

## MONTAJ HATLARINDA YENİDEN İŞLEME İSTASYON POZİSYONUNUN OPTİMİZASYONU İÇİN BİR KARIŞIK- TAMSAYILI PROGRAMLAMA MODELİ

*Fatih ÇAVDUR* \*  
*Elif KAYMAZ* \*  
*Ash SEBATLI* \*

Alınma: 30.04.2018; düzeltme: 01.07.2018; kabul: 03.12.2018

**Öz:** Montaj hatlarında, ürünün önceden belirlenen birtakım özelliklere uygun olmaması (hatalı olması) durumunda, ürün, hata giderme çalışmalarının gerçekleştirilmesi için yeniden işleme istasyonuna gönderilmektedir. Yeniden işleme istasyonuna gönderilen hatalı ürün sayısı ise montaj hattının hata oranına bağlıdır. Yeniden işleme istasyonunun kullanım oranının düşük olması durumunda, bu istasyon hata giderme işlemlerine ek olarak standart görevlerin gerçekleştirilmesi için de kullanılabilir. Yeniden işleme istasyonunun bu amaçla kullanılması ile hattın çevrim süresi azaltılabilir. Yeniden işleme istasyonu genellikle montaj hattının sonunda konumlandırılmakla birlikte, standart görevlerin gerçekleştirilmesi için de kullanılması durumunda pozisyonunun değiştirilmesi avantajlı olabilir. Bu çalışmada, hata giderme işlemlerine ek olarak standart görevlerin gerçekleştirilmesi için de kullanılan bir yeniden işleme istasyonunun dinamik olarak pozisyonunun belirlenmesi ile çevrim süresini minimize eden bir doğrusal olmayan-karışık-tamsayılı programlama modeli önerilmektedir. Önerilen modelin doğrusal olmayan yapısı değişken dönüşümleri ile doğrusal hale dönüştürülmüştür. Yeniden işleme istasyon pozisyonunun seçimi, görevler arasındaki öncelik ilişkilerine bağlı olarak bu istasyona atanabilecek olan potansiyel görev sayısını etkilemektedir. Bu çalışmada, önerilen model kullanarak yeniden işleme istasyon pozisyonu optimize edilmektedir. Yeniden işleme istasyonuna atanabilecek olan potansiyel görev sayısını etkileyen diğer bir faktör de montaj hattı hata oranıdır. Çalışma kapsamında önerilen model literatürde yer alan farklı örneklemeler kullanılarak test edilmiştir. Problemlerin optimal çözümleri elde edilerek, sonuçlar analiz edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Montaj hattı dengeleme, Yeniden işleme istasyonu, İstasyon pozisyonu belirlenmesi, Çevrim süresi minimizasyonu, Karışık-tamsayılı programlama

### **A Mixed-Integer Programming Model for Optimizing Rework Station Position in Assembly Line Balancing**

**Abstract:** In an assembly line, if a product does not meet some pre-defined specifications (i.e., if it is defective), it is generally sent to a rework station where necessary correction (rework) operations are performed. On the other hand, the number of products sent to the rework station for rework operations depends on the rework (defect) rate of the assembly line. If the defect rate is relatively low, the rework station can be used to perform standard tasks in addition to rework operations. Using the rework station for this purpose might decrease the cycle time of the assembly line. Although rework stations are generally positioned at the end of an assembly line, it might be advantageous to change its position if it is also used for performing standard tasks. In this study, a nonlinear-mixed-integer programming model is proposed to minimize the cycle time of an assembly line by dynamically positioning the rework station which is also used to perform standard tasks in addition to rework operations. The nonlinear structure of

\* Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Görükle, Nilüfer, 16059 Bursa  
İletişim Yazarı: Elif KAYMAZ (eliifkaymaz@gmail.com)

the proposed model is linearized using some variable transformations. The position of the rework station affects the number of potential tasks assigned to this station depending on the precedence relationships of the tasks. In this study, the position of the rework station is optimized using the proposed model. Another factor that affects the number of potential tasks assigned to the rework station is defect rate of the assembly line. The proposed model is tested for different defect rates using some sample problems from the literature. The problems are solved to optimality and the results are analyzed.

**Keywords:** Assembly line balancing, Rework station, Determination of station position, Cycle time minimization, Mixed-integer programming

## 1. GİRİŞ

Günümüzde küreselleşme ile birlikte, işletmeler arasında yaşanan rekabet koşulları gittikçe artmaktadır. Bu nedenle işletmeler kapasitelerinde artış sağlamak, iş gücü, makine, malzeme ve hammadde gibi kaynaklarını daha etkin kullanarak verimliliği arttırmak ve bu sayede maliyet tasarruflarında ve üretim kârında artış sağlamak istemektedirler. Günümüzde, bu amaç doğrultusunda, montaj hatlarındaki hat etkinliğini arttırmak için hat dengeleme çalışmaları yapılmaktadır.

Montaj hatlarında iş parçaları sırasıyla ardışık iş istasyonlarından geçerek son istasyondan nihai ürün olarak çıkmaktadır. Son istasyonda, bu istasyonda gerçekleştirilen görevler tamamlandıktan sonra ürün için gerekli görülen kalite kontrol işlemi de gerçekleştirilmektedir. Kalite kontrol işleminden geçen ürün, önceden belirlenen birtakım özelliklere uygun değilse, ürün hatalı ise, ürünün belirlenen özelliklere uygunluğunu sağlayabilmek amacıyla Yeniden İşleme (Yİ) istasyonuna gönderilmektedir. Yİ istasyonuna gönderilen hatalı ürün için bu istasyonda gerekli görülen hata giderme çalışmaları gerçekleştirilmektedir.

Yİ istasyonu genellikle yalnızca uygun olmayan ürünlerin yeniden işlendiği bir istasyon olarak kullanılmaktadır. Yİ istasyonunun yalnızca bu amaçla kullanılması, montaj hattında hata oranının düşük olması durumunda burada bulunan kaynakların (iş gücü, makine-teçhizat vb.) etkin bir biçimde kullanılmamasına neden olmaktadır. Bu çalışma ile Yİ istasyonunun hata giderme işlemine ek olarak, diğer istasyonlarda olduğu gibi standart görev atamalarının gerçekleştirildiği bir iş istasyonu olarak kullanılması ele alınmaktadır. Böylelikle montaj hattındaki hat etkinliğinin artırılması amaçlanmaktadır. Bu sayede Yİ istasyonu yalnızca hata giderme işlemi için değil, aynı zamanda diğer görevlerin de atanabileceği standart bir iş istasyonu olarak kullanılabilir.

Yİ istasyonunun standart bir iş istasyonu olarak kullanılması ile bu istasyona görev ataması gerçekleştirileceğinden, Yİ istasyonunun hangi oranda hatalı ürünler için kullanılacağı da önemli bir hale gelmektedir. Bu nedenle yapılan çalışmada montaj hattında farklı hata oranları dikkate alınarak çözüme olan etkileri incelenmiştir. Yİ istasyonuna atanan görevlerin sayısını etkileyen bir diğer faktör de öncelik ilişkileri kısıtlarına bağlı olarak, Yİ istasyonunun bulunduğu pozisyonudur. Bu çalışmada montaj hattını dengelemek amacıyla söz konusu faktörleri dikkate alan karışık-tamsayılı programlama modeli önerilmektedir.

