

Topaloğlu Yıldız, Ş., & Yıldız, G., & Cın, E. (2020). Bir elektronik firmasındaki işçi atamalı montaj hattı dengeleme problemine matematiksel programlama ve benzetim modelleme tabanlı bir çözüm yaklaşımı. *KOCATEPEİİBF Dergisi*, Haziran 2020, 22(1), 57-73.

BİR ELEKTRONİK FİRMASINDAKİ İŞÇİ ATAMALI MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİNE MATEMATİKSEL PROGRAMLAMA VE BENZETİM MODELLEME TABANLI BİR ÇÖZÜM YAKLAŞIMI

ŞEYDA TOPALOĞLU YILDIZ¹, GÖKALP YILDIZ², EKİNSU CİN³

ÖZ

Bu çalışma, bir elektronik firmasına ilişkin montaj hattında, işçilerin iş istasyonlarına atanması ve montaj hattının dengelemesi problemini ele almaktadır. Bu problemin çözümü için kullanılan yaklaşım iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, işçilerin hangi iş elemanlarını yapıp hangi iş elemanlarını yapamadıkları, işçilerin iş istasyonlarına atanması sırasında mevcut olup olmadıkları, iş elemanlarının hangi ekipman/ekipmanlar ile yapılması gerektiği ve bu ekipmanların hangi iş istasyonlarında buldukları bilgilerini ve iş elemanlarına ilişkin çeşitli atama kısıtlarını dikkate alan bir matematiksel model sunulmaktadır. Bu modelin LINGO optimizasyon yazılımı ile çözülmesi sonucunda, iş elemanlarının ve işçilerin hangi iş istasyonlarına atandığı bilgileri elde edilmektedir. İkinci aşamada ise, ilk aşamadan elde edilen bilgileri kullanarak düzenlenen montaj hattının, istenilen üretim hedefine gerçek hayat kısıtları altında ulaşip ulaşmadığını test etmek için, mevcut matematiksel modelde dikkate alınamayan, iş istasyonları arası konveyör hareketi, ara stok alanları ve işlem sürelerindeki stokastik değişkenlik gibi faktörleri de dikkate alan bir ARENA benzetim modeli sunulmaktadır. Benzetim modelinden elde edilen sonuçlar, bu koşullar altında çıktı miktarının üretim hedefinin altında kaldığını göstermektedir. Daha sonra ise mevcut sisteme ilişkin iyileştirme önerilerinde bulunularak istenilen üretim hedefine ulaşan bir çözüm elde edilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Montaj Hattı Dengeleme, Matematiksel Modelleme, İşçi Atama, Atama Kısıtları, Benzetim

JEL Kodları: C44, C53, C61.

MATHEMATICAL PROGRAMMING AND SIMULATION MODELING BASED SOLUTION APPROACH TO WORKER ASSIGNMENT AND ASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEM IN AN ELECTRONICS COMPANY

ABSTRACT

This study deals with the problem of the assignment of workers to the stations and the balancing of the assembly line in an electronics company. The approach used to solve this problem consists of two stages. In the first stage, a mathematical model is presented which takes into account the information about which jobs the workers can and cannot do, whether the workers are present during the assignment to the stations, which equipment/ equipments the jobs should be done with, and the stations where these equipments are located and the various assignment constraints related to the jobs. As a result of this model being solved with LINGO optimization software, information about which jobs and workers are assigned to which stations is obtained. In the second stage, the assembly line which is arranged using the information obtained from the first stage, in order to test whether the assembly line reaches the desired production target under real life constraints, ARENA simulation model which takes into consideration the factors such as conveyor movement between stations, intermediate inventory areas and stochastic variability in operation times that could not be considered in the present mathematical model is presented. The results obtained from the simulation model show that under these conditions the output amount is below the production target. Then, a solution is achieved that reaches the desired production target by making improvement suggestions for the current system.

Keywords: Assembly Line Balancing, Mathematical Modeling, Worker Assignment, Assignment Constraints, Simulation

JEL Codes: C44, C53, C61.

¹Prof. Dr., Dokuz Eylül Üni., Endüstri Müh. Bölümü, seyda.topaloglu@deu.edu.tr - ORCID: 0000-0001-6827-126X

² Doç. Dr., Dokuz Eylül Üni., Endüstri Müh. Bölümü, gokalp.yildiz@deu.edu.tr - ORCID: 0000-0003-3962-7604

³Lisans Öğrencisi, Dokuz Eylül Üni., Endüstri Müh. Bölümü, ekınsucın@gmail.com - ORCID: 0000-0001-7265-4853

GİRİŞ

Montaj hatları, otomobiller gibi standartlaştırılmış ürünlerin seri üretiminde kullanılan üretim sistemleridir. Montaj hatları malzeme taşıma sistemleri ile birbirine bağlanan iş istasyonlarından oluşur. Her bir iş istasyonunda, son ürünü üretmek için belirli montaj işlemleri gerçekleştirilir. *Montaj Hattı Dengeleme Problemi* çeşitli kısıtlar altında, belli bir amacı en iyi gerçekleştirecek şekilde, iş elemanlarının iş istasyonlarına atanması problemidir.

Basit Montaj Hattı Dengeleme Probleminde (BMHDP), tek bir ürüne ilişkin iş elemanlarının, iş elemanları arasındaki öncelik ilişkilerini ihlal etmeden uygun iş istasyonlarına ataması yapılmaktadır. Bir BMHDP’de, verilen bir çevrim süresi için iş istasyonu sayısı enküçüklenmeye çalışılıyorsa, bu problem Tip I (BMHDP-I), verilen bir iş istasyonu sayısı için çevrim süresi enküçüklenmeye çalışılıyorsa, Tip II (BMHDP-II) olarak sınıflandırılmaktadır. Bu problemde bütün iş istasyonları eşit ve iş elemanları herhangi bir iş istasyonuna atanabilir. *Montaj Hattı İşçi Atama ve Dengeleme Probleminde* (MHİADP) ise, belli bir amaç doğrultusunda iş elemanlarının, bu iş elemanlarını gerçekleştirebilecek işçilerle aynı anda iş istasyonlarına atanması dikkate alınmaktadır.

Gerçek uygulamalarda montaj hattı dengeleme problemi, BMHDP’deki öncelik kısıtlarına ek olarak birçok farklı kısıtların da ele alınmasını gerekli kılmaktadır. Örneğin, işçilerin hangi iş elemanlarını yapıp hangi iş elemanlarını yapamadıkları, işçilerin iş istasyonlarına atanması sırasında mevcut olup olmadıkları (devam durumları), iş elemanlarının hangi ekipman/ekipmanlar ile yapılması gerektiği, bu ekipmanların hangi iş istasyonlarında buldukları, aynı veya farklı iş istasyonlarında yapılmak zorunda olan iş elemanı gruplarının bulunması ve tek olarak yapılması zorunlu olan iş elemanlarının varlığı gibi gerçek üretim ortamına ilişkin kısıtlar bu problemin çözümünü daha da zorlaştırmaktadır. Problem, bu haliyle genişletilmiş MHİADP (G_MHİADP) şeklinde adlandırılabilir. Ayrıca, bu kısıtlara ek olarak, gerçek uygulamalarda matematiksel model ile ifade edilemeyecek bazı durumlar da söz konusu olabilmektedir. Özellikle, iş elemanı sürelerinin aslında stokastik olduğu, iş istasyonları arası ara stok kapasitesinin kısıtlı olduğu ve iş istasyonları arası taşımanın konveyör gibi bir aktarma sistemi ile gerçekleştirildiği düşünüldüğünde, matematiksel model ile elde edilen sonuçların üretim sisteminde uygulanması, istenilen üretim hedefine ulaşmayı garanti etmemektedir.

58

Bu çalışmaya ilişkin uygulama, bir elektronik firmasının arka kapak montajı yapan üretim hattında gerçekleştirilmiştir. Mevcut montaj hattı düzenlemesi, montaj hattı yöneticisi tarafından tecrübeye dayalı olarak yapıldığı için, üretim hattının günlük üretim hedefine ulaşması mümkün olmamaktadır. Bu çalışmanın amacı, özellikleri nedeni ile G_MHİADP olarak tanımlanabilecek olan problemin çözümü için yeni bir doğrusal tamsayılı programlama modeli geliştirmek ve geliştirilen modelin sonuçlarını benzetim modeli ile yukarıda bahsi geçen gerçek hayat koşullarında test etmektir.

Çalışmanın geri kalan bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir: Birinci bölümde literatür taraması verilmektedir. İkinci bölümde geliştirilen matematiksel model açıklanmaktadır. Üçüncü bölümde, uygulamanın yapıldığı elektronik firmasının arka kapak montaj hattı tanıtılmakta ve bu montaj hattına ilişkin veriler sunulmaktadır. Dördüncü bölümde, montaj hattının benzetim ile modellenmesi sürecinden bahsedilmektedir. Beşinci bölümde, problemin çözümü için matematiksel model ve benzetim modeli kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar verilmiştir. Son bölümde ise sonuçlar özetlenmektedir.

1. LİTERATÜR TARAMASI

MHİADP ile ilgili ilk çalışma Miralles vd. (2007) tarafından yapılmıştır. Amaç, korunaklı iş merkezlerinde çalışan engellilerin iş yerine adaptasyonlarını sağlamak için bu kişileri iş elemanları ile birlikte uygun iş istasyonlarına atamaktır. Engellilerin yapabileceği iş elemanları ve atanabileceği iş istasyonları bilinmektedir. İşlem süreleri işi yapan kişiye göre değişmektedir. Bu çalışmada, belirtilen kısıtlar altında çevrim süresini enküçükleyen bir tamsayılı programlama modeli önerilmiştir. Ayrıca örnek bir vaka çalışması verilmiştir. Ele alınan problem ilk defa montaj hattı işçi atama ve dengeleme problemi (MHİADP) olarak adlandırılmıştır.

