



BİR ELEKTRONİK FİRMASINDA PARALEL İSTASYON VE ATAMA KISITLI MONTAJ HATTI DENGELEME ÇALIŞMASI

Şeyda TOPALOĞLU
Gonca TUNÇEL

ÖZET

Bu çalışmada, bir elektronik firmasının montaj hattı dengeleme problemi ele alınmıştır. Firma haftalık müşteri talebini minimum işçilik maliyetiyle karşılayabilmek için hattını yeniden dengelemeye gereksinim duymuştur. Problemin temel özellikleri şu şekildedir: (i) çevrim süresini aşan işlerin atanabilmesi için paralel istasyonlar açılabilir (ii) teknolojik veya ekipman kısıtları nedeniyle birbiriyle bağımlı işler mevcuttur (iii) işler iş parçasının pozisyonuna bağlı olup, bazıları iş parçasının ön, bazıları ise arka bölümünde yapılmaktadır. Amaç hat etkinliğini en büyüklerken, ihtiyaç duyulan toplam operatör sayısını en aza indirmektir. Problem tam sayı programlama modeli olarak formüle edilerek LINGO optimizasyon yazılımı ile çözülmüştür. Ayrıca, günlük ve haftalık fazla mesai, çoklu vardiya (akşam ve gece vardiyası) gibi alternatif çalışma programlarının hattın beklenen işgücü maliyetine etkileri analiz edilmiştir. Önerilen model, haftalık talebi karşılayacak şekilde alternatif iş çizelgelerine göre belirlenmiş çevrim süreleri için ayrı ayrı çalıştırılmıştır. Böylece, en düşük işgücü maliyeti ve en yüksek hat etkinliğini sağlayan çalışma programı belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Montaj hattı dengeleme, Tamsayı programlama, Matematiksel modelleme, İmalat sistemleri, LINGO optimizasyon yazılımı.

ABSTRACT:

In this paper, we present a real-life assembly line balancing problem for an electronics manufacturing company. The main characteristics of the problem are as follows: (i) parallel stations are allowed to overcome the problem of assigning tasks with operation times that exceed the cycle time (ii) some tasks are dependent on each other and they must be assigned to the same station due to technological restrictions or equipment constraints (iii) some of the operations are related to front parts of the workpiece and the others are related to back parts of the workpiece, which in turn make all tasks dependent on the position of the workpiece. The goal is to minimize the total number of workers required, while maximizing the line efficiency. The problem is formulated as an integer programming model and solved using LINGO software. Furthermore, we analyze the effects of alternative work schedules such as daily or weekly over time, multiple shifts on the expected labour cost of the line. The analysis of alternative work schedules with the consideration of balancing the line for corresponding cycle times allows us to select an adequate assembly line for the company, resulting in a lower labour cost and a more balanced line with respect to the operation times in the stations and the activity of the workers. The company has subsequently implemented our proposed schedule, obtaining remarkable improvements in its productivity.

Keywords: Assembly line balancing, Integer programming, Mathematical modeling, Manufacturing systems, LINGO Optimization Software



1. GİRİŞ

Günümüzde, montaj hatları başta otomotiv, beyaz eşya ve elektronik endüstrisi olmak üzere birçok üretim sisteminin temelini oluşturmaktadır. Bir montaj hattı, iş parçalarının işgücü veya malzeme taşıma donanımı aracılığıyla hat boyunca aktarıldığı birbiri ardına sıralanmış bir dizi iş istasyonlarından oluşur. Her bir iş istasyonunda, son ürünü üretmek için belirli montaj operasyonları tekrarlı bir şekilde gerçekleştirilir. Görevler öncelik kısıtları, çevrim zamanı, iş istasyonu sayısı ve görevler arasındaki birtakım uyumsuzlukları içeren bazı ek kısıtlar göz önüne alınarak istasyonlara atanmaktadır. Gerekli görev, işlem zamanları ve önceden belirlenmiş kısıtlara bağlı olarak bir veya daha fazla amacı eniyileyecek şekilde ardışık istasyonlara işlerin atanması işlemi *Montaj Hattı Dengeleme Problemi (MHDP)* olarak adlandırılmaktadır. Hat dengeleme süreci, yüksek verimlilikte ve maliyet etkin bir montaj hattı tasarlamada son derece önemlidir.