Makalenin içeriği şu şekilde devam etmektedir. İkinci bölümde hat dengeleme çalışmaları ile ilgili literatür incelemesine yer verilmiştir. Üçüncü bölümde problem tanımı sunulmuştur. Dördüncü bölümde önerilen tamsayılı programlama modelinin detayları anlatılmıştır. Beşinci bölümde literatürde bilinen bir test örneklemini üzerinde önerilen yöntemin uygulanmasına ilişkin detaylar verilmiştir. Altıncı bölümde literatürde yer alan farklı örneklemeler için elde edilen sonuçlara yer verilmiş ve sonuçlar analiz edilmiştir. Son olarak, yedinci bölümde genel değerlendirmeler yapılmıştır.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bir ürünü oluşturan parçaların önceden belirlenmiş uygun bir sıra ile birleştirilerek bir bütün oluşturulması işlemi montaj olarak ifade edilmektedir. Seri üretim sistemlerinde yüksek talepli nihai ürünleri üretebilmek için, taşıma mekanizmaları genellikle birbirine bir konveyör yardımıyla bağlanmış ardışık iş istasyonlarından oluşan sistemlere montaj hattı denilmektedir. Montaj hatlarında, işlem süreleri, öncelik ilişkileri ve çeşitli kısıtlar dikkate alınarak belirlenen farklı amaçlara göre (çevrim süresinin, istasyon sayısının minimizasyonu vb.) görevlerin iş istasyonlarına atanması ise Montaj Hattı Dengeleme (MHD) problemi olarak adlandırılmaktadır (Tuncel ve Topaloglu, 2013).

Montaj hattının dengelenmesi kavramı literatürde ilk kez 1954 yılında Bryton tarafından sunulan yüksek lisans tezinde ele alınmıştır (Bryton, 1954). Montaj hattı dengeleme probleminin tanımını ise Salveson 1955 yılında yapmıştır (Salveson, 1955).

MHD problemleri ile ilgili olarak çeşitli kaynaklarda farklı şekillerde sınıflandırmalar mevcuttur. Sivasankaran ve Shahabudeen (2014) tarafından yapılan bir çalışmada MHD problemleri, tek-çok/karışık modelli ve deterministik-stokastik görev süreli MHD problemleri olmak üzere iki ayrı sınıftan oluşmaktadır. Bu sınıflandırmada montaj hatları, hattın yerleşim yapısına göre düz ve U-tipi hatlar olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Düz montaj hatları birbiri ardına sıralanmış iş istasyonlarından oluşur (Kara ve diğ., 2011). Bu tip montaj hatlarında doğrusal olarak sıralanmış iş istasyonlarından geçen iş parçası son istasyondan nihai ürün olarak çıkmaktadır. U-tipi montaj hatlarında, hattın girişi ve çıkışı aynı pozisyonda bulunur ve bu istasyonda çalışan işçilerin aynı çevrim süresince bir veya daha fazla iş parçası üzerinde çalışmasına izin verilir. Günümüzde tam zamanında üretim sistemlerinin bir sonucu olarak üretim sisteminin esnek bir yapıda olması tercih edildiğinden, U-tipi hatlar yapılan çalışmalarda sıklıkla kullanılmaktadır. U-tipi MHD problemleri ile ilgili yapılan çalışmalara örnek olarak (Sabuncuoğlu ve diğ., 2009; Baykasoğlu ve Özbakır, 2007; Gökçen ve Ağpak, 2006) verilebilir. Düz ve U-tipi hatların yanı sıra montaj hatlarında aynı anda birden fazla ürünün üretildiği paralel hatlar (Gökçen ve diğ., 2006) ve genellikle çok büyük boyutlu ürünlerin üretiminde kullanılan çift yönlü hatlar (Özcan ve Toklu, 2010) başta olmak üzere çeşitli hat yapıları da kullanılmaktadır.

Ghosh ve Gagnon (1989) tarafından yapılan bir başka sınıflandırmada ise MHD problemleri tek modelli ve çok/karışık modelli olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Tek modelli montaj hatlarında tek tip ürün modeli üretilirken, çok/karışık modelli montaj hatlarında birden fazla ürün modeli üretilmektedir. Öte yandan görev sürelerine göre, görev sürelerinin sabit olduğu deterministik görev süreli montaj hatları, görev sürelerinin belirli bir istatistiksel dağılıma göre değişkenlik gösterdiği montaj hatları ise stokastik görev süreli montaj hatları olarak iki sınıftan oluşmaktadır. MHD problemleri Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemleri (BMHDP) ve Genelleştirilmiş Montaj Hattı Dengeleme Problemleri (GMHDP) olmak üzere iki kısımda incelenebilir. MHD problemlerinde bazı temel varsayımların dikkate alındığı MHD problemleri BMHDP olarak tanımlanmaktadır. BMHDP için bazı temel varsayımlar aşağıda verilmiştir (Baybars, 1986):

- Tüm girdi parametreleri belirlidir.
- Bir görev birden fazla istasyona bölünemez.
- Teknolojik ve organizasyonel kısıtlardan dolayı görevler keyfi bir sırayla gerçekleştirilemez.
- Tüm görevler yapılmalıdır.
- Tüm istasyonlar tüm görevleri gerçekleştirebilecek ekipman ve donanıma sahiptir.
- Her görev herhangi bir istasyonda yapılabilir.
- Tüm hat, besleyici veya paralel alt montaj hatlı olmayacak şekilde seri olarak düzenlenmiş olmalıdır.

- Çevrim süresi verilmiştir ve sabittir (BMHDP-1 için).
- İstasyon sayısı verilmiştir ve sabittir (BMHDP-2 için).

MHD problemleri ile ilgili bazı varsayımlar pratik uygulamalarda oldukça yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle son zamanlarda çeşitli kısıtları probleme dahil edebilmek amacıyla Genelleştirilmiş Montaj Hattı Dengeleme Problemleri (GMHDP) ile ilgili çalışmalar artmıştır. BMHDP ve GMHDP ile ilgili olarak yapılan çalışmaların kapsamlı bir incelemesi Scholl ve Becker (2006) ve Becker ve Scholl (2006) tarafından verilmektedir.

BMHDP amaç fonksiyonuna bağlı olarak BMHDP-1, BMHDP-2, BMHDP-E ve BMHDP-F olmak üzere dört sınıftan oluşmaktadır. BMHDP-1’de (Tip-1 MHD probleminde) belirli bir çevrim süresi için istasyon sayısı minimize edilmektedir. Diğer yandan BMHDP-2’de (Tip-2 MHD probleminde) ise belirli bir istasyon sayısı için çevrim süresi minimize edilmektedir. Benzer şekilde, BMHDP-E’de istasyon sayısı ve çevrim süresi minimize edilirken, BMHDP-F’de ise istasyon sayısı ve çevrim süresinin belirli bir kombinasyonu için uygun bir hat dengesi sağlanması amaçlanmaktadır (Wei ve Chao, 2011). Bu çalışmada dikkate alınan problem, çevrim süresini minimize etmeyi amaçlayan Tip-2 sınıfına girmektedir.