Miralles vd. (2008) tarafından yapılan çalışmada, MHİADP için üç farklı arama stratejisi ile birlikte temel bir dal-sınır algoritması geliştirilmiştir. Büyük ölçekli problemler için dal-sınır algoritması tabanlı bir sezgisel yöntem sunulmuştur. Costa ve Miralles’in (2009) çalışmasında MHİADP’ye iş rotasyonu problemi de dahil edilerek karışık tamsayılı programlama modeli ve sezgisel ayrıştırma yöntemi önerilmiştir. Chaves vd. (2009) MHİADP’yi çözmek için hibrit bir meta-sezgisel yöntem olan kümeleme araması algoritmasını geliştirmiştir. Kümeleme araması, arama alanındaki umut verici bölgeleri tespit etmekte ve yalnızca bu bölgelerde yerel arama yapmaktadır. Bu şekilde daha hızlı çözümler üretebilmişlerdir.

Arau'jo vd. (2012) MHİADP'nin paralel iş istasyonları içeren ve heterojen yapıdaki işçiler arasında işbirliği durumunu da gözeten iki çeşidini tanımlamıştır. Birinci problemde engelli işçilerin montaj hattına daha kolay uyum sağlamaları için, çalıştıkları iş istasyonlarının montaj hattının verimini düşürmeden paralel hale getirilmesi sağlanmıştır. İkinci problemde, paralel iş istasyonu açılmasının mümkün olmadığı durumlar için heterojen yapıdaki işçilerin, belirli bir iş istasyonunda beraber çalışarak yeteneklerini tamamlayabilecekleri işbirlikçi iş istasyonlarının açılmasına izin verilmiştir. Bu iki yeni problem için doğrusal modeller ve sezgisel yöntemler sunulmuştur. Sonuçlar, önerilen yaklaşımların verimliliğini ve yerleşimin etkinliğini göstermektedir.

Moreira vd. (2012), işçi atama ve dengeleme problemi için basit sezgisel yöntemler önermiştir. Mutlu vd. (2013) ise problemin çözümü için yinelemeli genetik algoritma geliştirmiştir. Vila ve Pereira (2014), MHİADP için yeni alt sınırlar, baskınlık kuralları ve indirgemeler içeren bir dal-sınır algoritması geliştirmiştir. Algoritma, standart test problemleri üzerinde denenmiş ve literatürde mevcut en iyi performanslı yöntemlere göre çözüm kalitesinde iyileşme sağlamış, ayrıca mevcut kesin çözüm yaklaşımlarına göre daha fazla sayıda optimal çözüm elde etmiştir. Ramezani ve Ezzatpanah (2015) karışık modelli montaj hattı dengeleme ve işçi atama problemiyle ilgilenmiştir. Farklı ürün modellerinin farklı işlem süreleri vardır; ayrıca farklı çalışan becerileri farklı işlem sürelerine sebebiyet vermektedir. Çalışmada çevrim süresi ile eş zamanlı olarak işçi maliyetlerinin azaltılması amaçlanmaktadır. Bu çok amaçlı problem için hedef programlama yaklaşımı kullanılmış ve çözümü için emperyalist rekabetçi algoritma geliştirilmiştir.

Sungur ve Yavuz (2015), işçi atama ve dengeleme problemine, işçiler arasında yeteneklerine göre bir hiyerarşi olduğu ve iş elemanlarının ancak belli bir hiyerarşideki işçilerle yapılabileceği kısıtlarını dahil etmiştir. Yüksek hiyerarşideki bir işçi daha fazla ücret alırken işi daha hızlı yapmakta, düşük hiyerarşideki işçi ise iş elemanlarını daha uzun sürede daha az ücret alarak yapmaktadır. Bu problemde amaç montaj hattının istenilen çevrim süresi için en düşük maliyetli işçi atamalarını gerçekleştirmektir. Problemin çözümü için tamsayı programlama modeli önerilmiştir.

Ritt vd. (2016), MHİADP'de işçilerin devamsızlık durumlarını dikkate alan iki aşamalı stokastik modelleme yaklaşımını önermiştir. Stokastik modelin çözümü için yerel arama algoritmaları kullanılmaktadır. Yapılan sayısal analizler stokastik modellemenin, montaj hattının verimliliğini arttırdığını ve önerilen algoritmaların pratik boyuttaki örnekler için iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Oksuz vd. (2017), U-tipi MHİADP için montaj hattı verimliliğinin çalışan performansına göre değerlendirilmesini amaç olarak belirlemiştir. İlk olarak, problem doğrusal olmayan bir modelle formüle edilmekte ve sonrasında doğrusallaştırılmaktadır. Ayrıca bu problem için bir yapay arı kolonisi algoritması ve bir genetik algoritma çözümü de önerilmiştir.

Montaj hattı dengeleme problemlerinde işçiden ayrı olarak, farklı kaynaklara da ihtiyaç duyulabilir. Örneğin, bir metali belirli bir genişlik ve şekilde kesebilmek için, bu işin yapıldığı iş istasyonunda, özel bir kesme aletinin de bulundurulması gerekebilir. Böyle bir durumda, montaj hattı dengelemesi yaparken bu kaynakların da iş istasyonlarına atanması gerçekleştirilmelidir. Bu tip problemler, literatürde kaynak kısıtlı montaj hattı dengeleme problemi olarak tanımlanmaktadır. Ağpak ve Gökçen (2005), belirli bir iş istasyonu sayısı ve çevrim süresi kısıtı altında iş elemanlarının ve kaynakların iş istasyonlarına atanmasını içeren montaj hattı dengeleme probleminde, kullanılan iş istasyonu ve kaynak sayısını enküçüklemeye çalışan bir 0-1 tamsayı programlama modeli önermişlerdir. Bu problemin MHİADP'den farkı, iş elemanlarının yapılıırken belirli tipteki kaynaklara ihtiyaç duymasıdır. MHİADP'de ise işçiler becerilerine göre yapabildikleri iş elemanlarının atandığı iş istasyonlarında görevlendirilmektedir. Pekin ve Azizoğlu (2008), her iş elemanı için alternatif ekipman seçeneklerinin bulunduğu montaj hattı dengeleme problemini, toplam ekipman maliyeti ve iş istasyonu sayısını enküçükleyecek şekilde çözmüşlerdir. Çözüm için etkin olarak çalışan bir dal sınır algoritması geliştirmişlerdir. Triki vd. (2017), Pekin ve Azizoğlu'ndaki (2008) probleme benzer bir şekilde, bu sefer Tip II kaynak kısıtlı montaj hattı dengeleme problemi için, çevrim süresini ve montaj hattının birim çalışma zamanı başına düşen maliyetini minimum yapan çok amaçlı bir genetik algoritma önermişlerdir. Corominas vd. (2011), Ağpak ve Gökçen'de (2005) önerilen kaynak kısıtlı montaj hattı dengeleme problemini genelleştirmişlerdir. Bu problemdeki ana yenilik, iş elemanlarını yapmak için tek veya çoklu, alternatif ve/veya eşzamanlı kaynak gereksinimlerinin dikkate alınmasıdır. Ayrıca, iş istasyonlarının ve kaynakların maliyeti göz önünde bulundurulur ve her bir kaynak tipinin sayısı üzerine sınırlar getirilir. Mete ve Ağpak (2013), çift taraflı hatlar için aynı problemi çok amaçlı çözmeye çalışan bir matematiksel model geliştirmişlerdir.

İş elemanlarının ve robotların birlikte iş istasyonlarına atanması problemi robotik montaj hattı dengeleme problemi (RMHDP) olarak tanımlanmaktadır. Bu problemi ilk olarak Rubinovitz ve Bukchin (1993) ele almışlardır. Bu çalışmada, RMHDP için sezgisel bir algoritma geliştirilmiştir. Algoritma, kullanılan iş

istasyonu ve robot sayısını en aza indirmeye çalışmaktadır. Bu problemde, her iş elemanı için birkaç robot alternatifinin mevcut olduğu, her iş istasyonunda tek bir robota izin verildiği ve tüm robotların aynı maliyetlere sahip olduğu varsayılmaktadır. Daha sonra Levitin vd. (2006) ve Gao vd. (2009), Tip II RMHDP için genetik algoritma geliştirmişlerdir. Yoosefelahi vd. (2012), çok amaçlı RMHDP'yi çözmüşlerdir. Daoud vd. (2014) her bir robota uygun iş elemanlarını atayarak montaj hattının verimliliğini en üst düzeye çıkarmaya çalışmışlardır. Son zamanlarda robotik montaj hatlarına ilişkin çalışmalarda, enerji verimliliği, çift taraflı montaj hatları, U-tipi montaj hatları ve karışık modelli hatlar dikkate alınmaktadır (Nilakantan vd., 2015; Li vd., 2016; Çil vd., 2017; Li vd., 2019).

Bu çalışmada, literatürde ele alınan klasik MHİADP'den farklı olarak, işçilerin işe devam bilgisi, iş elemanlarının farklı ekipman gereksinimleri, tek başına bir iş istasyonuna atanması gereken iş elemanlarının bulunması, birlikte yapılması gereken veya birlikte yapılmaması gereken iş elemanlarının bulunması gibi kısıtlar birlikte ele alınmaktadır. G_MHİADP olarak tanımladığımız bu problemin çözümü için bütün bu kısıtları birlikte ele alan bir matematiksel model ve matematiksel model sonuçlarını gerçek hayat koşulları altında test edebilmek için bir benzetim modeli geliştirilmiştir.