Literatürde, montaj hatları hat üzerinde işlem gören ürün modeli sayısına göre tek modelli, karışık modelli ve çok modelli; hattın kontrol yapısına göre gecikmesiz, asenkronize gecikmeli ve senkronize gecikmeli; kurulum sıklığına göre ilk kez dengeleme ve yeniden dengeleme; otomasyon düzeyine göre manüel ve otomatik, hattın yerleşim şekline göre düz, U-tipi ve toplayıcı montaj hatları olarak sınıflandırılmaktadır. Karışık modelli hatlarda aynı üretim sürecine sahip birden fazla ürün modeli, tek modelli hatlarda ise tek tip ürün üretilmektedir. Çok modelli montaj hatlarında ise farklı üretim sürecine sahip bir kaç farklı model yığınlar halinde üretilmektedir. Yeniden dengeleme, üretim programının yapısında bir değişiklik olduğunda gerekli olurken, ilk-kez dengeleme bir montaj hattının kurulum aşamasında gerekli olur. İş parçasının kırılğan olduğu veya endüstriyel robotlar tarafından tutulmadığı durumlarda manüel hatlar kullanılır. Bunun yanı sıra, çalışma ortamının operatörler için güvensiz olduğu iş çevrelerinde ve/veya endüstriyel robotların ihtiyaç duyulduğu yüksek hassasiyet gerektiren işlemler içeren üretim sistemlerinde çoğunlukla otomatik hatlar kullanılmaktadır. U-tipi hatlar, giriş ve çıkışın aynı pozisyonda olduğu u şeklinde düzenlenmiş iş istasyonlarından oluşurken, düz hatlar ise ardışık olarak sıralanmış iş istasyonlarından oluşmaktadır. Bu özellik U-tipi hatları düz hatlardan farklı kılmaktadır. Diğer bir yerleşim şekli ise alt montajlarla bağlantıların olduğu ana bir hattan oluşan toplayıcı hatlardır.

Baybars [3] tarafından önerilen ilk sınıflandırma montaj hattı problemini iki bölüme ayırmaktadır: Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemi (BMHDP) ve Genel Montaj Hattı Dengeleme Problemi (GMHDP). BMHDP’de, işlem süreleri deterministik olup görevlerin gerçekleştirildiği iş istasyonuna bağlı değildir. Ayrıca işlem sürelerinin hiç biri çevrim süresinden büyük değildir. Bütün istasyonlar ekipman, donanım ve işgücü açısından eşdeğer olup, görevler her hangi bir istasyona atanabilirler. Görevler teknolojik öncelik gereksinimlerine uygun olarak atandığı istasyonda gerçekleştirilir, istasyonlar arasında bölüştürülemez. Bu nedenle, BMHD problemleri sadece teknolojik öncelik ve çevrim zamanı kısıtlarını içerir. GMHD problemleri ise görevler arası uyumsuzluk, farklı hat biçimleri, alan kısıtları ya da paralel istasyonlar gibi pek çok ek kısıt ve problem özelliklerini içerir. BMHDP için Scholl ve Becker [20] ve GMHDP için ise Becker ve Scholl [4] tarafından kapsamlı bir inceleme ve literatür taraması sunulmuştur.

Diğer yandan, MHDP amaç fonksiyonuna bağlı olarak çeşitli sınıflara ayrılmaktadır. Bu sınıflandırmaya temel teşkil eden amaçların bir kısmı şu şekildedir; istasyon sayısını minimize etmek (Tip-1), çevrim zamanını minimize etmek (Tip-2), iş yükü dengesini maksimize etmek (Tip-3), iş uyumluluğunu maksimize etmek (Tip-4), ve Tip-3 ve Tip-4’e dayalı çoklu amaçlar (Tip-5). En yaygın MHDP tipi, çevrim zamanı ve istasyon sayısını eş zamanlı olarak minimize ederken hat etkinliğini maksimize etmeyi amaçlayan Tip-E’dir. Diğer bir MHDP tipi, verilen çevrim zamanı ve istasyon sayısı için uygun bir denge bulmaya dayalı olurluk problemidir (Tip-F) [19].

MHD problemlerine çözüm yaklaşımları iki ana grupta incelenebilir: kesin ve yaklaşık yöntemler. Kesin yöntemler, en iyi çözümü bulan ve genellikle dal sınır algoritması [1] gibi ağaç yapısında arama veya dinamik programlama gibi grafik tabanlı yöntemlerden oluşmaktadır. Baybars [3] tarafından BMHDP için en iyi çözümü veren yöntemler incelenmiştir. MHDP için kesin çözüm yöntemleri üzerine bir araştırma ise Scholl [19]’de sunulmuştur.