Literatürde MHD problemleri ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda optimalliği garanti eden (kesin çözüm veren) yöntemler ve sezgisel ve meta-sezgiselleri içeren yaklaşık çözüm veren yöntemler kullanılmaktadır (Battaia ve Dolgui, 2013). Kesin çözüm veren yöntemler tamsayılı programlama (Ağpak ve Zolfaghari, 2015; Ağpak ve diğ., 2012; Gökçen ve Erel, 1998), dal-sınır (Amen, 2006), dinamik programlama (Erel ve Gokcen, 1999) ve hedef programlama (Gokcen ve Erel, 1997) gibi yöntemleri içermektedir. MHD problemlerinde kesin çözüm veren yöntemlerin kapsamlı bir incelenmesi Boysen ve diğ. (2007) tarafından yapılmıştır. Yaklaşık çözüm veren yöntemler optimalliği garanti etmemekle birlikte iyi sonuçlar vermeleri nedeniyle, yapılan çalışmalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Bukchin ve Rabinowitch (2006) çalışmalarında sezgisel tabanlı dal-sınır yöntemini önermişlerdir. Suwannarongsri ve Puangdownreong (2008), tabu arama yöntemi ve kısmi rastgele permütasyon tekniği kullanarak MHD problemlerinin çözümünde yeni bir hibrit yöntem geliştirmişlerdir. Çerçioğlu ve diğ. (2009) tarafından yapılan çalışmada ise tavlama benzetimi tabanlı bir sezgisel yaklaşım önerilmiştir. Akpınar ve Bayhan (2011) çalışmalarında iş istasyon sayısını minimize etmek için bir melez genetik algoritma kullanmışlardır. Benzer şekilde, Tapkan ve diğ. (2012) tarafından çalışmada iş istasyon sayısını minimize etmek amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, tamsayılı programlama modeli formüle edilmiş ancak problemin karmaşıklığından dolayı arı algoritması ve yapay arı kolonisi algoritması önerilmiştir.

Son yıllardaki MHD problemi literatürü incelendiğinde, işçi atama ile ilgili olan çalışmaların yoğunluk kazandığı görülmektedir. Faccio ve diğ. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, gecikmesiz-karışık modelli montaj hattında, tüm montaj görevlerini yerine getirebilen, düzenli iş gücünü destekleyen ve tamamlayıcı iş gücünün kullanımını dikkate alan yenilikçi bir yaklaşım önerilmiştir. Polat ve diğ. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, montaj hattı işçi atama ve dengeleme probleminin çözümü için iki aşamalı bir değişken komşuluk arama algoritması önerilmiştir. Koltai ve Kalló (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada BMHDP’de öğrenme etkisi göz önünde bulundurularak, değişen darboğazları tespit etmek amaçlanmıştır. Oksuz ve diğ. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada ise işçi performansı dikkate alınarak, hat verimliliğinin en üst düzeye çıkarılması amaçlanmıştır. İlk olarak, problemin doğrusal olmayan modeli formüle edilmiş ve söz konusu model doğrusallaştırılmıştır. Daha sonra, bir yapay arı kolonisi algoritması ve bir genetik algoritma çözümü önerilmiştir.

İşçi atama ile ilgili olanlara ek olarak, son yıllarda MHD problemleri ile ilgili farklı çalışmaların da bulunduğu göze çarpmaktadır. Güden ve Meral (2016) çalışmalarında çok modelli MHD problemini ele almışlardır. Çalışmada bir beyaz eşya ürün tesisinde gözlemlenen gerçek-hayat MHD probleminden esinlenilerek tavlama benzetimine dayalı bir yaklaşım

geliştirilmiştir. Akpınar (2017) tarafından yapılan çalışmada BMHDP-2 için büyük komşuluk arama algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmanın performansı literatürdeki problem setleri üzerinde test edilmiştir. Arıkan (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, BMHDP-2'nin çözümü için bir tabu arama algoritması önerilmiştir. Önerilen algoritma, çevrim süresini ve istasyon iş yüklerinin sapmalar toplamını minimize etmek üzere iki amacı dikkate almaktadır. Sikora ve diğ. (2017) aynı veya tekrarlanan görevlerden oluşan BMHDP için bir karışık-tamsayı doğrusal programlama modeli önermişlerdir. Akpınar ve diğ. (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada tek ve karışık-modelli MHD problemleri için Benders ayrıştırma algoritması tanımlanmıştır.

BMHDP literatürü incelendiğinde, bazı temel farklılıklar olmakla birlikte, bu çalışma kapsamında dikkate alınan yapıyla çeşitli açılardan benzerlikler içeren birtakım iyileştirme politikalarının olduğu görülmektedir. Bunlar arasında, hattın durdurulması (Silverman ve Carter, 1986), hat dışı tamir (Gökçen ve Baykoç, 1999; Kottas ve Lau, 1973), melez hatlar (Lau ve Shtub, 1987) ve birden çok işçi atama (Shtub, 1984) gösterilebilir. Bu iyileştirme politikaları arasında en yaygın olarak kullanılanlar, hattın durdurulması ve hat dışı tamirdir (Altekin ve diğ., 2016). Hattın durdurulması, bir istasyona atanan görevlerin toplam sürelerinin çevrim süresini aşması durumunda, montaj hattını durdurarak eksik görevlerin tamamlanmasını ifade etmektedir. Hat dışı tamir politikası ise herhangi bir istasyonda çevrim süresinin aşılması durumunda, tamamlanmayan işlerin hat dışı istasyonda yapılması olarak tanımlanabilir. Bununla birlikte, söz konusu çalışmalarda genellikle Tip-1 MHD problemlerine odaklanıldığı, Tip-2 MHD problemleri için gerçekleştirilen çalışmaların ise sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu nedenle çalışma kapsamında Tip-2 MHD problemine odaklanılmasının literatüre katkı açısından da olumlu olacağı düşünülmektedir.

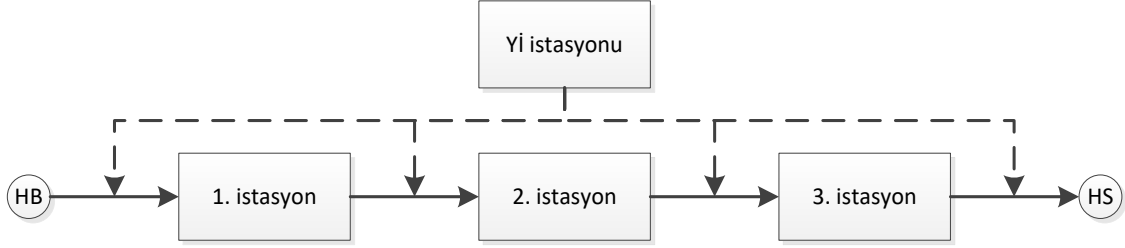
### 3. PROBLEM TANIMI

Bu çalışmada, deterministik görev süreli-tek modelli-düz montaj hattı dengeleme problemi dikkate alınmıştır. Montaj hatlarında, farklı ve deterministik işlem sürelerine sahip süreçler bir araya gelerek istasyonları oluşturmakta ve nihai ürün elde edilmektedir. Elde edilen bu ürün önceden belirlenen birtakım özelliklere uygun değilse, bir diğer ifadeyle hatalıysa, Yİ istasyonuna gönderilmekte ve bu istasyonda hata giderme çalışmaları uygulanmaktadır. Söz konusu Yİ istasyonunun doluluğu ise bu istasyona gönderilen görev sayısına göre farklılık göstermektedir. Atanan görev sayısı direkt olarak montaj hattının hata oranı ile ilişkilendirilebilir ve hata oranına göre Yİ istasyonu düşük ya da yüksek oranda kullanılabilir. Bu istasyonun az kullanılması durumunda ise standart bir iş istasyonu olarak kullanımı mümkün olabilmektedir. Bir diğer ifadeyle, montaj hattında var olan istasyonlara ek olarak, Yİ istasyonu standart bir iş istasyonu olarak kullanılabilir ve hattın çevrim süresi azaltılabilir.