2. G_MHİADP İÇİN ÖNERİLEN MATEMATİKSEL MODEL

Bu bölümde, G_MHİADP'ye ilişkin geliştirilmiş olan tamsayı programlama modeli verilmiştir. Modelde iki amaç bulunmaktadır; birinci amaç çevrim süresini enküçükmek iken, ikinci amaç montaj hattında çalışan işçi sayısını enküçükmektir. Model iki amaç fonksiyonunun farklı katsayılarla çarpılmasıyla çözülmektedir. Katsayılar arasındaki ilişki hangi amaç fonksiyonunun daha önemli olduğu ile ilgilidir. Bu problemde, çevrim süresinin en küçük değeri alması daha önemli olduğu için katsayısı diğerine oranla çok daha büyük olmalıdır. Geliştirilen matematiksel modelde, işlem sürelerinin kesin olarak bilindiği ve sistemin klasik bir montaj hattı olduğu varsayılmıştır. Yani, iş istasyonları arası konveyör ile taşımının ve iş istasyonları arasında ara stok alanının kapasitesine ilişkin bir kısıtlamanın bulunmadığı kabul edilmiştir. Bu şekilde kabul edilmesinin sebebi, bu özelliklere sahip bir montaj hattının tamsayı programlama modeli olarak ifade edilmesinin uygun olmamasıdır. Geliştirilen modele ilişkin gerekli notasyon aşağıda verilmiştir:

İndisler;

i, j	İş elemanı numaralarına ilişkin indisler
w	İşçi numaralarına ilişkin indis
s	İş istasyonu numaralarına ilişkin indis
r	Birlikte yapılması gereken iş elemanı kümelerinin numaralarına ilişkin indis, $r = 1, \dots, r_{max}$

Kümeler;

I	İş elemanları kümesi, $i, j \in I$
E	Ekipman gerektiren iş elemanları kümesi, $E \subseteq I$
W	İşçiler kümesi, $w \in W$
S	İstasyon kümesi, $s \in S$
A	Öncelik ilişkileri kümesi, $(i, j) \in A$, i iş elemanı j iş elemanının komşu öncülüdür
L	İş istasyonuna tek başına atanması gereken iş elemanları kümesi
T_r	Aynı iş istasyonuna birlikte atanması gereken r . iş elemanları kümesi
M	Aynı iş istasyonuna atanamayan iş elemanı çiftleri (i, j) kümesi

Parametreler;

n	Toplam iş elemanı sayısı
B_{wi}	w işçisinin i iş elemanını yapıp yapamadığını gösteren 0-1 matrisi
P_i	i iş elemanının süresi
FG_{is}	i iş elemanının yapılabilmesi için gerekli olan ilgili ekipmandan dolayı, i iş elemanının s iş istasyonunda yapıp yapılamadığını gösteren 0-1 matrisi
D_w	w işçisinin işe gelip gelmediğini gösteren 0-1 matrisi
k_1, k_2	Amaç fonksiyonu katsayıları, $k_1 \gg k_2$

Karar değişkenleri;

x_{swi}	i iş elemanını w işçisi s iş istasyonunda yapıyorsa 1; aksi halde 0
y_{sw}	w işçisi s iş istasyonuna atandıysa 1; aksi halde 0
z_{si}	i iş elemanı s iş istasyonuna atandıysa 1; aksi halde 0
C	Çevrim süresi

Önerilen matematiksel model formülasyonu aşağıdaki gibidir;

$$\text{Min } z = k_1 * C + k_2 * \sum_{s \in S} \sum_{w \in W} y_{sw} \quad (1)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{w \in W} x_{swi} = 1 \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{w \in W} y_{sw} \leq 1 \quad \forall s \in S \quad (3)$$

$$\sum_{s \in S} y_{sw} \leq D_w \quad \forall w \in W \quad (4)$$

$$\sum_{w \in W} \sum_{s \in S} s x_{swi} \leq \sum_{w \in W} \sum_{s \in S} s x_{swj} \quad \forall (i, j) \in A \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{w \in W} P_i x_{swi} \leq C \quad \forall s \in S \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I} x_{swi} \leq n y_{sw} \quad \forall s \in S, \forall w \in W \quad (7)$$

$$x_{swi} \leq B_{wi} \quad \forall s \in S, \forall w \in W, \forall i \in I \quad (8)$$

$$\sum_{w \in W} x_{swi} = FG_{is} \quad \forall i \in E, \forall s \in S \quad (9)$$

$$\sum_{j \in I, j \neq i} x_{swj} \leq n(1 - x_{swi}) \quad \forall i \in L, \forall s \in S, \forall w \in W \quad (10)$$

$$x_{swi} = x_{swj} = \dots = x_{swk} \quad \forall (i, j, \dots, k) \in T_r, \forall w \in W, \forall s \in S, r = 1, \dots, r_{max} \quad (11)$$

$$x_{swi} + x_{swj} \leq 1 \quad \forall (i, j) \in M, \forall w \in W, \forall s \in S \quad (12)$$

$$z_{si} = \sum_{w \in W} x_{swi}, \quad \forall s \in S, \forall i \in I \quad (13)$$

$$x_{swi} \in \{0,1\} \quad \forall s \in S, \forall w \in W, \forall i \in I \quad (14)$$

$$y_{sw} \in \{0,1\} \quad \forall s \in S, \forall w \in W \quad (15)$$

Amaç fonksiyonu (1) çevrim süresinin en küçük değeri almasını ve en az işçi ile montaj hattının çalışmasını sağlar. Kısıt (2), her işin, yalnızca tek bir iş istasyonuna, tek bir işçiyle atanabileceğini gösterir. Kısıt (3), her iş istasyonuna en fazla bir işçi atanmasını sağlar. Mevcut montaj hattı düzeninde iş elemanı ataması yapılmayan iş istasyonuna işçi ataması da yapılmamalıdır. Kısıt (4), işe gelmeyen işçinin herhangi bir iş istasyonuna atanmasını engeller. Kısıt (5) ile öncelik ilişkileri kümesine göre, bir işin yapılabilmesi, ancak kendisinden önce yapılması gereken iş elemanları tamamlanınca mümkün olur. Kısıt (6), herhangi bir iş istasyonuna atanan iş elemanlarının toplam süresinin çevrim süresinden kısa olmasını sağlar. Kısıt (7), x_{swi} ile y_{sw} arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Eğer w işçisi s iş istasyonuna atanmadıysa, o iş istasyonuna atanan iş elemanlarının w işçisi ile yapılmasını engeller. Kısıt (8), iş istasyonuna atanan her işin uygun işçi tarafından yapılabilmesini garanti eder. Kısıt (9), ilgili iş elemanının sadece o iş elemanının yapılabilmesi için gerekli olan ekipmanın bulunduğu iş istasyonuna atanmasını garanti eder. Kısıt (10), atandığı iş istasyonunda tek olarak bulunması gereken iş elemanlarının yanına başka iş elemanlarının atanmasını engeller. Kısıt (11), birlikte yapılması gereken iş elemanlarının aynı iş istasyonuna atanmalarını sağlar. Kısıt (12), birlikte yapılmaması gereken iş elemanlarının farklı iş istasyonlarına atanmalarını sağlar. İşin hangi iş istasyonuna atandığı bilgisi x_{swi} karar değişkeni ile dolaylı yoldan elde edilebilmektedir. Bu bilgiyi elde edebilmek için z_{si} karar değişkeninin değeri, matematiksel modele kısıt (13) eklenerek hesaplanmaktadır. Kısıt (14) ve (15), karar değişkenlerinin 0-1 değişken olduğunu gösterir. Bu çalışmadaki matematiksel model benzer özellikleri taşıyan herhangi bir montaj hattına kolaylıkla uyarlanabilecek genel bir biçimde hazırlanmıştır.

Matematiksel model LINGO 15.0 ile çözülmektedir (LINGO, 2013). Montaj hattı yöneticisi, montaj hattındaki ve devam durumundaki değişimleri, matematiksel modele kolayca uyarlamayı ve aynı zamanda modelin çözümüne ilişkin bilgileri kolayca anlaşılabilir bir biçimde Excel hesap tablosu üzerinden

görmeyi istemektedir. Bu nedenle matematiksel modelin Excel ile birlikte çalışması sağlanmıştır. Bu sayede, değişen durumlar için programı çalıştıracak olan kişi sadece Excel dosyasındaki verileri değiştirerek modelin yeniden çalıştırılmasını kolayca sağlayabilecektir. Matematiksel model sonucunda oluşacak olan, işçinin ve işin hangi iş istasyonuna atandığı bilgileri, Excel'de uygun tablolar halinde sunulmaktadır. LINGO programının çıktıları olan işçi-iş istasyonu ve iş elemanı-iş istasyonu atamaları, Excel'de öncelikle iki tane 0-1 matrisi olarak elde edilmektedir. 0-1 matrisleri şeklinde yapılmış olan bu atamaların, montaj hattı yöneticisi tarafından daha kolay takibinin sağlanabilmesi için, bu 0-1 matrislerinden çekilen veriler, işçi ve iş elemanlarının atandığı iş istasyonlarını gösteren yeni bir tabloya Excel makro koduyla dönüştürülmektedir. Matematiksel modelin farklı senaryolar altında çözümüyle elde edilen sonuçlar Bölüm 5.'de detaylı olarak verilmektedir.

