması biraz zaman almaktadır ancak bu çalışmada ihmal edilmiştir.
- Bir istasyona işçi ve kobot beraber atanabildiği gibi bir istasyona sadece bir kobot veya bir işçi de atanabilir. Eğer işçi ve kobot aynı istasyona atandıysa farklı görevleri gerçekleştirirler.
- Hat konfigürasyonu düzdür. Paralel istasyona izin verilmemektedir.

2.2. Ekonomik Perspektif (Economic Perspective)

Montaj hatlarında ekonomik perspektifi maliyet açısından ele alan birçok çalışma bulunmaktadır [19]. Bu bakış açısıyla, bu çalışmada amaç birim ürün başına oluşan maliyeti bir diğer deyişle çevrim başına düşen maliyeti en azlamaya çalışır. Bu problemde CK ve C_{rw} olmak üzere iki farklı maliyetten bahsedilmiştir.

- Dakika başına istasyon maliyeti CK , toplam sermaye maliyetidir (yani, bir istasyonu açmak için gerekli malzemelerin yatırım maliyetidir) [20].
- C_{rw} süreç alternatifinin w türünün maliyeti, işçi ve kobotlar olarak iki gruba ayrılır. İlk grup, işçilere ödenen dakika başına maliyeti ifade eder. Diğer grup, kobotun fiyatı, aksesuarları, kurulumu vb. maliyetleri kapsar.

2.3. Ergonomik Perspektif: İş İstasyonlarının Enerji Tüketimi (Ergonomic Perspective: Energy Consumption of Workstations)

İşçiler AL üzerinde çalışırken onları iş kazalarından veya meslek hastalıklarından korumak yani çalışma ortamını daha ergonomik hale getirmek gerekmektedir ki bu hem bugün hem de gelecekte çok daha popüler hale gelecektir [21]. Meslek hastalıklarının ortaya çıkmasının önemli nedenlerinden biri de enerji tüketiminin aşılmasıdır. Elbette aşırı yorgunluğa neden olan bu durum zamanla kaçınılmaz olarak meslek hastalığına dönüşecektir [22]. Bu çalışmada ergonominin çeşitli kavramları açıklanmış ve kullanılmıştır. Bu açıdan bakıldığında, bu çalışmada kullanılan ayrıntılı tanımlar;

- Enerji harcaması *energy expenditure* e_i , çalışanın görevi gerçekleştirmek için ihtiyaç duyduğu enerji miktarıdır.
- Ortalama iş oranı *mean work rate* (MWR), işçiler tarafından gerçekleştirilen görevlerin enerji harcamasının hesaba katılarak belirlendiği orandır (bu, finansal olmayan yalnızca fiziksel bir ölçüm birimidir).
- Dinlenme payları *relaxion allowance* (RA), işçinin kabul edilebilir çalışma düzeyinin *acceptable work level* (AWL) aşılmaması için dinlenme oranının *relaxation rate* (RR) da dikkate alındığı paydır [23].

Literatür gözden geçirildiğinde, çalışanların iş günü boyunca kabul edilebilir çalışma düzeyinin $AWL = 4,3 \text{ kcal/min}$, ayakta dinlenme oranının $RR = 1,86 \text{ kcal/min'ye}$ eşit olduğu bulunmuştur [24]. $MWR = \frac{e_i}{t_{irw}}$ olduğundan, buradaki e_i (in kcal) görev i ’nin tamamlanması için gereken enerji gereksinimidir. RA şu şekilde (Eş. 1) hesaplanmaktadır [25].

$$RA = \max \left\{ 0, \frac{\sum_i c_i / \sum_i t_{irw} \cdot AWL}{AWL - RR} \right\} \quad (1)$$

Daha önce yapılan çalışmalarda her iş için dinlenme payı model öncesinde hesaplanmış ve işlerin işlem sürelerine eklenmiştir [26]. Bu çalışmada ise işçilerin dinlenme payı bilinmemekte, model içerisine kısıt olarak eklenip modelin sonucunda bulgu olarak elde edilmektedir. İşçilerin dinlenme payı, işçiye atanan toplam işin işlem süresi ve enerji gereksinimleri ile ilgilidir. RA da değerlendirildiği zaman, bir w türündeki işçi r için görevleri tamamlama süresi Eş. 2 olarak hesaplanır.

$$\sum_i x_{ikrw} \cdot t_{irw} \cdot (1 + RA) \quad \forall k \in K, \forall r \in I, \forall w \in W \quad (2)$$

Bir işçiye atanan işlerin süresini daha basit bir Eş. 3 ile ifade edersek

$$\sum_i x_{ikrw} \cdot t_{irw} \cdot \left[1 + \max \left\{ 0, \frac{\sum_i x_{ikrw} \cdot c_i}{\sum_i x_{ikrw} \cdot t_{irw} - 4.3} / (4.3 - 1.86) \right\} \right] \quad \forall k \in K, \forall r \in I, \forall w \in W \quad (3)$$

Eş. 3 doğrusal olmadığı için Finco vd. [25], bu denklemi doğrusal hale getirmek için aşağıdaki kısıtlamaları Eş.4, Eş. 5, Eş. 6, Eş. 7, Eş. 8 ve Eş. 9 oluşturmuştur. Ayrıca boolean değişkeni B_{krw} denkleme eklenmiştir. Eş 1, Eş.2 ve Eş.3 kobotlar için geçerli değildir. İşçiye atanan işlerin toplam süresi (Eş. 4) ;

$$\sum_i x_{ikrw} \cdot t_{irw} + RA'_{krw} \quad \forall k \in K, \forall r \in I, \forall w \in W \quad (4)$$

Aşağıda önerilen kısıtlar Eş. 5, Eş. 6, Eş. 7, Eş. 8 ve Eş. 9 model çözüldükten sonra işçiler için gereken dinlenme süresini hesaplamaktadır. RA'_{krw} şu şekilde hesaplanmıştır;

$$\frac{1}{4.3 - 1.86} \cdot \sum_i x_{ikrw} \cdot c_i - \frac{4.3}{4.3 - 1.86} \cdot \sum_i x_{ikrw} \cdot t_{irw} \quad \forall k \in K, \forall r \in I, \forall w \in W \quad (5)$$

$$RA'_{krw} \geq RA_{krw} \quad \forall k \in K, \forall r \in I, \forall w \in W \quad (6)$$

$$RA'_{krw} \geq 0 \quad \forall k \in K, \forall r \in I, \forall w \in W \quad (7)$$

$$RA'_{krw} \leq RA_{krw} + M(1 - B_{krw}) \quad \forall k \in K, \forall r \in I, \forall w \in W \quad (8)$$

$$RA'_{krw} \leq M \cdot B_{krw} \quad \forall k \in K, \forall r \in I, \forall w \in W \quad (9)$$

2.2 Problemin Formülasyonu (Formulation of Problem)

Temel problem tanımının ardından KTDP kullanılarak problem detaylı bir şekilde formüle edilmiştir. Makalede problemin çözümü için Weckenborg ve Spengler'in [26] modeli baz alınmıştır. Bu çalışmada önerilen modelin farkı ise işçi ve kobotların heterojen hale getirilmesi ve ergonomik kısıtların modele eklenmesidir. Bu amaçla problem tanımı sırasında verilen ve problemin formülasyonu sırasında kullanılacak kümeler, parametreler ve değişkenler Tablo 2'de verilmiştir.