Yİ istasyon pozisyonu seçimi ise kritik bir konudur. Söz konusu istasyonun pozisyonuna bağlı olarak atanabilecek görev sayısı değişmektedir. Şekil 1'de de görüldüğü gibi Yİ istasyonunun montaj hattının başına (HB) doğru konumlandırılması durumunda, atanabilecek potansiyel iş sayısı daha fazla olmakla birlikte, görevler arasındaki öncelik ilişkilerinden dolayı daha katı bir yapı söz konusudur. Öte yandan, Yİ istasyonunun montaj hattının sonuna (HS) doğru konumlandırılması durumunda ise atanabilecek potansiyel görev sayısı daha az olmakla birlikte, görevler arasındaki öncelik ilişkilerinin azalmasından dolayı esneklik artmaktadır. Yİ istasyon pozisyonunun montaj hattının başına doğru konumlandırılması durumunda, yeniden işlenecek ürünlerin montaj hattının sonundan ilgili istasyona taşınması ise dikkat edilmesi gereken bir noktadır. Burada, Yİ istasyon pozisyonu montaj hattının başına doğru konumlandırıldığında taşımadan kaynaklı bir ceza faktörü dikkate alınabilir.

Yİ istasyon pozisyonuna bağlı olarak ilgili istasyona atanabilecek görev yapısı değişkenlik göstermekle birlikte, hata oranı da bu istasyona atanan görev sayısını direkt olarak kısıtlayan bir unsurdur. Hata oranının düşük olması durumunda, montaj hattının sonunda daha az sayıda hatalı

ürün çıkacağı için Yİ istasyonuna atanabilecek standart görevlerin sayısı da artacaktır. Hata oranının yüksek olması durumunda ise Yİ istasyonunda işlenen hatalı ürün sayısı fazla olacaktır, bu istasyona atanabilecek standart görev sayısı da azalacaktır. Literatürde, Yİ istasyon pozisyonunun genellikle montaj hattının sonunda konumlandırıldığı görülmektedir. Bu çalışmada ise Yİ istasyon pozisyonunun dinamik olarak belirlenmesi ile çevrim süresini minimize etmek amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, dört farklı hata oranı katsayısı için Yİ istasyon pozisyonunun seçimine karar verilmiştir ve literatürde yer alan farklı örneklemeler için problem çözülerek, sonuçları analiz edilmiştir.



**Şekil 1:**  
*Yİ istasyon pozisyonu seçiminin gösterimi*

#### 4. METODOLOJİ

Çalışma kapsamında, Yİ istasyonunun standart bir iş istasyonu olarak ele alındığı ve deterministik görev süreli-tek modelli-düz montaj hattı dengeleme problemi için çevrim süresi minimizasyonu amaçlanmaktadır. Bir başka deyişle  $n$  adet iş istasyonu bulunan bir montaj hattında Yİ istasyonunun da standart bir iş istasyonu olarak kullanılması ile birlikte,  $(n+1)$  adet iş istasyonu için Tip-2 montaj hattı dengeleme problemi dikkate alınmaktadır. Bu amaçla, bu çalışmada, bir doğrusal olmayan-karışık tamsayılı programlama modeli önerilmiştir ve önerilen modelin doğrusal olmayan yapısı değişken dönüşümleri ile doğrusal hale dönüştürülmüştür. Söz konusu modelin bileşenleri aşağıda yer almaktadır. Makalenin ilerleyen bölümlerinde, Yİ istasyonunun standart bir iş istasyonu olarak dikkate alınması ile birlikte, toplam iş istasyonu sayısı  $(n+1)$  olarak ele alınmaktadır.

İndisler:

- $i$  : görev indisi,  $i = 1, \dots, n_I$   
 $j$  : iş istasyonu indisi,  $j = 1, \dots, n_J$

Parametreler:

- $n_I$  : görev sayısı  
 $n_J$  : toplam iş istasyonu sayısı (standart iş istasyonlarının sayısı + 1 (Yİ istasyonu))  
 $t_i$  :  $i$ . görevin işlem süresi  
 $p_{ik}$  :  $\begin{cases} 1, & i. \text{ görev } k. \text{ görevin öncülü ise} \\ 0, & \text{aksi durumda} \end{cases}$   
 $\beta$  : hata oranı katsayısı  
 $\lambda$  : ölçek faktörü  
 $M$  : çok büyük bir sayı

Değişkenler:

$$\begin{aligned}
 c & : \text{çevrim süresi} \\
 x_{ij} & : \begin{cases} 1, & i. \text{ görev } j. \text{ iş istasyonuna atanmışsa} \\ 0, & \text{aksi durumda} \end{cases} \\
 y_j & : \begin{cases} 1, & \text{Yİ istasyonu } j. \text{ iş istasyonu pozisyonunda ise} \\ 0, & \text{aksi durumda} \end{cases}
 \end{aligned}$$

Amaç fonksiyonu:

$$\min f = c + \lambda \sum_j \frac{1}{j} y_j \quad (1)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{j=1}^{n_j} x_{ij} = 1, \quad \forall i \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{n_j} j x_{ij} \leq \sum_{j=1}^{n_j} j x_{kj}, \quad \forall i, k: p_{ik} = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{n_i} t_i x_{ij} \leq \frac{1}{\beta} y_j c + (1 - y_j) c, \quad \forall j \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^{n_j} y_j = 1 \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \quad (6)$$

$$y_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \quad (7)$$

$$c \geq 0 \quad (8)$$

(1) numaralı denklem ile ifade edilen amaç fonksiyonu, çevrim süresi ve Yİ istasyon pozisyonundan kaynaklı taşımaların minimizasyonunu amaçlamaktadır. Bir diğer ifadeyle, amaç fonksiyonun ikinci bileşeni ile Yİ istasyonunun montaj hattının başına doğru konumlandırılması durumunda, hatalı ürünlerin yeniden işlenmek üzere ilgili istasyona taşınmalarından dolayı bir ceza faktörü uygulanmaktadır. Bu ceza faktörü direkt olarak istasyonun sırasını ifade eden  $j$  indisi ile ters orantılı olacak şekilde ele alınmaktadır. Burada yer alan  $\lambda$  ise amaç fonksiyonu bileşenleri arasındaki ölçek faktörünü göstermektedir. (2) numaralı denklem ile verilen kısıt görevlerin mutlaka bir istasyona atanmasını sağlamaktadır. (3) numaralı denklem ile verilen kısıt görevler arasındaki öncelik ilişkilerini göstermektedir. (4) numaralı denklem ile bir istasyona atanan görevlerin işlem sürelerinin toplamının çevrim süresini aşmaması sağlanmaktadır. Bir istasyonun Yİ istasyonu olması durumunda, denklemin sağ tarafında hata giderme çalışmalarının çevrim süresinin oluşmasında etkili olması sağlanmıştır. Öte yandan, söz

konusu istasyon eğer Yİ istasyonu değilse, çevrim süresi hesaplamasında ilgili istasyona atanan görevlerin toplam işlem süresi dikkate alınmaktadır. Bununla birlikte, denklemin sağ tarafında yer alan değişkenlerin çarpımı ( $y_j c, \forall j$ ) doğrusal olmayan bir yapı oluşturduğundan, aşağıda açıklandığı gibi doğrusal hale dönüştürülmüştür. (5) numaralı denklem ile Yİ istasyon pozisyonuna karar verilirken; (6), (7) ve (8) numaralı denklemler ise genel işaret kısıtlarıdır.