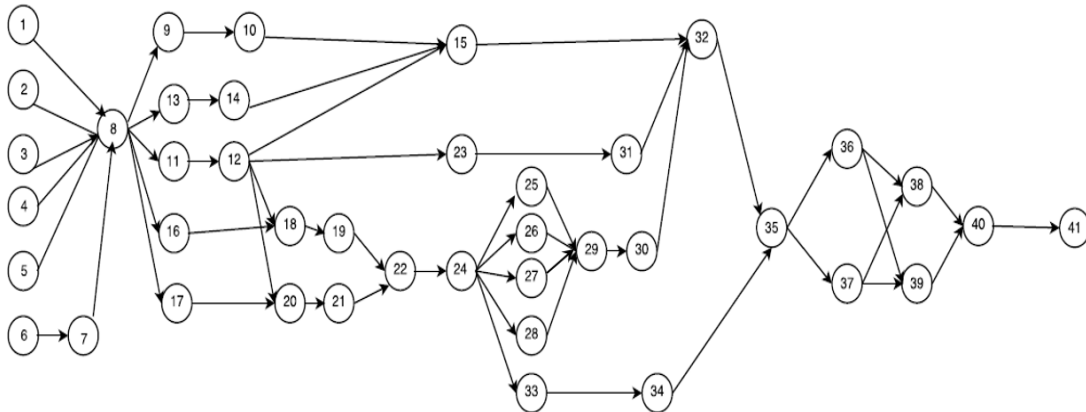
3. ARKA KAPAK MONTAJ HATTININ TANITILMASI

Mevcut montaj hattı fiziksel olarak 19 iş istasyonu biçiminde düzenlenmiştir. Bu montaj hattının personeli olan 19 işçi bulunmaktadır. Ancak bu 19 işçinin, genellikle 16'sı iş istasyonlarında çalışmakta, geri kalanı ise yan görevleri yerine getirmektedir. Bu nedenle montaj hattında bulunan iş istasyonlarının çoğu zaman 16'sına iş elemanları atanmış, kalan üç iş istasyonuna ise herhangi bir iş elemanı atanmamış durumdadır. Bu durum, montaj hattı yönetimine, üretim hızını artırmada esneklik sağlamaktadır. Eğer mevcut koşullar altında montaj hattının hızlanması gerekiyorsa (geciken siparişler, beklenmedik duruşlar vb.), işçi devamsızlığı hız açısından bir sorun yaratıyorsa, yönetim, yan görevlerde çalışan işçilerden bir veya daha fazlasını, bu iş istasyonlarına da iş elemanı ataması yaparak (montaj hattını yeniden dengeleyerek) görevlendirebilmektedir. Ayrıca, bu 19 iş istasyonunun bazılarında, ilgili iş elemanlarının yapılması için gerekli olan ekipmanlar yer almaktadır. Bu sebep ile ekipman bulunan bir iş istasyonuna, o ekipmanla yapılan iş elemanlarının ve o iş elemanlarını yapabilecek olan bir işçinin atanmış olması gerekmektedir. Başka bir deyişle, atamalar sonucu fiziksel olarak boş bırakılan bir iş istasyonunun, ekipman bulunan bir iş istasyonu olması mümkün değildir. Ekipman bulunmayan iş istasyonlarına hangi iş elemanlarının atanabileceği ile ilgili bir kısıtlama bulunmamaktadır. Sadece, ekipman bulunan iş istasyonlarına, o ekipmanla yapılmak zorunda olan iş elemanlarının atanmasına ilişkin kısıtlamalar vardır. Mevcut 19 iş istasyonu, fiziksel olarak bir konveyör ile birbirine bağlanmış durumdadır. İş elemanları, iş istasyonlarında, bu konveyör üzerinde yapılmaktadır ve gecikmeli asenkronize hat kontrolü söz konusudur. İş istasyonları arasında en fazla bir adetlik ara stoğa izin verilmektedir. Bu sebeple bir iş istasyonunun diğer bir iş istasyonuna parça gönderebilmesi için ara stok alanının boş olması gerekmektedir. Aksi halde iş istasyonu bloke olmakta ve ara stok alanı boşalana kadar herhangi bir işlem gerçekleştirilememektedir. Herhangi bir iş istasyonundan sonra boş bir iş istasyonu var ise, o iş istasyonu da bir adetlik ara stok işlevi görmektedir. Başlangıç iş istasyonunda, konveyöre sadece parça yerleştirilmekte ve işlem görmeden bir sonraki iş istasyonuna taşınmaktadır. Montaj hattına yeni bir parçanın girişi, ancak ve ancak, başlangıç iş istasyonunda bulunan parça, bir sonraki iş istasyonuna transfer edildikten sonra mümkün olmaktadır. Son iş istasyonunda işlem gören parça ise konveyörden alınarak test aşamasına geçmek için sistemden çıkartılmaktadır.

3.1. Montaj Hattına İlişkin Veriler

Bir elektronik firmasının arka kapak montajı yapan üretim hattında gerçekleştirilen bu çalışmada, tanımlanan 41 iş elemanı bulunmaktadır. İş elemanlarına ilişkin açıklamalar Ek-1.'de, iş elemanları arasındaki öncelik ilişkileri ise Şekil 1.'de verilmektedir.

Şekil 1: Öncelik İlişkileri Diyagramı



İş elemanlarına ilişkin süreleri tespit edebilmek için, üretim sürecinden her iş elemanı için 30 gözlem alınmıştır. Bu gözlemlerin sayı olarak yeterli olup olmadığına ilişkin testler yapılmış ve her iş elemanı için alınan 30'ar gözlemin yeterli olduğu görülmüştür. Bu gözlemlerden elde edilen ortalama işlem süreleri Tablo 1.'de gösterilmektedir.

Tablo 1: İş Elemanlarının Ortalama Süreleri

İş Elemanı No.	Ortalama Süre (saniye)	İş Elemanı No.	Ortalama Süre (saniye)
1	8.42	22	3.32
2	3.62	23	7.20
3	1.43	24	13.40
4	3.62	25	1.81
5	3.41	26	2.57
6	3.28	27	3.72
7	3.73	28	3.68
8	14.50	29	3.91
9	1.68	30	7.73
10	2.00	31	4.50
11	2.94	32	6.73
12	3.12	33	2.76
13	2.25	34	2.56
14	10.64	35	7.09
15	9.53	36	16.64
16	5.22	37	16.53
17	2.57	38	5.29
18	2.87	39	3.10
19	3.95	40	4.55
20	3.12	41	2.73
21	3.61		

Birlikte aynı iş istasyonunda yapılması gereken iş elemanı çiftleri sırasıyla, 6-7, 18-19, 20-21 numaralı iş elemanlarıdır. Ek-1'de yer alan iş elemanlarına ilişkin açıklamalar incelendiğinde bu iş elemanı çiftlerinin sırasıyla, montajı yapılacak olan elektronik kartın montaja hazır hale getirilmesi ve bu kartın ilgili yere montajının yapılması şeklinde olduğu görülmektedir. Eğer bu iş elemanı çiftleri birbirinden ayrılırsa, kartların bir iş istasyonunda hazırlanıp başka bir iş istasyonunda montajının yapılması gibi bir durum ortaya çıkabilir. Bu durum, elektronik kartın ilgili iş istasyonuna taşınırken kaybolmasına veya zarar görmesine sebep olabilir. Bu nedenle, belirtilen iş elemanı çiftlerinin birlikte, aynı iş istasyonunda yapılması istenmektedir. Farklı iş istasyonlarında yapılması zorunlu olan iş elemanı çiftleri 14-15 numaralı iş elemanlarıdır. Bu iki iş elemanının yapılış pozisyonuyla ilgili farklılıklardan dolayı, aynı iş istasyonunda yer alması istenmemektedir. İstasyonlarda tek başına yapılması gereken iş elemanları ise 8 ve 24 numaralı iş elemanları olarak belirlenmiştir. Bu iş elemanları sırasıyla ışık/titreşim testi ve robot ile kart montajıdır. Bu iş elemanlarının yapıldığı iş istasyonlarında başka iş elemanlarının yer alması, yapılan iş elemanlarının hassasiyeti açısından istenmemektedir.

Montaj hattında toplam 8 adet ekipman bulunmaktadır. Bu ekipmanların hangi iş istasyonlarında buldukları, hangi iş elemanlarının yapılmasında kullanıldıkları bilinmektedir ve Tablo 2.'de gösterilmiştir. Genel olarak, firmanın günlük operasyonları için, bu ekipmanların sürekli yer değiştirmesi söz konusu değildir. Ancak mecburi sebepler nedeni ile bazı ekipmanların (1-“Test cihazı” ve 6-“Robot” numaralı ekipmanlar hariç) yerleri değiştirilebilir.

Tablo 2: Ekipman Listesi

Ekipman No.	İş Elemanı No.	İş Elemanının Açıklaması	İstasyon No.
1	8	Işık ve titreşim testi	4
2	9	Barkod ile ışık testinde hata olup olmadığını belirleme	5
3	22	Kartların modelle eşleşmesi için barkod okuyucusu ile okutma	7
4	18	Güç kartlarını kırarak ayırıştırma	6
5	20	Ana kartı kırarak ayırıştırma	7
6	24	Robot ile kartların montajı	8
7	35	Arka kapağı kapatma	16
8	10	Panel eşleştirme barkodunu okutma	6

İşçilerin yeteneklerine göre yapabildikleri iş elemanları Tablo 3.'de özetlenmiştir. Mevcut durumda montaj hattındaki iş elemanı-ış istasyonu ve işçi-ış istasyonu atamaları ise Tablo 4.'de verilmiştir. Tablo 4.'de görüldüğü üzere, montaj hattında mevcut durumda 16 işçi çalışmaktadır. 6, 12 ve 13 numaralı işçiler montaj hattına ilişkin yan görevleri yerine getirmektedirler. 3, 14 ve 15 numaralı iş istasyonlarına herhangi bir iş elemanı/işçi ataması yapılmamıştır. Montaj hattını kısıtlayan 17 numaralı iş istasyonunun toplam iş istasyonu süresi 16.64 saniyedir. Bu durumda 10 saatlik (36000 saniye) bir vardiyada yaklaşık olarak 2164 adet ürün üretilmesi beklenmektedir. Ancak, bu üretim adedine ulaşmak, iş istasyonları arası konveyör hareketi, kısıtlı ara stok alanları ve işlem sürelerindeki stokastik değişkenlik gibi faktörler nedeni ile mümkün olmamaktadır. Bu durumda montaj hattının etkinliği %80.88 olarak hesaplanabilir. Mevcut durumda montaj hattının vardiyalık üretim miktarı ortalama 1700 adet olarak gerçekleşmektedir. İlgili montaj hattı için, 10 saatlik vardiyadaki üretim hedefi yönetim tarafından 1800 adet olarak belirlenmiştir. Bu hedefe ulaşabilmek için montaj hattının yeniden dengelenmesi gerekmektedir.