Amaç fonksiyonu:

$$\min z = c \cdot \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} \sum_{w \in W} y_{krw} \cdot C_{rw} + c \cdot \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} \sum_{w \in W} x_{nkpw} \cdot k \cdot CK \quad (10)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{k \in K} \sum_{r \in R} \sum_{w \in W} x_{ikrw} = 1 \quad \forall i \in I \quad (11)$$

$$s_i + \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} \sum_{w \in W} x_{ikrw} \cdot t_{irw} \leq c \quad \forall i \in I \quad (12)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ikrw} \cdot t_{irw} \leq c \quad \forall k \in K, \forall r \in R, \forall w \in W \quad (13)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{r \in R} \sum_{w \in W} x_{ikrw} \cdot k - \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} \sum_{w \in W} x_{jkrw} \cdot k \leq 0 \quad \forall (i,j) \in E \quad (14)$$

$$s_i + \sum_{r \in R} \sum_{w \in W} x_{ikrw} \cdot t_{irw} \leq s_j + M(1 - Z_{kij}) \quad \forall (i,j) \in I, \forall k \in K \quad (15)$$

$$s_j + \sum_{r \in R} \sum_{w \in W} x_{jkrw} \cdot t_{irw} \leq s_i + M(1 - Z_{kji}) \quad \forall (i,j) \in I, \forall k \in K \quad (16)$$

Tablo 2. Probleme ait kümeler, parametreler ve değişkenler (Sets, parameters and variables of the problem)

$i, j \in I$	İş kümesi $\{I, \dots, n\}$
$k \in K$	İstasyon kümesi $\{I, \dots, K\}$
$r \in R$	Süreç alternatifi kümesi $\{I, \dots, R\}$. Eğer $r=1$ ise işçi, eğer $r=2$ ise kobotu temsil eder
$w \in W$	Atanacak olan süreç alternatifi türünün kümesi $\{I, \dots, W\}$
$(i,j) \in E$	Direk öncelik ilişkisi kümesi $\{i,j\}$. i işinden hemen sonra j işi gelmektedir.
c	Çevrim süresi (min)
t_{irw}	i işinin r. süreç alternatifinin w. türündeki işlem süresi (min)
s_i	İlgili istasyonda i işinin başlama zamanı
C_{rw}	r. süreç alternatifinin w. türünün dakikalık maliyeti (EUR)
CK	Dakikalık istasyon maliyeti (EUR)
M	Büyük bir sayı
x_{ikrw}	İkili karar değişkeni. Eğer i işi istasyon k'da r. süreç alternatifinin w. türünde işlem görüyorsa 1 değerini alır. 0, diğer durumda.
y_{krw}	İkili karar değişkeni. Eğer istasyon k'ya r. süreç alternatifinin w. türü atandıysa 1 değerinin alır. 0, diğer durumda.
Z_{kij}	İkili karar değişkeni. Eğer i işi k. İstasyonda j işinden önce geliyorsa 1 değerini alır. 0, diğer durumda.

$$Z_{kij} + Z_{kji} \geq 1 - M(1 - x_{ikrw}) - M(1 - x_{jkrw}) \quad \forall (i,j) \in I, \forall k \in K, \forall r \in R, \forall w \in W, i \neq j \quad (17)$$

$$Z_{kij} \geq 1 - M(1 - \sum_{r \in R} \sum_{w \in W} x_{ikrw}) - M(1 - \sum_{r \in R} \sum_{w \in W} x_{jkrw}) \quad \forall (i,j) \in E, \forall k \in K \quad (18)$$

$$Z_{kij} \leq \frac{1}{2} (\sum_{r \in R} \sum_{w \in W} x_{ikrw} + \sum_{r \in R} \sum_{w \in W} x_{jkrw}) \quad \forall (i,j) \in I, \forall k \in K \quad (19)$$

$$x_{ikrw} \leq y_{krw} \quad \forall i \in I, \forall k \in K, \forall r \in R, \forall w \in W \quad (20)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ikrw} \leq M \cdot y_{krw} \quad \forall k \in K, \forall r \in R, \forall w \in W \quad (21)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ikrw} \geq y_{krw} \quad \forall k \in K, \forall r \in R, \forall w \in W \quad (22)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{w \in W} y_{krw} \leq 2 \quad \forall k \in K \quad (23)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{w \in W} y_{krw} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (24)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{w \in W} y_{krw} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (25)$$

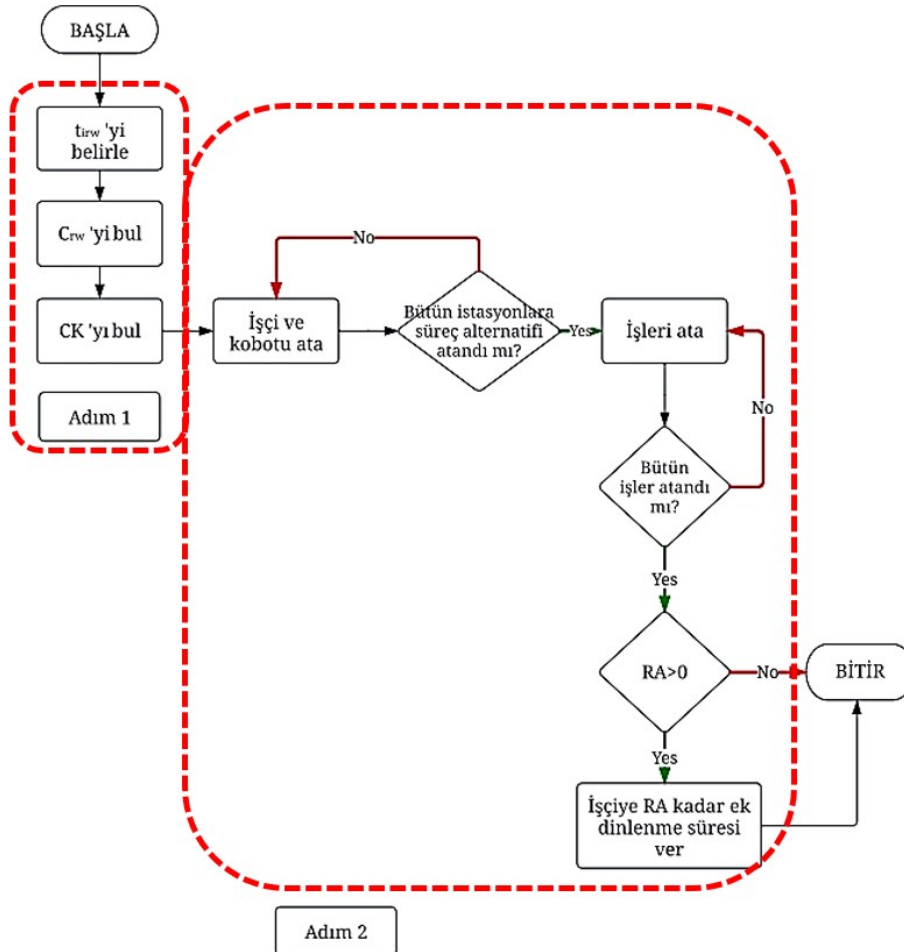
$$\sum_{k \in K} y_{krw} \leq 1 \quad \forall r \in R, \forall w \in W \quad (26)$$