$z_j = y_j c, \forall j$  olmak üzere yeni değişkenler tanımlanarak, (9)-(12) numaralı denklemler ile modelin doğrusal olmayan yapısı ((4) numaralı denklem) doğrusal hale dönüştürülmektedir.

$$z_j \leq M y_j, \quad \forall j \quad (9)$$

$$z_j \leq c, \quad \forall j \quad (10)$$

$$z_j \geq c - (1 - y_j)M, \quad \forall j \quad (11)$$

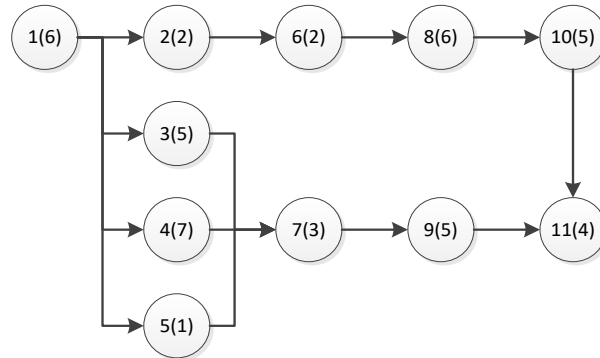
$$z_j \geq 0, \quad \forall j \quad (12)$$

Söz konusu dönüşüm işlemlerinin doğrusal olmayan (4) numaralı denklemde uygulanması ile ilgili kısıt (13) numaralı denklemde görüldüğü gibi düzenlenmiştir.

$$\sum_{i=1}^{n_j} t_i x_{ij} \leq \frac{1}{\beta} z_j + c - z_j, \quad \forall j \quad (13)$$

## 5. ÖRNEK UYGULAMA

Çalışma kapsamında önerilen yöntemin test edilmesi amacıyla, literatürde yer alan ve 11 görevden oluşan Jackson örneklemini kullanılmıştır. Burada amaç fonksiyonu bileşenleri eşit önemde ( $\lambda = 1$ ) ele alınmıştır. Şekil 2’de Jackson örneklemini için işlem süreleri ve görevler arasındaki öncelik ilişkileri verilmiştir. İstasyon sayısının üç ve dört olduğu durumlar için problem çözülmüştür. Dolayısıyla, Yİ istasyonunun problemde dikkate alınması ile bu durumlar için istasyon sayısı sırasıyla dört ve beş olacaktır.



**Şekil 2:**  
*Jackson örneklemini için işlem süreleri ve öncelik ilişkisi diyagramı*

Problem tanımında da bahsedildiği gibi montaj hattında elde edilen ürünlerin hangi oranda hatalı ürün olduğu, Yİ istasyonu kullanımını önemli ölçüde etkilemektedir. Bir diğer ifadeyle, hata oranının düşük olması durumunda Yİ istasyonuna atanabilecek standart görevlerin sayısı



artarken, hata oranının yüksek olması durumunda ise bu istasyona atanabilecek potansiyel görev sayısı azalmaktadır. Farklı hata oranı katsayılarının probleme etkisinin analiz edilmesi amacıyla,  $\beta = 1,00$ ,  $\beta = 1,25$ ,  $\beta = 1,50$  ve  $\beta = 1,75$  olmak üzere dört farklı hata oranı katsayısı için matematiksel programlama modeli çözülmüştür. Tablo 1’de Jackson örnekleme için elde edilen sonuçlar verilmiştir. Öncelikle bu örneklem için literatürde yer alan optimum amaç fonksiyonu (çevrim süresi) değerleri verilmiştir. Ardından farklı hata oranı katsayıları için çalışma kapsamında elde edilen Yİ istasyon pozisyonu, çevrim süresi ve amaç fonksiyonu değeri sunulmuştur. Amaç fonksiyonu değeri, çevrim süresini ve ikinci amaç fonksiyonu bileşeni olan Yİ istasyon pozisyonuna bağlı ağırlıklandırılmış ceza değerini içermektedir. Bir başka deyişle, amaç fonksiyonu ve çevrim süresi sütunları arasındaki farkın bu ağırlıklandırılmış ceza değerini belirttiği söylenebilir.

Şekil 3’te istasyon sayısının üç (Yİ istasyonunun eklenmesi ile dört) olduğu durumda dört farklı hata oranı katsayısı için elde edilen istasyon-görev atamaları sunulmuştur. Burada beyaz renk ile standart istasyonlar; gri renk ile Yİ istasyonu ve bu istasyon için açık gri renk ile standart görev atamaları, koyu gri renk ile hata giderme çalışmaları gösterilmiştir. Hata oranı katsayısının artışıyla birlikte ilgili istasyona atanan standart görev sayısı azalmaktadır ve bu istasyonun yeniden işleme amaçlı kullanım oranı artmaktadır. Hata oranı katsayısındaki artışla birlikte, montaj hattının çevrim süresi de beklenen şekilde artmaktadır. Görevler arasındaki öncelik ilişkileri, görevlerin yapılış sırasını etkilediğinden, Yİ istasyonunun konumlandırıldığı pozisyona bağlı olarak çevrim süresi de değişmektedir. Yİ istasyon pozisyonunun montaj hattının başına doğru konumlandırılmasında ise amaç fonksiyonundaki artış oranı daha yüksektir. Bir diğer ifadeyle, amaç fonksiyonu değeri ile çevrim süresi arasındaki fark artmaktadır. Bu durum, Yİ istasyon pozisyonunun montaj hattının başına doğru olması durumunda, ilgili istasyon pozisyonu indisi ile ters orantılı olacak şekilde ceza faktörü uygulanması ile açıklanabilir. Tablo 1’de de görüldüğü gibi Yİ istasyonunun standart bir iş istasyonu olarak kullanılması ile her iki istasyon sayısı örnekleme için de literatürde yer alan optimum çevrim süresi değerlerinde iyileşme görülmektedir. Çözüm süreleri açısından incelendiğinde ise oldukça kısa sürelerde çözüm elde edildiği görülmektedir.