Tablo 3: İşçilerin Yapabildikleri İş Elemanları

İşçi No.	İş Elemanı No.	İşçi No.	İş Elemanı No.
1	1-7 arası iş elemanları	11	1-8, 34-41 arası iş elemanları
2	1-8 arası iş elemanları	12	9-14 arası iş elemanları
3	8, 9, 11, 12, 13, 16, 17	13	16-22 arası iş elemanları
4	8-22 arası iş elemanları	14	23, 25-37 arası iş elemanları
5	17-22 arası iş elemanları	15	36-41 arası iş elemanları
6	10, 11, 12, 13, 14, 16, 17	16	Bütün iş elemanları
7	25-31 arası iş elemanları	17	1-8 arası iş elemanları, 22, 23, 25-41 arası iş elemanları
8	25-34 arası iş elemanları	18	9-20 arası iş elemanları
9	15, 23, 29-34 arası iş elemanları	19	24
10	15, 23, 34-41 arası iş elemanları		

Tablo 4: İstasyonlara Göre Mevcut İş Elemanı ve İşçi Atamaları

İstasyon No.	Ekipman No.	Atanan İşçi No.	Atanan İş Elemanı No.	Toplam iş istasyonu süresi (saniye)
1	-	1	1, 2, 3	13.47
2	-	2	4, 5, 6, 7	14.04
3	-	-	-	-
4	1	3	8	14.50
5	2	4	9, 11, 12, 13,16	15.21
6	4, 8	16	10, 17, 18, 19	11.39
7	3, 5	5	20, 21, 22	10.05
8	6	19	24	13.40
9	-	18	14	10.64
10	-	7	25, 26, 27, 28	11.78
11	-	9	23, 29, 31	15.61
12	-	8	30, 33	10.49
13	-	10	15, 34	12.09
14	-	-	-	-
15	-	-	-	-
16	7	14	32, 35	13.82
17	-	17	36	16.64
18	-	11	37	16.53
19	-	15	38, 39, 40, 41	15.67

4. MONTAJ HATTININ BENZETİM İLE MODELLENMESİ

Montaj hattı için benzetim modeli geliştirmenin sebebi, matematiksel modelde dikkate alınamayan, iş istasyonları arası konveyör hareketi, ara stok alanları ve işlem sürelerindeki stokastik değişkenlik gibi faktörleri de dikkate alabilmektir. Bu sayede, matematiksel model ile elde edilen iş elemanı-ış istasyonu atamalarının, montaj hattını, gerçek hayat kısıtları altında, istenilen hedeflere ulaştırıp ulaştırmadığı test edilebilecektir. Bu amaç için geliştirilen benzetim modeli, matematiksel model ile elde edilen iş elemanı-ış istasyonu atamalarını girdi olarak kullanmaktadır. Bu girdi ile çalışan benzetim modeli, istenilen zamanda hedeflenen çıktı miktarına ulaşabiliyor ise matematiksel modelin elde ettiği sonuçlar pratikte uygulanabilir demektir. Eğer benzetim modeli ile istenilen üretim hedefine ulaşamıyorsa, pratikte olurlu çözüm üretebilecek olan yeni öneriler, geliştirilmiş olan benzetim modelinde test edilebilirler. Benzetim modelinin konunun uzmanı olmayan montaj hattı yöneticisi tarafından da kolayca kullanılabilmesi için,

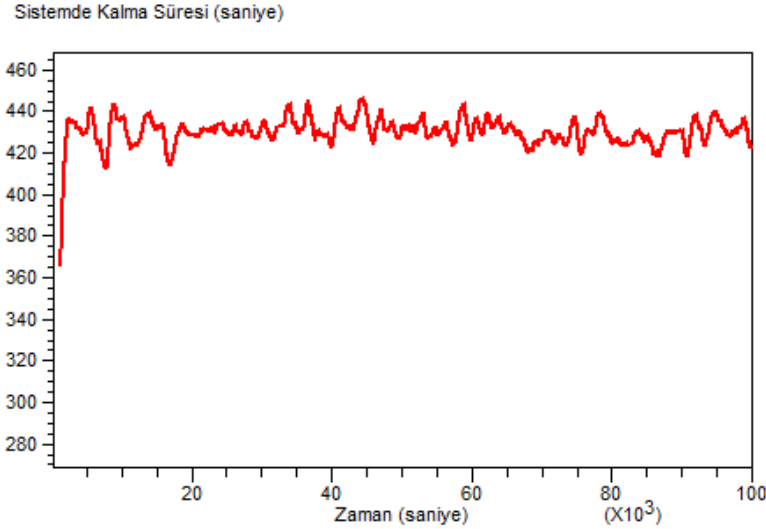
benzetim modeli parametrik ve genel olarak tasarlanmıştır. Benzetim modelinin, farklı iş elemanı-ış istasyonu atamalarına göre yeniden düzenlenebilmesi için, modelin içinde iş istasyonu numaralarını gösteren ilgili yere o iş istasyonuna atanan iş elemanlarının numaralarının yazılması yeterli olmaktadır.

Bu montaj hattının benzetim modelini geliştirebilmek için yapılan çalışmalar üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, 41 adet iş elemanının her birine ilişkin alınmış olan 30'ar gözlemin, hangi istatistiksel dağılımlara uygunluk gösterdiği tespit edilmiştir. Bu işlem için ARENA 15.0 benzetim yazılımının "Input Analyzer" modülü kullanılmıştır. Her bir işe ilişkin alınmış olan gözlemlere, ilgili modülde yer alan Ki-kare iyi uyum testi uygulanmış ve bu gözlem değerlerinin Tablo 5.'de verilen istatistiksel dağılımlara uygunluk gösterdiği belirlenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında, Bölüm 3.'de verilmiş olan montaj hattının işleyişine ilişkin bilgiler ve veriler kullanılarak montaj hattının benzetim modeli oluşturulmuştur. Modeli oluşturmak için ARENA 15.0 benzetim yazılımı kullanılmıştır. Herhangi bir iş istasyonuna atanan iş elemanlarının toplam süresine ilişkin istatistiksel dağılım, o iş istasyonuna atanan her bir işin süresine ilişkin istatistiksel dağılımların toplamı olarak ifade edilmiştir. Çalışmanın üçüncü aşamasında ise, yapılacak olan istatistiksel analizlere temel oluşturacak olan "Benzetim Modeli Tekrar Süresi (BMTSü)", "Benzetim Modeli Isınma Süresi (BMIS)" ve "Benzetim Modeli Tekrar Sayısı (BMTSa)" belirlenmiştir. Montaj hattına ilişkin ilgilenilen performans ölçüleri "Vardiyalık Çıktı Sayısı (VÇS)" ve "Çevrim Süresi (C)" olduğu için, BMTSü, 10 saatlik vardiya süresi ve BMIS'in toplamına eşit olmalıdır. BMIS'i belirleyebilmek için, sisteme ilişkin ARENA modeli 100000 saniye için çalıştırılarak, bu süre içinde sistemden çıkan tüm parçaların, sistemden ne zaman çıktıklarına ve sistemde ne kadar süre kaldıklarına ilişkin veri çiftleri, ARENA 15.0 benzetim yazılımı "Output Analyzer" modülü ile kayıt edilmiş ve Şekil 2.'de verilen grafik elde edilmiştir.

Tablo 5: İş Elemanı Sürelerinin İstatistiksel Dağılımları

İş Elemanı No.	İş Elemanı Sürelerinin Dağılımları (saniye)	İş Elemanı No.	İş Elemanı Sürelerinin Dağılımları (saniye)
1	NORM(8.42, 1.26)	22	NORM(3.32, 0.984)
2	ERLA(0.905, 4)	23	4 + LOGN(3.25, 1.86)
3	0.19 + GAMM(0.462, 2.69)	24	13.4
4	1.44 + 5.02*BETA(1.46, 1.77)	25	1 + 1.87*BETA(1.29, 1.65)
5	2+5*BETA(0.896, 2.11)	26	1+ 3.81*BETA(1.21, 1.7)
6	TRIA(1.48, 3.87, 4.89)	27	2.04 + LOGN(1.7, 0.823)
7	TRIA(2, 2.67, 6.55)	28	2 + WEIB(1.87, 2.04)
8	12 + 5.86*BETA(1.91, 2.43)	29	1+ LOGN(3, 2.25)
9	0.62 + WEIB(1.2, 1.58)	30	5 + ERLA (1.366, 2)
10	TRIA(1, 2.17, 3.35)	31	TRIA(2, 4.51, 6.99)
11	1.15 + 3.85*BETA(1.81, 2)	32	NORM(6.73, 2.07)
12	NORM(3.12, 1.4)	33	1.32 + LOGN (1.47, 0.903)
13	1 + WEIB(1.4, 1.61)	34	1 + 4*BETA(0.983, 1.49)
14	8 + 5.99*BETA(0.972, 1.23)	35	TRIA(4, 8.2, 10)
15	NORM(9.53, 1.34)	36	NORM(16.64, 1.77)
16	NORM(5.22, 1.15)	37	TRIA(13, 15.6, 21)
17	1.21 + ERLA(0.678, 2)	38	2 + GAMM(1.51, 2.17)
18	1 + 6*BETA(0.696, 1.53)	39	NORM(3.10, 0.552)
19	2 + EXPO(1.95)	40	2.54 + GAMM(0.532, 3.78)
20	TRIA(1.52, 2.88, 4.62)	41	1.1+3.57*BETA(1.52,1.77)
21	2 + WEIB(1.83, 1.9)		

Şekil 2: BMIS'in Belirlenmesine İlişkin Grafik



Şekil 2.'de, veri çiftlerine uygulanmış olan 50 gözlemlik hareketli ortalamalar gösterilmektedir. Bu şekilden de anlaşılacağı üzere, ilk 5000 saniyelik süre içinde, parçalar çok beklemeksizin sistemden çıktığı için sistemde kalma süresi göreceli olarak küçük olmakta, sonrasında ise y ekseninde 430 saniye dolaylarında dengeye ulaşmaktadır. Bu sebep ile BMIS 5000 saniye, BMTSü ise bir vardiyaya karşılık gelen 36000 saniye ile 5000 saniyenin toplamı olan 41000 saniye olarak belirlenmiştir. BMTSa ise 20 olarak kabul edilmiştir. Bunun sebebi, benzetim modeli ile yapılan pilot çalışmalarda, ilgilenilen performans ölçüleri, VÇS ve C'nin farklı tekrarlarında çok fazla değişkenlik göstermemesidir. Bu analizler sonucunda, Tablo 4.'de verilmiş olan mevcut duruma ilişkin iş elemanı-ış istasyonu atamaları, benzetim modelinde girdi olarak kullanıldığında ve 20 tekrar yapıldığında Tablo 6.'da özetlenmiş olan sonuçlar bulunmuştur.