$$x_{ikrw} \in \{0,1\}, y_{krw} \in \{0,1\}, Z_{kij} \in \{0,1\}, S_i \geq 0 \quad (27)$$

Amaç fonksiyonu (Eş. 10) çevrim başına oluşan maliyeti en küçükler. Eş. 11, her iş bir istasyona bir süreç alternatifine ve bir türe atanmasını sağlar. Eş. 12 ve Eş. 13, istasyona atanan işlerin toplam süresi çevrim zamanını geçmemesi koşuludur. Eş. 14, öncelik ilişkisi kısıtıdır. Eş. 15, Eş. 16 ve Eş. 17, aynı istasyona atanan işler için çizelgeleme pozisyonlarını oluşturur. Eş. 18 ve Eş. 19, aynı istasyonda aynı kaynağa ve aynı çeşide atanan işlerin öncelik ilişkisini sağlar. Eş. 19, Z_{kij} 'nin değerini bulmaya yöneliktir. Eş. 20, Eş. 21 ve Eş. 22, x_{ikrw} ve y_{krw} arasındaki ilişkiyi ifade eder. Eş. 23, her istasyona en fazla 2 süreç alternatifi türü atanmasını sağlar. Eş. 24, istasyona atanacak işçi sayısının en fazla 1 olması gerekmektedir. Eş. 25, istasyona atanacak kobot sayının en fazla 1 olması gerekmektedir. Eş. 26, her işçi ve kobot çeşidi bir istasyona 1 kez atanabileceğini belirtir. Eş. 27, karar değişkenlerinin alabileceği değerleri gösterir.

3. Önerilen İki Adımlı Çözüm Metodolojisi (Proposed Two-Step Solution Methodology)

Bu çalışma için sistematik bir yapı sağlamak amacıyla, döngü başına maliyeti düşürürken, farklı özellik ve maliyetlere sahip işçileri ve kobotları atayan ergonomik kısıtlar altında Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme ve İşçi-Kobot Atama Problemi (MTMHD-İKAP) çözümü oluşturmak için iki adımlı bir çözüm metodolojisi önerilmiştir. Bu metodoloji Şekil 2'de gösterilmektedir. Önerilen çözüm metodolojisinin ilk adımı, matematiksel modelin parametrelerini bulmak için ön hesaplamalardır. İkinci adım, KTDP modelinin çözümüdür.



Şekil 2. Ergonomik kısıtlar altında MTMHD-İKAP'nın çözüm yaklaşımı (The solution approach the cost-based line balancing and worker-cobot assignment problem (ALBWCAP) under ergonomic constraints)

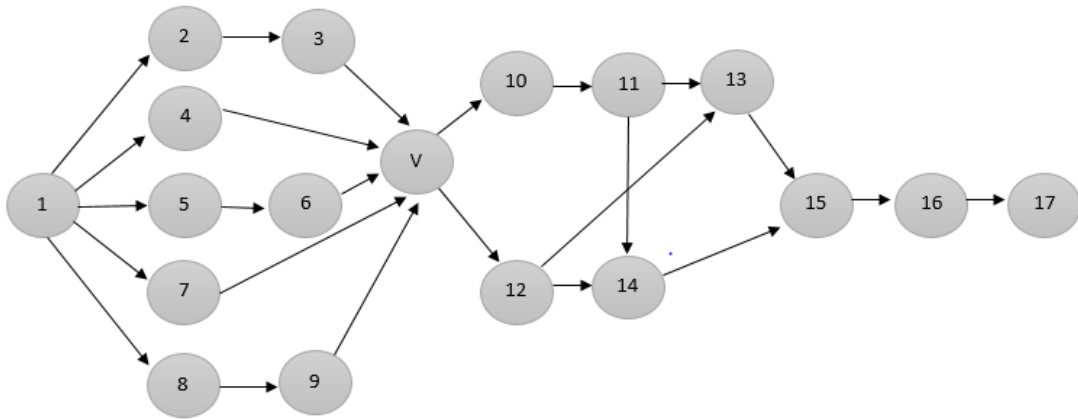
Önerilen iki adımlı çözüm metodolojisinin ilk adımı ön hesaplamalardır. İlk adımında üç farklı parametre hesaplanmıştır. İkinci adım ise, önerilen modelin çözümüdür. Model çözüldükten sonra işlerin hangi süreç alternatifine ve hangi istasyona atandığı, kaç adet istasyon açıldığı ve işçilerin dinlenme sürelerinin hesaplanmasıdır.

4. Vaka Analizleri (Case Analysis)

Bu bölümün ilk kısmında, söz konusu çözüme ulaşmada önerilen metodolojinin uygulanabilirliğini göstermek ve nicel kanıtlar elde etmek için yakın zamanda yapılmış bir çalışmadan bilinen bir örnek problem değiştirilmiş ve çözülmüştür. Bu bölümün ikinci kısmında, kobot kullanımının etkinliğini değerlendirmek için örnek problemin bazı özellikleri değiştirilip dört farklı senaryo analizi yapılmıştır.