Yaklaşık yöntemler, sezgisel yaklaşımları ve meta-sezgiselleri içerir. Son on yılda, geniş çeşitlilikte sezgisel yaklaşımlar araştırmacıların odağı olmuştur. Sezgisel yaklaşımlar “konstrüktif” veya “aç



gözlü” prosedürlerden oluşmuştur. Bu prosedürler, görevleri farklı istasyonlara atamak için statik ya da dinamik öncelik kuralından faydalanmaktadır [24]. BMHDP ve GMHDP için sezgisel prosedürler Ghosh ve Gagnon [10] ve Erel ve Sarin [9] tarafından kapsamlı olarak incelenmiştir. Bu prosedürler kısa işlem sürelerinde oldukça iyi çözümler sunmaktadır. Diğer yandan, tabu arama [23], karınca kolonisi optimizasyonu [18], benzetimli tavlama [7], genetik algoritma [13, 22] ve diferansiyel gelişim [16] gibi meta-sezgiseller iyileştirme prosedürleridir.

Son yıllardaki araştırmalar, GMHDP ile karakterize edilmiş daha gerçekçi problemleri tanımlamak, formüle etmek ve çözmek üzerine odaklanmıştır. Üretim ortamlarındaki farklı koşullar nedeniyle montaj hattı sistemleri yüksek oranda çeşitlilik göstermektedir ve gerçek hayat problemlerin gerektirdikleri ile akademik araştırmalar arasında hala bir boşluk bulunmaktadır [4]. Gerçek hayat montaj sistemleri eşzamanlı olarak dikkate alınan pratik genişlemelere gerek duymaktadır. Paralellik kavramı, pratikte MHD çalışmalarının gelişmesinde büyük bir öneme sahiptir. Çok modellen bir hatta paralel hatlar daha iyi bir denge sağlamak ve verimliliği arttırmak için belirli bir ürün ya da ürün ailesi için tasarlanır. Bu durum kurulması gereken hattın sayısı, ürünlerin ve iş gücünün hatlara nasıl paylaştırılacağı gibi karar problemlerini beraberinde getirmektedir. Diğer yandan, görev zamanlarının ihtiyaç duyulan çevrim zamanından daha uzun olduğu durumlar, paralel istasyonları kullanılarak çözülebilir ve bu paralellik sistemin verimlilik oranındaki artışla birlikte çevrim zamanını düşürmeye olanak sağlamaktadır [2, 6]. Çevrim zamanını azaltmanın bir başka yolu, en uzun işlem süresine sahip görevi eş zamanlı gerçekleştirerek paralel görevler düzenlemektir [11]. Ayrıca, paralel durumdaki düz hatlardan oluşan iki taraflı montaj hatları, büyük ölçekli yüksek hacimli ürünler için kullanılabilir [13]. Bu durumda, tek istasyon yerine karşılıklı işleyen istasyon çiftleri paralel olarak kurulmaktadır. Bu tür üretim hatlarında tüm istasyonlar, kalifiye operatörlerden ve aynı iş parçalarında karşılıklı atanan görevleri gerçekleştirmek için gerekli teknolojik yeterlilikte makinelerden oluşmaktadır.

Paralellığe ek olarak, çevrim zamanı ve öncelik ilişkileri kısıtlarının yanında görev atama kısıtları pratik hayatta MHD probleminin diğer bir özelliğini oluşturmaktadır. Özellikle karmaşık ürünlerin üretiminde, her bir istasyona aynı özellikleri sağlamak genellikle mümkün olmaz ve bu durum istasyonla ilgili atama kısıtlarını beraberinde getirmektedir [5]. Örneğin, görevleri gerçekleştirirken iş parçası pozisyon değişikliğine ihtiyaç duyuyorsa, görevler belirli bir istasyon tipine atanmakla kısıtlanabilir ve iş parçası sadece görevin gerçekleşmesi için gerekli pozisyonda konumlu olduğu istasyona atanabilir (pozisyon kısıtı gibi) [14]. Ağır, geniş ve konveyör banda sabitlenmesi nedeniyle her hangi bir pozisyona çevrilemeyen bazı iş parçalarının belirli bir istasyonda yapılması gerekebilir [25]. İstasyon kısıtları için diğer bir durum da; belirli bir istasyona sabitlenmiş ağır makineler ya da taşıma ekipmanlarına ihtiyacı olan görevlerin söz konusu istasyonda gerçekleştirilme zorunluluğudur [21]. Ayrıca, görev atamaları, ya görevleri aynı istasyona atamaya zorlayan ya da birbiriyle uyumsuz görevleri farklı istasyonlara atamayı sağlayan görev tabanlı kısıtları (bölge kısıtları) göz önüne alarak yapılmış olmalıdır [8]. Diğer yandan, zaman içerisinde ölçülen minimum veya maksimum mesafeler, yer ya da istasyon pozisyonları gibi mesafe kısıtlarının da görev atamalarında dikkate alınmasının gerekli olduğu durumlar mevcuttur [6, 17]. Bir başka atama kısıdı türü ise operatörlerin farklı yeteneklere sahip olmasından kaynaklanan operatör atamalarıyla ilgilidir ve görevler ancak gerekli yeteneklere sahip belirli operatörler tarafından yapılabilir [12].