Tablo 6: Benzetim Modeli Sonuçları (Mevcut Durum)

	Ortalama	Minimum	Maksimum	(*)%95 GA alt	(*)%95 GA üst
C (saniye)	21.017	20.912	21.102	20.996	21.038
VÇS (adet)	1712.2	1705	1721	1710.45	1713.95

(*)%95 GA alt: %95 Güven aralığı alt sınırı, %95 GA üst: %95 Güven aralığı üst sınırı

Mevcut duruma ilişkin atamaları içeren Tablo 4.'e göre, C'nin 16.64 saniye ve VÇS'nin 2164 adet olması beklenirken, gerçek koşulları da dikkate alan mevcut sisteme ilişkin benzetim modelinin, Tablo 6.'da da gösterildiği gibi, 21.017 saniyelik bir C'ye ve 1712.2 adetlik bir VÇS'ye sahip olduğu görülmektedir. Bir vardiyada 2164 adetlik üretim miktarına ulaşamamanın sebepleri, iş istasyonları arası konveyör hareketi, iş istasyonları arası bir adetlik kısıtlı ara stok alanları ve işlem sürelerindeki stokastik değişkenlik gibi faktörlerdir. Mevcut sistemin benzetim modelinin çalıştırılmasıyla elde edilen 1712.2 adetlik ortalama VÇS, mevcut durumda montaj hattının vardiyalık üretim miktarı olan ortalama 1700 adet ile paralellik göstermektedir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

İlgili montaj hattı için, 10 saatlik vardiyadaki üretim hedefi 1800 adet olarak belirlenmiştir. Bu durumda montaj hattına ilişkin C'nin 20 saniyenin altında olması beklenmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, matematiksel model sonucunda elde edilmiş olan iş elemanı-ış istasyonu atamaları ile istenilen VÇS'ye ulaşmanın mümkün olmayabileceğidir. Bu farklılık, daha önce de açıklandığı gibi, matematiksel modelde dikkate alınamayan konveyörle taşıma, ara stok kapasitesi ve stokastik iş elemanı süreleri gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, öncelikle matematiksel model mevcut koşullar için Bölüm 3.'de verilmiş olan veriler için çözülecek, sonrasında modelden elde edilen iş elemanı-ış istasyonu atamaları, yukarıdaki faktörleri de dikkate alan benzetim modeline girdi olacaktır. Benzetim modeli 20 tekrar için çalıştırılıp VÇS ve C tahmin edildiğinde, eğer hedeflenen VÇS ve C'ye ulaşamadı ise problemin çözümü için yeni önerilere gereksinim olduğu ortaya çıkmış olacaktır.

Problemin matematiksel model ile çözümü aşamasında, Bölüm 2., Eşitlik 1.'de verilen amaç fonksiyonunda yer alan k_1 ve k_2 amaç fonksiyonu katsayılarının değerleri sırasıyla 1000 ve 1 olarak alınmıştır. Bu amaç fonksiyonu ile yapılmak istenen öncelikli olarak C'yi enküçükleme, sonrasında ise montaj hattına atanan toplam işçi sayısını enküçükleme. k_1 ve k_2 değerlerinin bu şekilde alınmasının sebebi şöyle açıklanabilir; çalışmada iş elemanı süreleri 0.01 saniyelik hassasiyette verilmiştir (16.64 saniye gibi). Çevrim süresinde sağlanacak 0.01 saniyelik bir iyileşmenin bu amaç fonksiyonundaki kazancı 10 birim

olacaktır. Montaj hattına atanan toplam işçi sayısını bir işçi azaltmanın kazancı ise 1 birim olacaktır. k_1 ve k_2 amaç fonksiyonu katsayıları arasındaki oran 1000 olarak belirlendiği takdirde, çevrim süresinin mevcut kısıtlar altında en düşük seviyeye indirilmesinden sonra iş istasyonu sayısının enküçüklenmeye çalışılması garanti edilmiş olur. Bir başka deyişle, çevrim süresinin enküçüklenmesine, montaj hattına atanan işçi sayısının enküçüklenmesine göre öncelik verilmiş olur.

Yukarıdaki açıklamalara dayanarak, öncelikle, önerilen tamsayı programlama modeli, LINGO 15.0 optimizasyon yazılımı ile Intel Core I7 – 2.90 GHz işlemcili ve 12 GB hafızaya sahip bir bilgisayarda, 15163 değişken ve 18981 kısıt ile 102 saniyede çözülmüş ve C 16.64 saniye, atanan işçi sayısı ise 15 olarak bulunmuştur. Bu durumda VÇS yaklaşık olarak 2164 adettir. Bu miktar 1800 adetlik hedefin çok üstünde görünmektedir. Ancak, ilgilenilen problemde kullanılan iş elemanları süreleri sebebiyle, k_1 ve k_2 amaç fonksiyonu katsayıları arasındaki oran 1000 olmasa da mevcut amaç fonksiyonuyla elde edilen aynı çevrim süresi ve aynı işçi sayısına ulaşılabilir. Bu durumu gözlemleyebilmek için k_1 ve k_2 amaç fonksiyonu katsayıları arasındaki oran 100, 50 ve 10 olacak şekilde değiştirilerek, matematiksel model yeniden çözülmüştür. Elde edilen sonuçlarda, ulaşılan çevrim süresi ve işçi sayısı değerlerinin, k_1 ve k_2 amaç fonksiyonu katsayıları arasındaki oran 1000 olduğu zaman elde edilen değerlerle aynı olduğu görülmüştür. Hangi iş istasyonuna, hangi işçi ve iş elemanlarının atandığı Tablo 7.'de görülmektedir.

Tablo 7.'de görüleceği üzere, 17 numaralı iş istasyonu, en uzun toplam iş istasyonu süresine sahip darboğaz iş istasyonudur. Bu çözümde, 5, 7, 12 ve 18 numaralı işçiler montaj hattına atanmamıştır ve yan görevlerde çalışmaları sağlanacaktır. Ayrıca, fiziksel olarak, 3, 13, 14 ve 15 numaralı iş istasyonlarına herhangi bir iş elemanı atanmamıştır. Bu iş istasyonları boş iş istasyonu olarak kalacaklardır. Aynı iş istasyonunda yapılması gereken iş elemanları, 6-7, 18-19 ve 20-21, sırası ile 2, 6 ve 7 numaralı iş istasyonlarına atanmışlardır. Farklı iş istasyonlarında yapılması istenen 14 ve 15 numaralı iş elemanları sırası ile 10 ve 12 numaralı iş istasyonlarına atanmışlardır. 8 ve 24 numaralı iş elemanları ise söylendiği gibi tek olarak 4 ve 8 numaralı iş istasyonlarında bulunmaktadır. Bu durumda montaj hattının etkinliği %86.27'dir. Ekipman kullanımı gerektiren iş elemanlarının ilgili iş istasyonlarına atandığı da Tablo 7.'de görülmektedir.

Tablo 7: Matematiksel Model Sonuçları (Birinci Durum)

İstasyon No.	Ekipman No.	Atanan İşçi No.	Atanan İş Elemanı No.	Toplam iş istasyonu süresi (saniye)
1	-	1	2, 3, 4, 5	12.08
2	-	2	1, 6, 7	15.43
3	-	-	-	-
4	1	3	8	14.50
5	2	4	9, 11, 12, 13, 16	15.21
6	4, 8	16	10, 18, 19, 23	16.02
7	3, 5	13	17, 20, 21, 22	12.62
8	6	19	24	13.40
9	-	8	25, 26, 28, 33	10.82
10	-	6	14	10.64
11	-	14	27, 29, 30	15.36
12	-	9	15, 31, 34	16.59
13	-	-	-	-
14	-	-	-	-
15	-	-	-	-
16	7	17	32, 35	13.82
17	-	11	36	16.64
18	-	10	37	16.53
19	-	15	38, 39, 40, 41	15.67

Tablo 7.'de verilmiş olan iş elemanı-ış istasyonu atamaları, benzetim modelinde girdi olarak kullanıldığında ve 20 tekrar yapıldığında Tablo 8.'de özetlenmiş olan sonuçlar bulunmuştur.