4.1. Örnek Problem (Example Problem)

Önerilen çözüm yönteminin uygulanması için kullanılan örnek problemin verileri gerçek hayat problemini ele almış olan Battini vd. [24]'nin çalışmasından alınmıştır. Ardından bu verileri daha da ileri taşıyıp kobotları da ekleyen Weckenborg ve Spengler'in [26] de bu verileri kullandığı gözlemlenmiştir. Orijinal problem Almanya'dan gelen verileri içerdiğinden, hesaplamalarda Euro değerleri kullanılmıştır. Bu amaçla Şekil 3'te toplam 17 iş ögesinden oluşan bir öncelik diyagramı verilmiştir. çevrim süresini 3 dakika olarak bulmuştur. Hesaplama şirketin yılda 230 gün, bir günde sekiz saatlik vardiya ve toplam 552.000 dakika çalıştığı ve bu beş yıllık bir amortisman dönemine denk geldiği kabul edilmiştir. Analiz edilen ürün, ev ve bahçe uygulamaları için küçük bir yüksek basınçlı temizleyicidir. 1. görev yükleme ve kurulum ile ilgilidir. 2. ve 3. görev tekerleklerin montajı ile ilgilidir. 5. ve 6. görev basınç regülatörünün yerleştirilmesidir. 8 ve 9 görev kol sisteminin desteğe sabitlenmesinden oluşmaktadır. Alt desteğin diğer bileşenleri, görev 4 ve 7'de monte edilir. 10. ve 11. görev, pompa sisteminin montajı ile ilgiliyken 12. görev, güç sistemi ile ilgilidir. 13. ve 14. görev, pompanın ve güç sisteminin alt desteğe montajı ile ilgilidir. Son olarak, 15. ve 16. görev ön panel uygulamasıyla ilgiliyken, 17. görev hattın boşaltılmasıdır. Ayrıca her bir iş için gereken enerji tüketimi e_i değeri Tablo 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Örnek problemin görev öncelik diyagramı (Task priority diagram of the sample problem)

Tablo 3. Battini vd.'deki [24] iş için gereken enerji tüketimi (The amount of energy expenditure for each task in Battini et al. [24])

$\hat{I}_s(i)$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$e_i, kcal$	0,95	2,69	0,9	0,18	1,19	0,88	0,15	1,23	0,96
$\hat{I}_s(i)$	10	11	12	13	14	15	16	17	
$e_i, kcal$	4,56	5,07	1	1,08	1,17	0,92	0,5	0,63	

4.1.1. Problem için ön hesaplamalar (Preliminary calculations for the problem)

İlk adımında üç farklı parametre hesaplanmıştır. Her işçi ve kobot için görev tamamlama süreleri belirlenmiştir. Her işçi ve kobotun yeteneği ve işi tamamlama süresi farklı olduğundan dolayı işçi ve kobot türlerinin dakikalık maliyetleri hesaplanmıştır. Ardından istasyon açma maliyeti bulunmuştur.

Adım 1.1: t_{irw} 'yi belirle

Her işçi ve kobotun farklı yetenekleri ve maliyetleri vardır. Her görev ögesini farklı zamanlarda (t_{irw}) yapan işçiler ve kobotlar mevcuttur. Bu nedenle, işçi ve kobot görevi farklı zamanlarda tamamladıkları için dakika başına maliyet de farklıdır. Örnek problem için dört farklı işçi ve dört farklı kobot değerlendirilmiştir. İlk işçinin işlem süresi Battini vd. [27] tarafından önerilen işlem süresi olarak alınmıştır. Diğer üç işçinin işlem süreleri, ilk işçinin işlem süresinin uyarlamasıdır. Tablo 4'de işçi ve kobotların işlem süreleri verilmiştir. Kobotların süresi hesaplanırken, işçiden neredeyse iki ila üç kat gibi yavaş bir hızda çalıştığı görülmüştür [13].

Adım 1.2: C_{rw} 'yi bul

İşçi ve kobotların dakikalık maliyetini bulmak için, 2020'de yayınlanan Alman işgücü istatistikleri kullanılmıştır ve Almanya'da bir işçinin saatlik maliyeti 36,5 Euro olarak hesaplanmıştır [28]. Bu nedenle ilk işçinin dakikalık maliyeti 0,6 Euro'ya eşittir. Bir kobotun fiyat, aksesuar, kurulum vb. maliyetleri göz önüne alındığında, ilk kobotun maliyeti 100.000 Euro'ya eşittir [29]. İlk kobotun dakikalık maliyeti 0,19 Euro'ya tekabül etmektedir. Diğer türdeki işçi ve kobotların dakikalık maliyetleri, ilk işçi ve kobotun uyarlamasıdır. Tablo 5'de işçi ve kobotların maliyetini göstermektedir.

Adım 1.3: CK 'yi bul

İstasyonlara yapılan yatırımı tahmin etmek için veri elde etmek zordur. Yapılan yatırımın montaj süreçlerine de bağlı olmasından dolayı ekipman ve kurulum, malzeme akışı ve faiz maliyetlerini içeren istasyon başına maliyetin 135.000 Euro olduğunu varsayılmıştır. Ortaya çıkan amortisman, istasyon başına 0,24 EUR/min'dir.

4.1.2. Matematiksel modelin çözümü (Solution of the mathematical modeling)

Önerline model, Cplex (sürüm 12.7.1) kullanılarak çözülmüştür ve optimal değer elde edilmiştir. Hesaplamalar, Intel® Core™ i5-3230M CPU @ 2.60 GHz ve 8 GB RAM'e sahip standart bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Çevrim başına maliyet 7,251'dir. Modelin çözümü 7,33 dakika sürmüştür.

Adım 2: KTDP çözümü

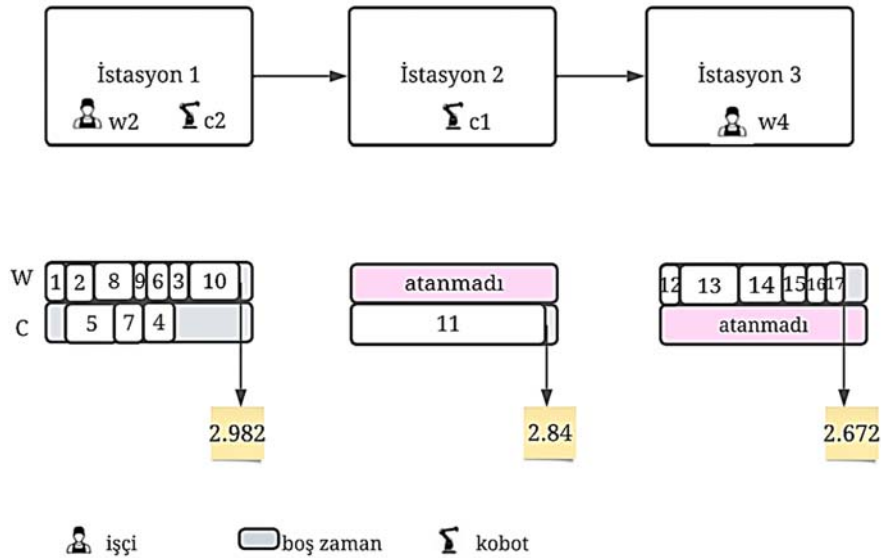
Bu problemin çözümü için önerilmiş olan KTDP modelinin çözümünün görselleştirilmiş hali Şekil 4'te verilmiştir. Atanan işleri ve işlerin sırasını, süreç alternatifleri ile süreç alternatiflerine atanan işleri ve en son kaç adet istasyon açıldığı açıkça görülmektedir. Şekil 4'te görüldüğü gibi 3 adet istasyon açılmıştır. 2. işçi ve 2. kobot 1. istasyonda görev almıştır. İstasyonun çevrim süresi 2,982 dakikadır.