**Tablo 1. Jackson örnekleme için elde edilen sonuçlar**

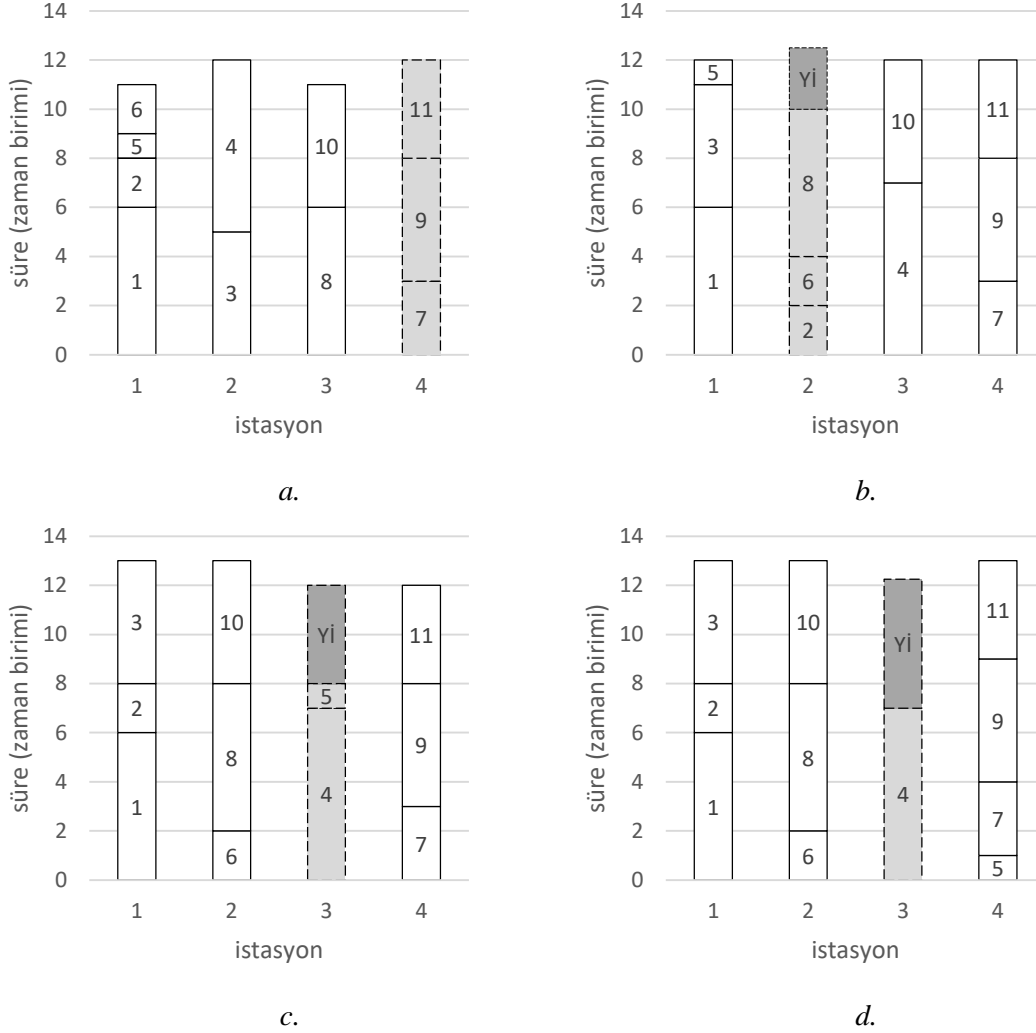
Problem	İS	Çevrim Süresi	BÇS (sn)	Hata Oranı Katsayısı	Yİİ Pozisyonu	Çevrim Süresi	Amaç Fonksiyonu	BÇS (sn)
Jackson (11 görev)	3+1	16	≈ 0,00	1,00	4	12,00	12,25	0,17
				1,25	2	12,50	13,00	0,08
				1,50	3	13,00	13,33	0,02
				1,75	3	13,00	13,33	0,01
	4+1	12	≈ 0,00	1,00	5	10,00	10,20	0,02
				1,25	2	10,00	10,50	0,03
				1,50	2	10,00	10,50	0,03
				1,75	5	11,00	11,20	0,03

İS: İstasyon Sayısı; BÇS: Bilgisayar Çözüm Süresi; Yİİ: Yeniden İşleme İstasyonu

## 6. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde literatürde yer alan farklı MHD problemi örneklemeleri (Mitchells, Heskiaoff, Sawyer) üzerinde matematiksel programlama modelinin performansı test edilmiştir ve sonuçları Tablo 2’de sunulmuştur. Tablo 2’de verilen sonuçlarda, her örneklem için Uğurdağ ve diğ. (1997) tarafından yapılan çalışmada verilen iki farklı istasyon sayısı kombinasyonu dikkate alınmıştır. Test problemlerine <http://assembly-line-balancing.mansci.de> adresinden erişilebilir.

Deneysel çalışmalar, Intel (R) Core™ i7-7500 CPU 2.70GHz 2.90GHz özelliklerine sahip kişisel bir bilgisayarda Mathematical Programming Language (MPL) ortamında GUROBI çözücüsü kullanılarak çözülmüştür. Önceki bölümde sunulan uygulamaya benzer şekilde, dört farklı hata oranı katsayısı dikkate alınmıştır. Yİ istasyonunun standart bir iş istasyonu olarak ele alınması ile her bir örneklem için mevcut istasyon sayısının bir arttığına dikkat edilmelidir. Örneğin, Mitchells örnekleme için 3 istasyonun bulunduğu durumda, Yİ istasyonunun standart bir iş istasyonu olarak ele alınması ile toplamda 4 adet istasyon bulunmaktadır ve dört farklı hata oranı katsayısı için de Yİ istasyon pozisyonu 4. istasyon olmuştur.



**Şekil 3:**  
Jackson örnekleme için görev atamaları;  
a.  $\beta = 1,00$  b.  $\beta = 1,25$  c.  $\beta = 1,50$  d.  $\beta = 1,75$

Tablo 2’de, farklı görev ve istasyon sayısına sahip bu örneklem için literatürde yer alan optimum amaç fonksiyonu çevrim süresi değerleri ve çözüm süreleri verilmiştir. Ardından farklı hata oranı katsayıları için çalışma kapsamında elde edilen Yİ istasyon pozisyonu, çevrim süresi ve amaç fonksiyonu değeri sunulmuştur. Amaç fonksiyonu değeri, çevrim süresini ve ikinci amaç fonksiyonu bileşeni olan Yİ istasyon pozisyonuna bağlı ağırlıklandırılmış ceza değerini içermektedir. Amaç fonksiyonu ve çevrim süresi sütunları arasındaki fark bu ağırlıklandırılmış ceza değerini içermektedir.

Tablo 2’de yer alan sonuçlar incelendiğinde, hata oranı katsayısının düşük olduğu örneklerde, Yİ istasyonuna gönderilen hatalı ürün sayısı azaldığından, çevrim süresinin düştüğü görülmektedir. Bir diğer ifadeyle, ilgili istasyona hatalı ürün gönderimi azaldığından daha çok sayıda standart görev ataması yapılmış ve çevrim süresinde azalmalar meydana gelmiştir. Yİ istasyon pozisyonu cinsinden sonuçlar incelendiğinde, ilgili istasyonun genellikle hattın sonuna doğru konumlandırıldığı görülmektedir. Bu nedenle amaç fonksiyonunda ikinci amaç fonksiyonu bileşeninin etkisinin az ve Yİ istasyon pozisyonuyla ters orantılı şekilde verilen ağırlıklandırılmış ceza değerinin de düşük olduğu görülmektedir. Bu durum amaç fonksiyonu bileşenleri arasındaki ölçek faktörü ( $\lambda$ ) değerinin 1 alınması ile ifade edilebilir. Çözüm süreleri açısından incelendiğinde ise problem boyutu büyüdüğünde çözüm sürelerinin nispeten artarak birkaç saniyeye ulaştığı görülmektedir.