Tablo 8: Benzetim Modeli Sonuçları (Birinci Durum)

	Ortalama	Minimum	Maksimum	(*)%95 GA alt	(*)%95 GA üst
C (saniye)	21.029	20.964	21.105	21.008	21.050
VÇS (adet)	1711.40	1705	1717	1709.73	1713.07

(*)%95 GA alt: %95 Güven aralığı alt sınırı, %95 GA üst: %95 Güven aralığı üst sınırı

Tablo 8.'den de görüleceği üzere, matematiksel modelin çözümünden elde edilen iş elemanı-ış istasyonu atamaları ile gerçek koşullar altında istenilen C ve VÇS'ye ulaşamamaktadır. Bu noktada, yeni bir çözüm önerisine gereksinim duyulduğu açıktır. Yeni bir çözüm önerisi sunabilmek için matematiksel model

sonuçları daha detaylı analiz edildiğinde, montaj hattını kısıtlayan 17 numaralı iş istasyonuna sadece 36 numaralı iş elemanının atandığı ve montaj hattına ilişkin C'nin de 36 numaralı iş elemanının süresi olduğu görülmüştür. Bu sebeple iş istasyonu sayısı artırılrsa bile, 16.64 saniyelik 36 numaralı iş elemanı daha küçük parçalara bölünmedikçe, montaj hattına ilişkin C'nin daha düşük bir değer alması mümkün olmayacaktır. 36 numaralı iş elemanı, cihazın arka kapağının 6 vida ile kapatılması işlemidir. 37 numaralı iş elemanı da benzer biçimde tanımlandığından dolayı, arka kapağın kapatılabilmesi için toplamda 12 vidalama işinin yapılması gerekmektedir. Bu aşamada, 17 numaralı iş istasyonu darboğaz olmaktan çıkarabilmek için, toplamda 12 vidalama işini, her birinde 4 vidalama olan 3 işe ayırmak bir çözüm önerisi olabilir. Bu çözüm önerisinde, yeni durumda içinde 4 vidalama işi bulunan 36 ve 37 numaralı iş elemanlarına ek olarak yine içinde 4 vidalama işi bulunan 42 numaralı yeni bir iş elemanı tanımlanmıştır. Yeni probleme, 42 numaralı iş elemanının öncelik ilişkileri de dahil edilerek (42'den önce 35 numaralı iş elemanı, 42'den sonra 38 ve 39 numaralı iş elemanları gelecek şekilde) her üç iş elemanının süreleri, eski durumdaki 36 ve 37 numaralı iş elemanlarının toplam süresinin üçe bölümü ile güncellenmiştir. Sonuç olarak 36, 37 ve 42 numaralı iş elemanlarının süreleri 11.06 saniye olarak hesaplanmıştır (Bu durum için yapılan gözlem ve testler sonunda, bu iş elemanlarının sürelerine ilişkin istatistiksel dağılımlar ise 8.38+WEIB(3.02, 2.44) olarak belirlenmiştir). Ayrıca, 36 ve 37 numaralı iş elemanlarını yapabilecek olan tüm işçilerin (10, 11, 14, 15, 16 ve 17 numaralı işçiler) 42 numaralı yeni işi de yapabileceği varsayılmıştır. Ancak, 7 numaralı ekipmanın yerleşik olarak 16 numaralı iş istasyonunda bulunuyor olması, 35 numaralı işin 7 numaralı ekipman kullanılarak yapılmak zorunda olması ve 35 numaralı iş elemanı yapılmadan, daha büyük numaralı iş elemanlarının öncelik ilişkileri gereği yapılamayacak olması sebepleri ile 7 numaralı ekipmanın yeri değiştirilmeden, bu montaj hattından daha düşük bir C elde etmek, daha az süreli yeni 36, 37 ve 42 numaralı iş elemanlarına rağmen mümkün olmayacaktır. Bu durum şu şekilde açıklanabilir; elimizde 16 numaralı iş istasyonundan itibaren yapılması gereken iş elemanları, yukarıda belirtilen sebeplerden dolayı, 35, 36, 37, 42, 38, 39, 40 ve 41 numaralı iş elemanlarıdır. Tüm montaj hattının çevrim süresinin 16.64' ten daha küçük olabilmesi için, bu 8 iş elemanının, 16.64 saniyeden daha küçük toplam iş istasyonu süreleri ile geri kalan 4 iş istasyonuna (16, 17, 18 ve 19 numaralı iş istasyonları) atanabilmesi gerekmektedir. Öncelik ilişkileri ve iş elemanı süreleri sebebi ile böyle bir durum hiçbir zaman sağlanamamaktadır. Belirtilen 8 işin, 4 iş istasyonu yerine 5 iş istasyonuna atanabilme esnekliğini sağlamak için 7 numaralı ekipmanın 15 numaralı iş istasyonuna taşınması gerekmektedir. Bu yeni düzenleme önerisine göre matematiksel model bu yeni koşullar altında tekrar çalıştırılmış ve 17 işçi ile 14.5 saniyelik C'ye ulaşılmıştır. Yeni duruma ilişkin sonuçlar Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9: Matematiksel Model Sonuçları (İkinci Durum)

İstasyon No.	Ekipman No.	Atanan İşçi No.	Atanan İş Elemanı No.	Toplam iş istasyonu süresi (saniye)
1	-	1	1, 2, 3	13.47
2	-	2	4, 5, 6, 7	14.04
3	-	-	-	-
4	1	3	8	14.50
5	2	12	9, 11, 12, 13	9.99
6	4, 8	16	10, 16, 18, 19	14.04
7	3, 5	5	17, 20, 21, 22	12.62
8	6	19	24	13.40
9	-	-	-	-
10	-	4	14	10.64
11	-	9	23, 33, 34	12.52
12	-	7	26, 27, 28, 31	14.47
13	-	8	25, 29, 30	13.45
14	-	18	15	9.53
15	7	17	32, 35	13.82
16	-	14	36	11.06
17	-	15	42	11.06
18	-	10	37, 39	14.16
19	-	11	38, 40, 41	12.57

Tablo 9'da da görüleceği üzere, 4 numaralı iş istasyonu darboğaz iş istasyonudur. Bu çözümde 6 ve 13 numaralı işçiler atanmamıştır. Fiziksel olarak iş elemanı atanmayan iş istasyonları 3 ve 9 numaralı iş istasyonlarıdır. Bu durumda montaj hattının etkinliği %87.35 olarak elde edilir. Bu tabloda verilmiş olan iş elemanı-ış istasyonu atamaları, benzetim modeline girdi olarak kullanıldığında ve 20 tekrar yapıldığında Tablo 10'da özetlenmiş olan sonuçlar bulunmuştur.

Tablo 10: Benzetim Modeli Sonuçları (İkinci Durum)

	Ortalama	Minimum	Maksimum	(*)%95 GA alt	(*)%95 GA üst
C (saniye)	18.943	18.854	19.052	18.916	18.971
VÇS (adet)	1899.90	1889	1909	1897.13	1902.67

(*)%95 GA alt: %95 Güven aralığı alt sınırı, %95 GA üst: %95 Güven aralığı üst sınırı

Tablo 10.'dan da görüleceği üzere, matematiksel modelin çözümünden elde edilen iş elemanı-ış istasyonu atamaları ile gerçek koşullar altında istenilen C ve VÇS'ye fazlası ile ulaşılabilir. Ancak ilk duruma göre montaj hattına fazladan 2 işçi daha atanmıştır. Daha önce, genel olarak montaj hattında 16 işçinin görev aldığı ve geri kalan 3 işçinin yan görevlere atandığı belirtilmişti. Bu koşulu da sağlayan bir çözüme ulaşabilmek için, zaten olması gerektiğinden daha yüksek bir şekilde elde edilen VÇS'yi istenilen seviyeye indirebilmek için üçüncü bir durum tasarlanmıştır. Üçüncü durumda, matematiksel modele C'nin 15 saniyeden küçük veya eşit olması kısıtı eklenerek, model sadece işçi sayısını enküçüklemek için çalıştırılmıştır. Bu modele ilişkin sonuçlar Tablo 11.'de verilmiştir. Tablo 11.'de de görüleceği üzere, yeni durumda montaj hattında 16 işçi çalışmaktadır ve 5 numaralı iş istasyonu 14.94 saniyelik toplam iş istasyonu süresi ile darboğaz iş istasyonudur. Bu çözümde 5, 12 ve 13 numaralı işçiler atanmamıştır. Fiziksel olarak iş elemanı atanmayan iş istasyonları ise 3, 10 ve 12 numaralı iş istasyonlarıdır. Bu durumda montaj hattının etkinliği %90.08'dir. İkinci duruma göre, montaj hattına atanan toplam işçi sayısı, bir işçi azalmış olmasına ve genelde kullanılan işçi sayısı ile uyumlu hale gelmiş olmasına rağmen, yeni durumun gerçek koşullar altında istenilen hedeflere ulaşip ulaşmadığının benzetim modeli ile tekrar test edilmesi gerekmektedir. Tablo 11.'de verilmiş olan iş elemanı-ış istasyonu atamaları, benzetim modeline girdi olarak kullanıldığında ve 20 tekrar yapıldığında Tablo 12.'de özetlenmiş olan sonuçlar bulunmuştur.

Tablo 11: Matematiksel Model Sonuçları (Üçüncü Durum)

İstasyon No.	Ekipman No.	Atanan İşçi No.	Atanan İş Elemanı No.	Toplam iş istasyonu süresi (saniye)
1	-	1	1, 2, 3	13.47
2	-	2	4, 5, 6, 7	14.04
3	-	-	-	-
4	1	3	8	14.50
5	2	16	9, 11, 12, 23	14.94
6	4, 8	18	10, 16, 18, 19	14.04
7	3, 5	4	17, 20, 21, 22	12.62
8	6	19	24	13.40
9	-	6	13, 14	12.89
10	-	-	-	-
11	-	7	25, 27, 28, 31	13.71
12	-	-	-	-
13	-	8	26, 29, 30	14.21
14	-	9	15, 33, 34	14.85
15	7	17	32, 35	13.82
16	-	14	36	11.06
17	-	10	42	11.06
18	-	11	37, 39	14.16
19	-	15	38, 40, 41	12.57

Tablo 12: Benzetim Modeli Sonuçları (Üçüncü Durum)

	Ortalama	Minimum	Maksimum	(*)%95 GA alt	(*)%95 GA üst
C (saniye)	19.652	19.537	19.718	19.630	19.674
VÇS (adet)	1831.30	1825	1842	1829.21	1833.39

(*)%95 GA alt: %95 Güven aralığı alt sınırı, %95 GA üst: %95 Güven aralığı üst sınırı

Tablo 12.'de de görüleceği üzere, üçüncü durumda, matematiksel model ile elde edilen minimum işçi atamalı (16 işçi) çözüm ile 1800 adetlik üretim hedefine ulaşmak mümkün olmuştur. Benzetim modeli sonuçlarına göre, C'nin 20 saniyenin biraz altında ve bunun sonucu olarak da VÇS'nin 1800 adedin biraz üzerinde olduğu üçüncü durum 16 işçi ile en iyi durum olarak görülmektedir.