Tablo 4. İşçi ve kobotların işlem süreleri (Processing times of workers and cobots)

İş (i)	İlk işçinin işlem süresi (t_{irw})	İkinci işçinin işlem süresi (t_{irw})	Üçüncü işçinin işlem süresi (t_{irw})	Dördüncü işçinin işlem süresi (t_{irw})	İlk kobotun işlem süresi (t_{irw})	İkinci kobotun işlem süresi (t_{irw})	Üçüncü kobotun işlem süresi (t_{irw})	Dördüncü kobotun işlem süresi (t_{irw})
1	0,4	0,24	0,4	0,2	0,80	0,41	0,767	0,9
2	0,767	0,38	0,49	0,85	1,16	1,5	1,03	1,44
3	0,217	0,2	0,221	0,108	0,402	0,446	0,387	0,436
4	0,117	0,1	0,21	0,008	0,23	0,24	0,217	0,34
5	0,417	0,4	0,43	0,258	0,85	0,929	0,841	0,926
6	0,25	0,23	0,25	0,11	0,47	0,6	0,52	0,91
7	0,083	0,08	0,087	0,072	0,104	0,189	0,155	0,212
8	0,663	0,612	0,70	0,39	1,68	1,166	1,06	1
9	0,183	0,129	0,188	0,152	0,310	0,438	0,322	0,482
10	1,333	1,191	1,341	1,028	2,66	2,62	2,59	2,852
11	1,417	1,502	1,65	1,41	2,84	3	4	2,82
12	0,417	0,20	0,48	0,112	0,82	0,861	1,073	1,28
13	1	1,55	1,04	1,381	2	4	2,08	1,9
14	1,17	1,083	1,1	0,627	2,02	2	2,02	2,21
15	0,75	0,52	0,78	0,313	1,5	1,56	1,68	1,5
16	0,417	0,39	0,485	0,181	0,81	0,85	0,718	0,882
17	0,267	0,20	0,288	0,058	0,702	0,852	0,72	0,728

Tablo 5. İşçi ve kobotların dakikalık maliyetleri (Minute costs of workers and cobots)

Süreç alternatifi (r)	Birinci tip süreç alternatifi (w)	İkinci tip süreç alternatifi (w)	Üçüncü tip süreç alternatifi (w)	Dördüncü tip süreç alternatifi (w)
İşçilerin dakikalık maliyetleri (C_{rw})	0,6	0,775	0,652	0,552
Kobotların dakikalık maliyetleri (C_{rw})	0,19	0,18	0,30	0,395



Şekil 4. Ergonomik kısıtlar altında MTMHD-İKAP çözümü (Solution of cost based ALBWCAP under ergonomic constraints)

2. işçiye ise sırasıyla 1, 2, 8, 9, 6, 3 ve 10. işler atanmıştır. 2. kobota ise sırasıyla 5, 7 ve 4. işler atanmıştır. 1. kobot 2. istasyonda görev almış fakat bir işçi görev almamıştır. İstasyonun çevrim süresi 2,84 dakikadır. 1. kobota 11. iş atanmıştır. 4. işçi 3. istasyonda görev almış fakat bir kobot görev almamıştır. İstasyonun çevrim süresi 2,672 dakikadır. 4. işçiye sırasıyla 12, 13, 14, 15, 16 ve 17. işler atanmıştır.

4.2. Senaryo Analizi (Scenario Analysis)

Kobotların montaj hatlarındaki etkinliğini değerlendirmek için toplam dört farklı senaryo analizi yapılmıştır: manuel MTMH, ergonomik kısıtların göz ardı edildiği MTMHD-İKAP, parametrelerdeki değişimin amaç fonksiyonu üzerindeki etkisini araştıran ergonomik kısıtların göz ardı edildiği MTMHD-İKAP ve enerji harcamalarındaki değişimin ele alındığı ergonomik kısıtlar altında MTMHD-İKAP.

Senaryo 1:

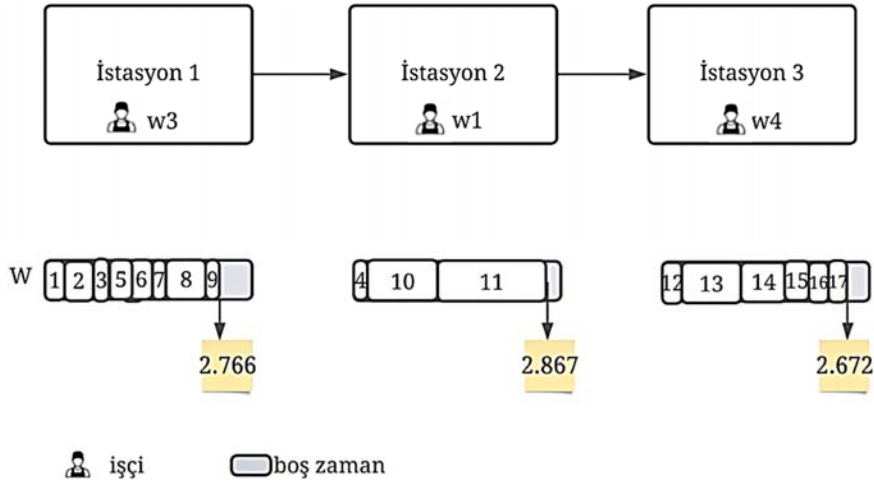
Senaryo 1, manuel MTMH problemidir. Çevrim başına maliyet 7,572 Euro olarak bulunmuştur ve çözüm 0,05 dakika sürmüştür. Senaryo 1'in çözümü Şekil 5'te gösterilmiştir.

Şekil 5'te görüldüğü gibi 3 adet istasyon açılmıştır. 3. işçi 1. istasyonda görev almıştır. İstasyonun çevrim süresi 2,766 dakikadır. 3. işçiye ise sırasıyla 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8 ve 9. işler atanmıştır. 1. işçi 2. istasyonda görev almıştır. İstasyonun çevrim süresi 2,867 dakikadır. 1. işçiye ise sırasıyla 4, 10 ve 11. işler atanmıştır. 4. işçi 3. istasyonda görev almıştır. İstasyonun çevrim süresi 2,672 dakikadır. 4. işçiye ise sırasıyla 12, 13, 14, 15, 16 ve 17. işler atanmıştır.