**Tablo 2. Deneysel sonuçlar**

Problem	İS	Çevrim Süresi	BÇS (sn)	Hata Oranı Katsayısı	Yİİ Pozisyonu	Çevrim Süresi	Amaç Fonksiyonu	BÇS (sn)
Mitchells (21 görev)	3+1	35	0,01	1,00	4	27,00	27,25	0,03
				1,25	4	28,00	28,25	0,04
				1,50	4	30,00	30,25	0,06
				1,75	4	30,00	30,25	0,04
	5+1	21	0,01	1,00	6	18,00	18,17	0,06
				1,25	6	19,00	19,17	0,07
				1,50	5	19,00	19,20	0,08
				1,75	4	19,25	19,50	0,09
Heskiaoff (28 görev)	4+1	256	0,04	1,00	5	205,00	205,20	5,38
				1,25	5	214,00	214,20	21,60
				1,50	5	220,00	220,20	13,62
				1,75	5	224,00	224,20	0,44
	5+1	205	0,04	1,00	6	171,00	171,17	4,82
				1,25	6	177,00	177,17	13,55
				1,50	6	181,00	181,17	12,19
				1,75	6	184,00	184,17	12,19
Sawyer (30 görev)	5+1	65	0,07	1,00	6	55,00	55,17	2,78
				1,25	6	56,00	56,17	0,86
				1,50	6	58,00	58,17	16,87
				1,75	6	58,00	58,17	1,11
	8+1	41	0,08	1,00	9	37,00	37,11	1,95
				1,25	7	37,50	37,64	2,31
				1,50	9	38,00	38,11	2,31
				1,75	9	39,00	39,11	1,81

İS: İstasyon Sayısı; BÇS: Bilgisayar Çözüm Süresi; Yİİ: Yeniden İşleme İstasyonu

## 7. TARTIŞMA

Bu çalışmada, Yİ istasyonunun standart bir iş istasyonu olarak kullanıldığı ve deterministik görev süreli-tek modellenli-düz montaj hattı dengeleme problemi ele alınmıştır. Bu doğrultuda, bir doğrusal olmayan-karışık-tamsayı programlama modeli önerilerek çevrim süresi minimizasyonu amaçlanmıştır. Önerilen matematiksel programlama modelinin, problemin karakteristiği gereği doğrusal olmayan yapısı, birtakım değişken dönüşümleri ile doğrusal hale dönüştürülmüştür.

Yİ istasyon pozisyonunun seçimi, görevler arasındaki öncelik ilişkilerine bağlı olarak ilgili istasyona atanabilecek potansiyel görev sayısını değiştirmektedir. Montaj hattının başına doğru Yİ istasyonunun konumlandırılması durumunda atanabilecek potansiyel iş sayısı daha fazla olmakla birlikte, görevler arasındaki öncelik ilişkilerinden dolayı katı bir yapı söz konusudur. Montaj hattının sonuna doğru Yİ istasyonunun konumlandırılması durumunda ise atanabilecek potansiyel görev sayısı azalırken, görevler arasındaki öncelik ilişkilerinden dolayı esneklik artmaktadır. Yİ istasyon pozisyonunun yanı sıra, hata oranı da bu istasyona atanabilecek görev sayısını etkileyen bir unsurdur. Hata oranının düşük olması durumunda, ilgili istasyona atanabilecek standart görevlerin sayısı artarken; yüksek olması durumunda ise bu istasyona atanabilecek standart görev sayısı azalmaktadır. Literatürde yer alan farklı örneklemeler için önerilen karışık-tamsayılı programlama modeli çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, hata oranı katsayısının düşük olduğu durumlarda, Yİ istasyonuna gönderilen hatalı ürün sayısı azaldığından, çevrim süresinin düştüğü görülmektedir. Bir başka deyişle, Yİ istasyonuna hatalı ürün gönderimi azaldığından, bu istasyona standart görev atamaları yapılmış ve çevrim süresinde azalmalar meydana gelmiştir. Yİ istasyon pozisyonu cinsinden sonuçlar incelendiğinde ise bu istasyonun genellikle hattın sonuna doğru konumlandırıldığı görülmektedir. Bu nedenle amaç fonksiyonunda ikinci amaç fonksiyonu bileşeninin etkisinin az ve Yİ istasyon pozisyonuyla ters orantılı şekilde verilen ağırlıklandırılmış ceza değerinin de düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, amaç fonksiyonu bileşenleri arasındaki ölçek faktörünün 1 alınması ile ifade edilebilir.

Gelecek çalışmalarda, çeşitli model parametrelerinin çözüme olan etkilerini incelemek amacıyla duyarlılık analizleri gerçekleştirilebilir. Literatürde yer alan farklı montaj hattı tasarımları için Yİ istasyon pozisyonunun belirlenmesi de bir başka gelecek çalışma alanı olabilir. Büyük boyutlu problemlerin çözümü için çeşitli sezgisel ve metasezgisel yöntemler geliştirilebilir.

## KAYNAKLAR

1. Ağpak, K. and Zolfaghari, S. (2015) Mathematical models for parallel two-sided assembly line balancing problems and extensions, *International Journal of Production Research*, 53(4), 1242-1254. doi: 10.1080/00207543.2014.955218
2. Ağpak, K., Yegül, M. F. and Gökçen, H. (2012) Two-sided U-type assembly line balancing problem, *International Journal of Production Research*, 50(18), 5035-5047. doi: 10.1080/00207543.2011.631599
3. Akpınar, S. and Bayhan, G. M. (2011) A hybrid genetic algorithm for mixed model assembly line balancing problem with parallel workstations and zoning constraints, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 24(3), 449-457. doi: 10.1016/j.engappai.2010.08.006
4. Akpınar, Ş. (2017) Large neighbourhood search algorithm for Type-II assembly line balancing problem, *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 23(4), 444-450. doi: 10.5505/pajes.2016.75975
5. Akpınar, S., Elmi, A. and Bektaş, T. (2017) Combinatorial Benders cuts for assembly line balancing problems with setups, *European Journal of Operational Research*, 259(2), 527-537. doi: 10.1016/j.ejor.2016.11.001
6. Altekin, F. T., Bayındır, Z. P. and Gümüşkaya, V. (2016) Remedial actions for disassembly lines with stochastic task times, *Computers & Industrial Engineering*, 99, 78-96. doi: 10.1016/j.cie.2016.06.027