Bu çalışmada, deterministik görev zamanlı, tek modellen, gecikmesiz ve düz hat olarak sınıflandırılmış bir endüstriyel montaj hattı ele alınmıştır. Bu sınıflandırmaya ek olarak, ele alınan problemle ilgili temel özellikler şu şekildedir: (i) paralel istasyonlar, (ii) görev atama kısıtları, (iii) istasyon kısıtları. Kullanılan toplam istasyon sayısını minimize etmek amacıyla öncelik ve çevrim zamanı kısıtları dışında bu üç ilave kısıdı da içeren bir matematiksel model geliştirilmiştir. Çalışma şu şekilde düzenlenmiştir: İkinci bölümde bir elektronik firmasının montaj hattı tanıtılmış ve dengeleme probleminin temel özellikleri açıklanmıştır. Üçüncü bölümde, ilgili problem için bir tamsayı programlama modeli geliştirilerek modelin formülasyonu oluşturulmuştur. Toplam işgücü maliyeti üzerindeki alternatif iş çizelgesinin etkisi dördüncü bölümde analiz edilmiştir. Son olarak, sonuç ve değerlendirmeler beşinci bölümde sunulmuştur.

2. PROBLEM TANIMI

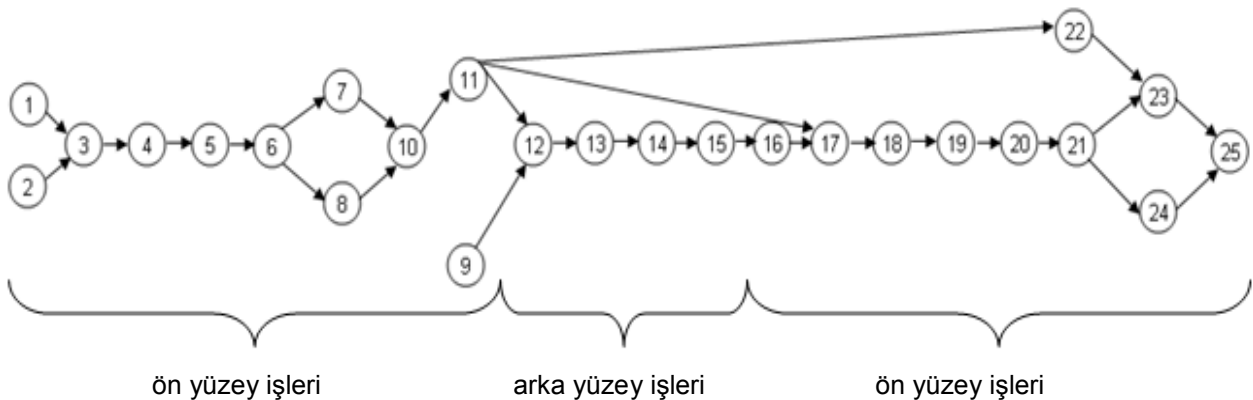
Bu çalışmada, Manisa'da bulunan ve Avrupa'nın önde gelen tüketici elektroniği üreticisi olan bir firmanın montaj hattı dengeleme problemi incelenmiştir. Firmanın ürünlerini üç grupta sınıflandırabiliriz: ilk grup masaüstü/dizüstü bilgisayar, monitör ve notebook ürünlerini içeren digital computing, ikinci grup DVD, DVB, DivX Player ve Recorder ürünlerini içeren digital media; ve son olarak backlight (panel üretiminde kullanılan yarı ürün) ve panel ürünlerini içeren digital display'dir.