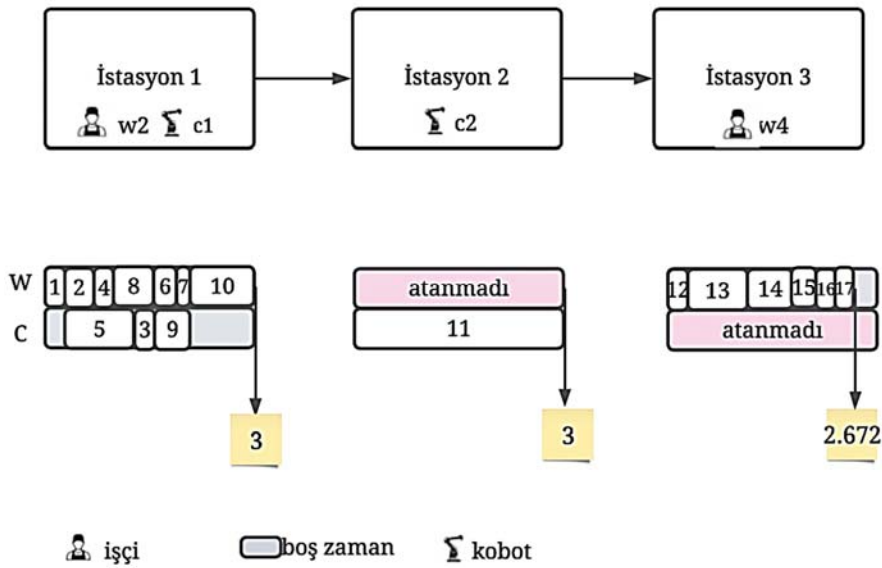
Senaryo 2:

Senaryo 2, ergonomi perspektifinin göz ardı edildiği MTMHD-İKAP'dır. İşçiler için bölüm 2.1'de önerilen [5-9] ergonomik denklemleri modele çıkardığımızda sonuç yine 7,251'dir ve çözüm 7,01 dakika sürmüştür. Senaryo 2'nin çözümü Şekil 6'da gösterilmiştir.

Şekil 6'da görüldüğü gibi 3 adet istasyon açılmıştır. 2. işçi ve 1. kobot 1. istasyonda görev almıştır. İstasyonun çevrim süresi 3 dakikadır. 2. işçiye ise sırasıyla 1, 2, 4, 8, 6, 7 ve 10. işler atanmıştır. 1. kobota ise sırasıyla 5, 3 ve 9. işler atanmıştır. 2. kobot 2. istasyonda görev almış fakat bir işçi görev almamıştır. İstasyonun çevrim süresi 3 dakikadır.



Şekil 5. Manuel MTMH'nin çözümü (Solution of cost-based assembly line only with the manual workforce)



Şekil 6. Ergonomik kısıtların göz ardı edildiği MTMHD-İKAP'nin çözümü (Solution of cost-based ALBWCAP that ignores ergonomic constraints)

2. kobota 11. iş atanmıştır. 4. işçi 3. istasyonda görev almış fakat bir kobot görev almamıştır. İstasyonun çevrim süresi 2,672 dakikadır. 4. işçiye sırasıyla 12, 13, 14, 15, 16 ve 17. işler atanmıştır.

Senaryo 3:

Senaryo 3, ergonomi perspektifinin göz ardı edildiği, parametrelerdeki değişimin amaç fonksiyonu üzerindeki etkisini araştıran MT-MHDİKAP'dir. Bu çalışmada, ikinci senaryo analizi kapsamında bazı parametrelerin değişiminin amaç fonksiyonu üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Parametreler işçi maliyeti, kobot hızı ve istasyon maliyetidir. Tablo 6'da hangi parametrelerin değiştiği, ne kadar değiştiği ve bu değişikliğin amaç fonksiyonuna ve süreç alternatifi türü kullanımına yansımaları gösterilmektedir. W onun bir işçi olduğunu, C ise bir kobot olduğunu belirtir.

Örnek problemdeki işçilerin dakikalık maliyetleri yarıya indiğinde toplam çevrim maliyeti 2,385 Euro azalmaktadır. Toplam üç istasyon açılmıştır. 3. işçi ilk istasyona, 1. işçi 2. istasyona, 4. işçi ise 3. istasyona atanmıştır. Örnek problemdeki kobotların tamamlanma süreleri yarıya indiğinde toplam çevrim maliyeti 2,325 Euro azalmaktadır. Toplam üç istasyon açılmıştır. 1. kobot 1. istasyona, 2. kobot 2. istasyona, 4. işçi ise 3. istasyona atanmıştır. Örnek problemde istasyon açma maliyeti yarıya indiğinde toplam çevrim maliyeti 1,245 Euro azalmaktadır. Toplam dört istasyon açılmıştır. 1. kobot 1. istasyona, 2. kobot 2. istasyona, 1. işçi 3. istasyona, 4. işçi ise 4. istasyona atanmıştır.

Örnek problemdeki işçilerin dakika maliyetleri iki katına çıkarıldığında toplam çevrim maliyeti 2,856 Euro artmaktadır. Toplam beş istasyon açılmıştır. 3. kobot 1. İstasyona, 1. kobot 2.

istasyona, 4. kobot 3. istasyona, 2. kobot 4. istasyona, 4. işçi ise 5. istasyona atanmıştır. Örnek problemdeki kobotların tamamlanma süreleri iki katına çıkarıldığında toplam çevrim maliyeti 0,321 Euro artmaktadır. Toplam üç istasyon açılmıştır. 3. işçi 1. istasyona, 1. işçi 2. istasyona, 4. işçi ise 3. istasyona atanmıştır. Örnek problemde istasyon açma maliyeti iki katına çıkarıldığında toplam çevrim maliyeti 2,16 Euro artmaktadır. Toplam üç istasyon açılmıştır. 2. işçi ve 2. kobot 1. istasyona, 1. kobot 2. istasyona, 4. işçi ise 3. istasyona atanmıştır.

Senaryo 4:

Senaryo 4, ergonomi perspektifinin -enerji harcamalarındaki değişimin- ele alındığı, ergonomik kısıtlar altında MTMHD-İKAP'dir. Ergonomik kısıtlama için açıklayıcı örneğin çözülmesi sonucunda, işçi dinlenmesinin eklendiği montaj hatlarının maliyetinin arttığı bulunmuştur. Bu çalışmada, enerji harcama parametresindeki değişimin amaç fonksiyonu üzerindeki etkisi deneysel tasarım kapsamında detaylı olarak incelenmiştir. Tablo 7, enerji harcama parametresinin ne kadar değiştiğini ve bu değişikliğin amaç fonksiyonuna yansımalarını göstermektedir. Ayrıca atanan işçilere ne kadar dinlenme süresinin verildiği de görülmektedir. W harfi işçiyi temsil eder.

Yukarıdaki tabloda da görüldüğü gibi örnek problemde ele alınan işlerin enerji tüketim miktarı sırasıyla 0,75, 1, 1,25, 1,5 ve 2 değerleriyle çarpılmıştır. Enerji tüketim faktörünün değişmesi işçilerin dinlenme süresini etkilemektedir. Enerji tüketim faktörü 0,75 ile çarpıldığı zaman 1. istasyona 2. işçi, 3. istasyona 4. işçi atanmıştır. Her iki işçinin de dinlenme süresi bulunmamaktadır ve amaç fonksiyonu 7,251 Euro/çevrim'dir. Enerji tüketim faktörü 1 ile çarpıldığı zaman 1. İstasyona 2. işçi, 3. istasyona 4. işçi atanmıştır.