7. Amen, M. (2006) Cost-oriented assembly line balancing: Model formulations, solution difficulty, upper and lower bounds, *European Journal of Operational Research*, 168(3), 747-770. doi: 10.1016/j.ejor.2004.07.026
8. Arıkan, M. (2017) İş yükü dengelemeli ikinci tip basit montaj hattı dengeleme problemi için bir tabu arama algoritması, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(4), 1169-1180. doi: 10.17341/gazimmfd.369529
9. Battaia, O. and Dolgui, A. (2013) A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches, *International Journal of Production Economics*, 142(2), 259-277. doi: 10.1016/j.ijpe.2012.10.020
10. Baybars, I. (1986) A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem, *Management science*, 32(8), 909-932. doi: 10.1287/mnsc.32.8.909
11. Baykasoğlu, A. and Özbakır, L. (2007) Stochastic U-line balancing using genetic algorithms, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32(1-2), 139-147. doi: 10.1007/s00170-005-0322-4
12. Becker, C. and Scholl, A. (2006) A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing, *European journal of operational research*, 168(3), 694-715. doi: 10.1016/j.ejor.2004.07.023
13. Boysen, N., Flidner, M. and Scholl, A. (2007) A classification of assembly line balancing problems, *European journal of operational research*, 183(2), 674-693. doi: 10.1016/j.ejor.2006.10.010
14. Bryton, B. (1954). Balancing of a continuous production line, *M.Sc Thesis*, Northwestern University, Evanston.
15. Bukchin, Y. and Rabinowitch, I. (2006) A branch-and-bound based solution approach for the mixed-model assembly line-balancing problem for minimizing stations and task duplication costs, *European Journal of Operational Research*, 174(1), 492-508. doi: 10.1016/j.ejor.2005.01.055.
16. Çerçioğlu, H., Özcan, U., Gökçen, H. ve Toklu, B. (2009) Paralel montaj hattı dengeleme problemleri için bir tavlama benzetimi yaklaşımı, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24(2).
17. Erel, E. and Gokcen, H. (1999) Shortest-route formulation of mixed-model assembly line balancing problem, *European Journal of Operational Research*, 116(1), 194-204. doi: 10.1016/S0377-2217(98)00115-5
18. Faccio, M., Gamberi, M. and Bortolini, M. (2016) Hierarchical approach for paced mixed-model assembly line balancing and sequencing with jolly operators, *International Journal of Production Research*, 54(3), 761-777. doi: 10.1080/00207543.2015.1059965
19. Ghosh, S. and Gagnon, R. J. (1989) A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems, *The International Journal of Production Research*, 27(4), 637-670. doi: 10.1080/00207548908942574
20. Gokcen, H. and Erel, E. (1997) A goal programming approach to mixed-model assembly line balancing problem, *International Journal of Production Economics*, 48(2), 177-185.
21. Gökçen, H. and Ağpak, K. (2006) A goal programming approach to simple U-line balancing problem, *European Journal of Operational Research*, 171(2), 577-585. doi: 10.1016/j.ejor.2004.09.021

22. Gökçen, H. and Baykoç, Ö. F. (1999) A new line remedial policy for the paced lines with stochastic task times, *International Journal of Production Economics*, 58(2), 191-197. doi: 10.1016/S0925-5273(98)00123-6
23. Gökçen, H. ve Erel, E. (1998) Binary integer formulation for mixed-model assembly line balancing problem, *Computers & Industrial Engineering*, 34(2), 451-461. doi: 10.1016/S0360-8352(97)00142-3
24. Gökçen, H., Ağpak, K. and Benzer, R. (2006) Balancing of parallel assembly lines, *International Journal of Production Economics*, 103(2), 600-609. doi: 10.1016/j.ijpe.2005.12.001
25. Güden, H. and Meral, S. (2016) An adaptive simulated annealing algorithm-based approach for assembly line balancing and a real-life case study, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84(5-8), 1539-1559. doi: 10.1007/s00170-015-7802-y
26. Kara, Y., Özgüven, C., Yalçın, N. and Atasagun, Y. (2011) Balancing straight and U-shaped assembly lines with resource dependent task times, *International Journal of Production Research*, 49(21), 6387-6405. doi: 10.1080/00207543.2010.535039
27. Koltai, T. and Kalló, N. (2017) Analysis of the effect of learning on the throughput-time in simple assembly lines, *Computers & Industrial Engineering*, 111, 507-515. doi: 10.1016/j.cie.2017.03.034
28. Kottas, J. F. and Lau, H. S. (1973) A Cost-Oriented Approach to Stochastic Line Balancing, *AIIE Transactions*, 5(2), 164-171. doi: 10.1080/05695557308974897
29. Lau, H. S. and Shtub, A. (1987) An exploratory study on stopping a paced line when incompleteness occur, *IIE transactions*, 19(4), 463-467. doi: 10.1080/07408178708975421
30. Oksuz, M. K., Buyukozkan, K. and Satoglu, S. I. (2017) U-shaped assembly line worker assignment and balancing problem: A mathematical model and two meta-heuristics, *Computers & Industrial Engineering*, 112, 246-263. doi: 10.1016/j.cie.2017.08.030
31. Özcan, U. and Toklu, B. (2010) Balancing two-sided assembly lines with sequence-dependent setup times, *International Journal of Production Research*, 48(18), 5363-5383. doi: 10.1080/00207540903140750
32. Polat, O., Kalayci, C. B., Mutlu, Ö. and 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: 10.1080/00207543.2015.1055344
33. Sabuncuoglu, I., Erel, E. and Alp, A. (2009) Ant colony optimization for the single model U-type assembly line balancing problem, *International Journal of Production Economics*, 120(2), 287-300. doi: 10.1016/j.ijpe.2008.11.017
34. Salveson, M. E. (1955) The assembly line balancing problem, *The Journal of Industrial Engineering*, 18-25.
35. Scholl, A. and Becker, C. (2006) State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing, *European Journal of Operational Research*, 168(3), 666-693. doi: 10.1016/j.ejor.2004.07.022
36. Shtub, A. (1984) The effect of incompleteness cost on line balancing with multiple manning of work stations, *The International Journal Of Production Research*, 22(2), 235-245. doi: 10.1080/00207548408942450

37. Sikora, C. G. S., Lopes, T. C., Schibelbain, D. and Magatão, L. (2017) Integer based formulation for the simple assembly line balancing problem with multiple identical tasks, *Computers & Industrial Engineering*, 104, 134-144. doi: 10.1016/j.cie.2016.12.026
38. Silverman, F. N. and Carter, J. C. (1986) A cost-based methodology for stochastic line balancing with intermittent line stoppages, *Management Science*, 32(4), 455-463. doi: 10.1287/mnsc.32.4.455
39. Sivasankaran, P. and Shahabudeen, P. (2014) Literature review of assembly line balancing problems, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(9-12), 1665-1694. doi: 10.1007/s00170-014-5944-y
40. Suwannarongsri, S. and Puangdownreong, D. (2008) Optimal assembly line balancing using tabu search with partial random permutation technique, *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 3(1), 3-18. doi: 10.1080/17509653.2008.10671032
41. Tapkan, P., Ozbakir, L. and Baykasoglu, A. (2012) Modeling and solving constrained two-sided assembly line balancing problem via bee algorithms, *Applied Soft Computing*, 12(11), 3343-3355. doi: 10.1016/j.asoc.2012.06.003
42. Tuncel, G. and Topaloglu, S. (2013) Assembly line balancing with positional constraints, task assignment restrictions and station paralleling: A case in an electronics company, *Computers & Industrial Engineering*, 64(2), 602-609. doi: 10.1016/j.cie.2012.11.006
43. Uğurdağ, H. F., Rachamadugu, R. and Papachristou, C. A. (1997) Designing paced assembly lines with fixed number of stations, *European Journal of Operational Research*, 102(3), 488-501. doi: 10.1016/S0377-2217(96)00248-2
44. Wei, N. C. and Chao, I. M. (2011) A solution procedure for Type E simple assembly line balancing problem, *Computers & Industrial Engineering*, 61(3), 824-830. doi: 10.1016/j.cie.2011.05.015