SONUÇ

Bu çalışma, bir elektronik firmasına ilişkin montaj hattında, iş elemanlarının/işçilerin iş istasyonlarına atanarak montaj hattının dengelenmesi problemini ele almıştır. Mevcut montaj hattı üzerinde fiziksel olarak yerleştirilmiş 19 iş istasyonu, bu iş istasyonlarına atanmış 41 iş elemanı ve 16 işçi, ilgili iş istasyonlarına yerleştirilmiş 8 ekipman bulunmaktadır. Mevcut montaj hattı düzenlemesi tecrübeye dayalı olarak yapıldığı için, üretim hattının günlük üretim hedefine ulaşması konusunda sorunlar yaşanmaktadır. Bu sorunları çözebilmek için, ilk aşamada, problemin özelliklerine uygun yeni bir doğrusal tamsayılı programlama modeli geliştirilmiştir. Matematiksel modelin amacı, hem çevrim süresini hem de montaj hattında çalışan toplam işçi sayısını en küçükmektir. Modelin çözülmesi sonucunda işçi-iş istasyonu ve iş elemanı-iş istasyonu atamaları elde edilmektedir. İkinci aşamada ise, geliştirilen modelin sonuçlarını, önerilen matematiksel modelde dikkate alınamayan, iş istasyonları arası konveyör hareketi, ara stok alanları ve işlem sürelerindeki stokastik değişkenlik gibi faktörlerin bulunduğu gerçek çalışma koşulları altında, vardiyalık 1800 adet olan üretim hedefine ulaşıp ulaşılamadığını test edebilmek için bir benzetim modeli geliştirilmiştir. Bu benzetim modeli, ilk aşamada elde edilen iş elemanı-iş istasyonu atamalarını girdi olarak almaktadır. LINGO optimizasyon ve ARENA benzetim yazılımları kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, üretim hedefini en düşük işçi sayısı ile sağlayan iş elemanı-iş istasyonu ve işçi-iş istasyonu atamaları elde edilerek mevcut sisteme ilişkin problem çözülmüştür. Gerçek bir montaj hattına ilişkin bir problemin tüm özelliklerini ve gerçek hayat koşulları altındaki tüm kısıtlarını dikkate alan bir matematiksel model geliştirmek çok zor, hatta olanaksızdır. Böyle bir model geliştirilebiliyor bile olsa, çözülecek olan problemin karmaşıklığı önemli derecede artmaktadır. Montaj hattının tüm özellikleri dikkate alınmadığında ise, bu montaj hattının performansını doğru tahmin etmek, matematiksel model ile mümkün olmamaktadır. Bu yüzden, matematiksel model ve benzetim modelinin birlikte kullanımı ile matematiksel modelden elde edilen çözümlerin gerçek performanslarını test etme olanağı ortaya çıkmaktadır.

KAYNAKÇA

- Ağpak, K. ve Gökçen H. (2005), "Assembly Line Balancing: Two Resource Constrained Case", *International Journal of Production Economics*, 96, 129-140.
- Araújo, F.F.B., Costa, A. M. ve Miralles, C. (2012), "Two Extensions for the ALWABP: Parallel Stations and Collaborative Approach", *International Journal of Production Economics*, 140, 483-495.
- Chaves, A. A. , Lorena, L. A. N. ve Miralles, C. (2009), "Hybrid Metaheuristic for the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem", (Ed.) M.J. Blesa, C. Blum, L.D. Gaspero, A. Roli, M. Sampels ve A. Schaerfs, *Hybrid Metaheuristics*, Berlin Heidelberg: Springer, 1-14.
- Corominas, A., Ferrer, L. ve Pastor, R. (2011), "Assembly Line Balancing: General Resource-Constrained Case", *International Journal of Production Research*, 49(12), 3527-3542.
- Costa, A.M. ve Miralles, C. (2009), "Job Rotation in Assembly Lines Employing Disabled Workers", *International Journal of Production Economics*, 120, 625-632.
- Çil, Z.A., Mete, S. ve Ağpak, K. (2017), "Analysis of the Type II Robotic Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem", *Engineering Optimization*, 49, 990-1009.
- Daoud, S., Chehade, H., Yalaoui, F. ve Amodeo, L. (2014), "Solving a Robotic Assembly Line Balancing Problem Using Efficient Hybrid Methods", *Journal of Heuristics*, 20, 235-259.
- Gao, J., Sun, L., Wang, L. ve Gen, M. (2009), "An Efficient Approach for Type II Robotic Assembly Line Balancing Problems", *Computers & Industrial Engineering*, 56, 1065-1080.
- Levitin, G., Rubinovitz, J. ve Shnits, B. (2006), "A Genetic Algorithm for Robotic Assembly Line Balancing", *European Journal Operational Research*, 168, 811-825.
- Li, Z., Tang, Q. ve Zhang, L. (2016), "Minimizing Energy Consumption and Cycle Time in Two-Sided Robotic Assembly Line Systems Using Restarted Simulated Annealing Algorithm", *Journal of Cleaner Production*, 135, 508-522.
- Li, Z., Janardhanan, M.N., Ashour, A.S. ve Dey, N. (2019), "Mathematical Models and Migrating Birds Optimization for Robotic U-Shaped Assembly Line Balancing Problem", *Neural Computing and Applications*, 31, 9095-9111.
- LINGO (2013), *The Modeling Language and Optimizer*, Chicago: LINDO Systems Inc.
- Mete, S. ve Ağpak, K. (2013), "Çok Amaçlı Genelleştirilmiş Kaynak Kısıtlı Çift Taraflı Montaj Hattı Dengeleme Problemi ve Hesaplama Analizi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(3), 567-576.
- Miralles, C., Garcı́a-Sabater, J.P., Andre's, C. ve Cardos, M. (2007), "Advantages of Assembly Lines in Sheltered Work Centres for Disabled. A Case Study", *International Journal of Production Economics*, 110, 187-197.
- Miralles, C., Garcı́a-Sabater, J.P., Andre's, C. ve Cardos, M. (2008), "Branch and Bound Procedures for Solving the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem: Application to Sheltered Work Centres for Disabled", *Discrete Applied Mathematics*, 156, 352-367.
- Moreira, M.C.O., Ritt, M., Costa, A.M. ve Chaves, A.A. (2012), "Simple Heuristics for the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem", *Journal of Heuristics*, 18, 505-524.
- Mutlu, O., Polat, O. ve Supçiller, A.A. (2013), "An Iterative Genetic Algorithm for the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem Of Type-II", *Computers and Operations Research*, 40, 418-426.
- Nilakantan, J.M., Huang, G.Q. ve Ponnambalam, S. (2015), "An Investigation on Minimizing Cycle Time and Total Energy Consumption in Robotic Assembly Line Systems", *Journal of Cleaner Production*, 90, 311-325.
- Oksuz, M.K., Buyukozkan, K. ve 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.
- Pekin, N. ve Azizoglu, M. (2008), "Bi Criteria Flexible Assembly Line Design Problem with Equipment Decisions", *International Journal of Production Research*, 46 (22), 6323-6343.

- Ramezani, R. ve Ezzatpanah, A. (2015), "Modeling and Solving Multi-Objective Mixed-Model Assembly Line Balancing and Worker Assignment Problem", *Computers & Industrial Engineering*, 8, 74-80.
- Ritt, M., Costa, A.M. ve Miralles, C. (2016), "The Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem with Stochastic Worker Availability", *International Journal of Production Research*, 54, 907-922.
- Rubinovitz, J., Bukchin, J. ve Lenz, E. (1993), "RALB—A Heuristic Algorithm for Design and Balancing of Robotic Assembly Lines", *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 42, 497-500.
- Sungur, B. ve Yavuz, Y. (2015), "Assembly Line Balancing with Hierarchical Worker Assignment", *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 290-298.
- Triki, H., Mellouli, A. ve Masmoudi, F. (2017), "A Multi-objective Genetic Algorithm for Assembly Line Resource Assignment and Balancing Problem of Type 2 (ALRABP-2)", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28, 371-385.
- Vilà, M. ve Pereira, J., (2014), "A Branch-and-bound Algorithm for Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problems", *Computers & Operations Research*, 44, 105-114.
- Yoosefelahi, A., Aminnayeri, M., Mosadegh, H. ve Ardakani, H.D. (2012), "Type II Robotic Assembly Line Balancing Problem: An Evolution Strategies Algorithm for a Multi-objective Model", *Journal of Manufacturing Systems*, 31, 139-151.

EK-1. İş Elemanlarına İlişkin Açıklamalar

İş Elemanı No.	İş Elemanlarına İlişkin Açıklama
1	Metali tutucu ile sabitleme
2	Arka metal bantlarını yapıştırma
3	Metal barkodunu yapıştırma
4	Led kablosunu takma
5	Enerji kablosunu takma
6	Kablosuz bağlantı kartını brakete yerleştirme
7	Arka metale kablosuz bağlantı kartı braketini takma
8	Işık ve titreşim test
9	Barkod ile ışık ve titreşim testinde hata olup olmadığını belirleme
10	Panel eşleştirme barkodunu okutma
11	Görüntü kablosunu takma
12	Görüntü kablosunu sabitleme
13	Kaynak tahtası bırakma
14	Kaynak tahtası montajı
15	Ayak metali montajı
16	İzolasyon bandı yapıştırma
17	3 adet soğutucuyu yapıştırma
18	Güç kartlarını kırarak ayrıştırma
19	Güç kartını montajlama
20	Ana kartı kırarak ayrıştırma
21	Ana kart montajı
22	Kartların modelle eşleşmesi için barkod okutulması
23	Hoparlör takma
24	Robot ile kartların montajı
25	Led kablosunu karta takma
26	Enerji kablosunu karta takma
27	Görüntü kablosunu karta takma
28	3 adet tutturucu takılması
29	Kabloların tutturucu ile tutturulması
30	6 adet bant takılması
31	Kabloların bant ile sabitlenmesi
32	220 kablosunun takılması
33	Ana kart üzerindeki jelatinin çıkartılması
34	Braketi ana karta takma
35	Arka kapağın kapatılması
36	6 adet vida ile kapak montajı
37	6 adet vida ile kapak montajı
38	220 kablosunun koruyucusunun çıkartılması
39	2 adet vida takılması
40	Geçici ayak takma
41	220'yi prize takma