Tablo 6. Parametre değişikliğinin amaç fonksiyonu üzerindeki etkisi (The effect of the change of parameters on the objective function)

Özellikler				
Parametre	İşçilerin dakikalık maliyetleri (Euro/min)		Örnek problemin maliyeti (*2)	
Seviyeleri	Örnek problemin maliyeti (*1/2)		Örnek problemin maliyeti (*2)	
Sonaçlar	Kullanılan Süreç	Amaç Fonksiyonu	Kullanılan Süreç	Amaç Fonksiyonu
	Alternatifi Türü	(Euro/çevrim)	Alternatifi Türü	(Euro/çevrim)
	W1, W3, W4	4,866	W4, C1, C2, C3, C4	10,107
Parametre	Kobotların hızları (min)		Örnek problemin hızı (*2)	
Seviyeleri	Örnek problemin hızı (*1/2)		Örnek problemin hızı (*2)	
Sonaçlar	Kullanılan Süreç	Amaç Fonksiyonu	Kullanılan Süreç	Amaç Fonksiyonu
	Alternatifi Türü	(Euro/çevrim)	Alternatifi Türü	(Euro/çevrim)
	W4, C1, C2	4,926	W1, W3, W4	7,572
Parametre	İstasyon maliyeti (Euro/min)			
Seviyeleri	Örnek problemin maliyeti (*1/2)		Örnek problemin maliyeti (*2)	
Sonaçlar	Kullanılan Süreç	Amaç Fonksiyonu	Kullanılan Süreç	Amaç Fonksiyonu
	Alternatifi Türü	(Euro/çevrim)	Alternatifi Türü	(Euro/çevrim)
	W1, W4, C1, C2	6,006	W2, W4, C1, C2	9,411

Tablo 7. Enerji harcamasındaki değişimin etkisi (The effect of the change of energy expenditure)

Özellikler	Enerji tüketimi (kCal)				
	$e_i \cdot 0,75$	$e_i \cdot 1$	$e_i \cdot 1,25$	$e_i \cdot 1,5$	$e_i \cdot 2$
İşçilerin atandığı istasyonlar	İstasyon 1 - (W2), İstasyon 3 (W4)	İstasyon 1 (W2), İstasyon 3 (W4)	İstasyon 1 (W2), İstasyon 3 (W4)	İstasyon 1 (W1), İstasyon 4 (W4)	İstasyon 1 (W1), İstasyon 4 (W4)
	İşçinin toplam RA' değeri (min)	$RA'(W2)=0, RA'(W4)=0$	$RA'(W2)=0, RA'(W4)=0$	$RA'(W2)=0, RA'(W4)=0$	$RA'(W1)=0, RA'(W4)=0$
Amaç fonksiyonu (Euro/çevrim)	7,251	7,251	7,251	7,446	8,346

Her iki işçinin de dinlenme süresi bulunmamaktadır ve amaç fonksiyonu 7,251 Euro/çevrim'dir. Enerji tüketim faktörü 1,25 ile çarpıldığı zaman 1. istasyona 2. işçi, 3. istasyona 4. işçi atanmıştır. Her iki işçinin de dinlenme süresi bulunmamaktadır ve amaç fonksiyonu 7,251 Euro/çevrim'dir. Enerji tüketim faktörü 1,5 ile çarpıldığı zaman 1. istasyona 1. işçi, 4. istasyona 4. işçi atanmıştır. Her iki işçinin de dinlenme süresi bulunmamaktadır ve amaç fonksiyonu 7,446 Euro/çevrim'dir. Enerji tüketim faktörü 2 ile çarpıldığı zaman 1. İstasyona 1. işçi, 4. İstasyona 4. işçi atanmıştır. 1. işçinin dinlenme süresi 0,775 dakika olup diğer işçinin dinlenme süresi bulunmamaktadır ve amaç fonksiyonu 8,346 Euro/çevrim'dir.

5. Sonuçlar (Conclusions)

Kobotların işçilerin desteğiyle birlikte sektörel anlamda otomasyonun gelişmesine çok faydası olmuştur. Bu entegrasyonun birçok amacı vardır. İşçilerle birlikte çalışan kobotlar, montaj hattına birçok fayda sağlar. Tekrarlayan işler yaparak işçileri monotonluktan kurtarmak, ağır işler yaparak ergonomik fayda sağlamak ve ucuz işçilik açısından pek çok faydası vardır ve bu örnekler artırılabilir.

Bu çalışmada ilk olarak problem tanımlanmış ve problemin çözümü adına iki adımlı çözüm metodu önerilmiştir. İlk adımda matematiksel modelin parametrelerini bulmak için ön hesaplamalar gerektiren, ikinci adımda ise matematiksel modellemeyen istenilen çözüm aşamalarından oluşan bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Bu matematiksel modelin etkinliğini anlamak için farklı senaryolar ile çözüm karşılaştırılmıştır.

İlk senaryoda ergonomik kısıtlar altında MTMHD-İKAP ile manuel MTMH karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucu manuel hat modelinin çok hızlı çözümü olsa da, önerilen model çevrim başına %4,3 oranında manuel hattan daha az maliyete sahip olduğu görülmüştür. İkinci senaryoda ise; modelin ergonomik kısıtları göz ardı edilmiştir ve sonucun aynı olduğu fakat modelin %4,4 oranında daha hızlı çalıştığı gözlemlenmiştir. Üçüncü senaryo ikinci senaryonun performans analizi niteliğindedir. İşçi maliyeti, kobot hızı ve istasyon maliyeti parametrelerinin değişmesinin amaç fonksiyonu üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Parametrelerin değerleri yarıya indirildiği zaman amaç fonksiyonunun azaldığı, parametrelerin değerleri iki katına çıkarıldığı zaman amaç fonksiyonunun arttığı gözlemlenmiştir. Dördüncü senaryo ise, önerilen modelin performans analizi niteliğindedir. İşlerin enerji tüketim parametresinin farklı değerleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma yapılırken işlerin enerji tüketim değişiminin işçilerin atandığı istasyon, işlerin toplam dinlenme süresi ve amaç fonksiyonu değerlerine etkisinin ne olduğu incelenmiştir. İşlerin enerji tüketimi arttığı zaman işçilerin atandığı istasyonların değiştiği, işçilere dinlenme süresinin verildiği ve amaç fonksiyonunun arttığı görülmüştür.

Sonuç olarak, ergonomik faktörleri ciddiye almak maliyeti artırır da güvenli bir çalışma ortamına sahip olmak daha verimli ve risksizdir. Çalışanların harcadığı enerji miktarıyla orantılı olarak mola vermek, çalışanın kas-iskelet sistemini korumaktadır. İşveren için maliyetli olsa da ergonomik değerlendirmeler günümüzde insani değer açısından oldukça önemlidir. Ayrıca son zamanlarda işçilerin ergonomik koşullarının iyileştirilmesi ve kobotlar Endüstri 5.0 zirvesinin de önem verdiği bir konudur [30].

Bu çalışmada ele alınan konunun literatürde henüz yeni olması ve yapılan çalışmaların azlığından dolayı çalışma gelişime oldukça açıktır. Örneğin çalışmada ele alınan problem tip-1 problemi iken ileride yapılacak çalışmada tip-2 problemi olabilir. Ayrıca, farklı hat konfigürasyonları örneğin U tipi veya iki taraflı MHDP dikkate alınabilir. Gerçek hayatta daha çok işlenen karışık modellenmiş MHDP çözülebilir. Orta ve büyük boyutlu bazı veriler için önerilen model

optimal sonucu vermeyeceğinden problemin boyutu artırılarak uygun bir sezgisel veya meta sezgisel yaklaşım önerilebilir. Son olarak, modelin ergonomik boyutu için farklı kriterler dikkate alınabilir.

Kaynaklar (References)

1. Djuric A.M., Urbanic R., Rickli J., A framework for collaborative robot (CoBot) integration in advanced manufacturing systems, SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 9 (2), 457-464, 2016.
2. Proente, Kolaboratif robot nedir?, <https://proente.com/kolaboratif-robot-nedir/>, 28 June 2022.
3. Kiraz A., Canpolat O., Özkurt C., Taşkın H., Esra S., Examination of the criteria affecting Industry 4.0 with structural equation model and a pilot study, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (4), 2183-2196, 2020.
4. Maddikunta P.K.R., Pham Q.-V., Prabadevi B., Deepa N., Dev K., Gadekallu T.R., Ruby R., Liyanage M., Industry 5.0: A survey on enabling technologies and potential applications, Journal of Industrial Information Integration, 26, 100257, 2022.
5. Boysen N., Flidner M., Scholl A., A classification of assembly line balancing problems, European Journal Of Operational Research, 183 (2), 674-693, 2007.
6. Boysen N., Flidner M., Scholl A., Assembly line balancing: which model to use when?, International Journal Of Production Economics, 111 (2), 509-528, 2008.
7. Sivasankaran P., Shahabudeen P., Literature review of assembly line balancing problems, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 73 (9), 1665-1694, 2014.
8. Kumar N., Assembly line balancing: a review of developments and trends in approach to industrial application, Global Journals of Research in Engineering, 13 (G2), 29-50, 2013.
9. Zaki A.M.A., Fathy A.M.M., Carnevale M., Giberti H., Application of realtime robotics platform to execute unstructured industrial tasks involving industrial robots, cobots, and human operators, Procedia Computer Science, 200, 1359-1367, 2022.
10. Zhang Y.-J., Liu L., Huang N., Radwin R., Li J., From manual operation to collaborative robot assembly: an integrated model of productivity and ergonomic performance, IEEE Robotics and Automation Letters, 6 (2), 895-902, 2021.
11. Li Z., Janardhanan M.N., Tang Q., Multi-objective migrating bird optimization algorithm for cost-oriented assembly line balancing problem with collaborative robots, Neural Computing and Applications, 33 (14), 8575-8596, 2021.
12. Cohen Y., Shoval S., A new cobot deployment strategy in manual assembly stations: countering the impact of absenteeism, IFAC-PapersOnLine, 53 (2), 10275-10278, 2020.
13. Weckenborg C., Kieckhäfer K., Müller C., Grunewald M., Spengler T.S., Balancing of assembly lines with collaborative robots, Business Research, 13 (1), 93-132, 2020.
14. Dalle Mura M., Dini G., Designing assembly lines with humans and collaborative robots: a genetic approach, CIRP Annals, 68 (1), 1-4, 2019.
15. Pearce M., Mutlu B., Shah J., Radwin R., Optimizing makespan and ergonomics in integrating collaborative robots into manufacturing processes, IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 15 (4), 1772-1784, 2018.
16. Menges B., Sarrey M., Henaff P., Integration of a collaborative robot in a hard steel industrial environment, 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 634-637, August, 2018.
17. Michalos G., Spiliotopoulos J., Makris S., Chryssolouris G., A method for planning human robot shared tasks, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 22, 76-90, 2018.
18. Yılmaz H., Assembly line worker assignment and balancing problem by considering labor cost, Journal of Innovative Science and Engineering, 6 (1), 22-31, 2022.
19. Foroughi A., Gökçen H., Cost oriented stochastic assembly line balancing problem, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 29 (3), 469-476, 2014.
20. Amen M., Cost-oriented assembly line balancing: Model formulations, solution difficulty, upper and lower bounds, European Journal of Operational Research, 168 (3), 747-770, 2006.
21. Otto A., Scholl A., Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing, European Journal of Operational Research, 212 (2), 277-286, 2011.

22. Aksüt G., Alakaş H., Eren T., Karacam H., Model proposal for physically ergonomic risky personnel scheduling problem: An application in textile industry for female employees, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (1), 245-256, 2022.
23. Price A., Calculating relaxation allowances for construction operatives—Part 2: Local muscle fatigue, *Applied Ergonomics*, 21 (4), 318-324, 1990.
24. Battini D., Calzavara M., Otto A., Sgarbossa F., Preventing ergonomic risks with integrated planning on assembly line balancing and parts feeding, *International Journal of Production Research*, 55 (24), 7452-7472, 2017.
25. Finco S., Battini D., Delorme X., Persona A., Sgarbossa F., Workers' rest allowance and smoothing of the workload in assembly lines, *International Journal of Production Research*, 58 (4), 1255-1270, 2020.
26. Weckenborg C., Spengler T.S., Assembly line balancing with collaborative robots under consideration of ergonomics: a cost-oriented approach, *IFAC-PapersOnLine*, 52 (13), 1860-1865, 2019.
27. Battini D., Delorme X., Dolgui A., Persona A., Sgarbossa F., Ergonomics in assembly line balancing based on energy expenditure: a multi-objective model, *International Journal of Production Research*, 54 (3), 824-845, 2016.
28. Eurostat, Estimated hourly labour costs, [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Estimated hourly labour costs, 2020 \(EUR\) F2 Final.png](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Estimated_hourly_labour_costs,_2020_(EUR)_F2_Final.png) - Statistics Explained (europa.eu), 27 February 2022.
29. Bélanger-Barrette M., What is an average price for a collaborative robot?, <https://blog.robotiq.com/what-is-the-price-of-collaborative-robots>, 13 January 2022.
30. Coronado E., Kiyokawa T., Ricardez G.A.G., Ramirez-Alpizar I.G., Venture G., Yamanobe N., Evaluating quality in human-robot interaction: A systematic search and classification of performance and human-centered factors, measures and metrics towards an industry 5.0, *Journal of Manufacturing Systems*, 63, 392-410, 2022.