Bu makalede, digital display üretim hattının montaj hattı dengeleme problemi ele alınmıştır. Firma minimum işgücü maliyetiyle haftalık müşteri talebini karşılamak için hattı yeniden dengelemeye ihtiyaç duymuştur. Üretim alanı dört ana bölümden oluşmaktadır: (1) malzeme temizlik alanı, (2) backlight alanı, (3) mekanik montaj ve (4) final test alanı. Malzeme hazırlık ve backlight montajında kullanılacak tüm malzemeler ilk olarak malzeme temizlik alanından geçmek zorundadır. Burada, yüzeydeki tozları temizlemek için malzemeler, iyonizeli hava sıkın hava duşlarından geçirilir. Backlight montajında kullanılacak malzemelerin bazıları malzeme hazırlık alanında hazırlanır ve sonra backlight montaj hattına transfer edilir. Bu hatta, flüoresanlar, yansıtıcılar, filmler ve yan-alt-üst destek elemanları takılır ve sonra ürüne panel ön camı, kartlar ve çerçevelerin takıldığı mekanik montaj hattına transfer edilir. Bitmiş ürünler, belirli bir sürede ve belirli bir sıcaklıkta beklemesi için bir ısı odasına transfer edilir. Bu ısı işleminden sonra, ürünler soğumaları ve kalite testleri için test alanına gönderilmesi için soğutma alanına alınır. Testi geçen ürünler paketlenir ve depoya transfer edilir.

Montaj hattı dengeleme probleminin genel özellikleri ve varsayımları aşağıdaki gibidir:

- Montaj hattında tek bir model veya ürünün üretimi gerçekleşmektedir.
- İşler arasındaki öncelik ilişkileri bilinmektedir.
- İşlem süreleri deterministiktir.
- İş parçası bir iş istasyondan diğerine bantlı konveyör üzerinde sabit hızla taşınmaktadır.
- Çevrim süresinden daha uzun süreli işler için paralel istasyonlar açılabilir.
- Bazı işler birlikte aynı istasyonda yapılmak zorundadır.
- Bazı işler iş parçasının ön yüzeyinde, bazıları arka yüzeyinde yapılmaktadır.
- Bazı işler tek başına bir istasyona atanmalıdır.
- Firmanın amacı, iş istasyonu sayısını dolayısıyla operatör sayısını minimize etmeye çalışırken hat etkinliğini maksimize etmektir.

Şekil 1' de işlerin yapılış sırasını gösteren öncelik ilişkileri diyagramı verilmektedir. İşlem sürelerini tespit etmek için detaylı bir zaman etüdü çalışması yapılmıştır. Tablo 1'de işlem süreleri, bir işten hemen önce yapılması gereken işler (öncül işler) ve iş parçasının duruş pozisyonuyla (ön yüz, arka yüz) ile ilgili bilgiler verilmektedir.



Şekil 1. Öncelik İlişkileri Diyagramı

**Tablo 1.** Problem Verileri

İş	İşlem süresi	Öncül işler	İş parçası pozisyonu (Ön yüz/Arka yüz)
1	13.59	-	Ö
2	8.74	-	Ö
3	50.24	1, 2	Ö
4	31.43	3	Ö
5	34.31	4	Ö
6	22.17	5	Ö
7	11.89	6	Ö
8	17.66	6	Ö
9	19.80	-	Ö
10	8.65	7, 8	Ö
11	11.05	10	Ö
12	5.51	9, 11	A
13	36.00	12	A
14	23.69	13	A
15	30.59	14	A
16	8.51	15	Ö
17	43.24	16, 11	Ö
18	70.12	17	Ö
19	26.22	18	Ö
20	34.08	19	Ö
21	11.61	20	Ö
22	24.87	11	Ö
23	31.81	21, 22	Ö
24	57.92	21	Ö
25	12.95	23, 24	Ö

Montaj hattının çevrim süresi firmanın istediği üretim hızına göre önceden belirlenir. Hattan çıkan ürüne olan talep haftada 4000 parçadır. Bu talebi karşılamak için 8 saatlik bir iş vardiyasında saatte 100 parça üretilmelidir. Bu durumda çevrim süresi (C) parça başına 36 saniyeye karşılık gelmektedir. Tablo 1'de de görüldüğü gibi bazı işlerin işlem süreleri çevrim süresini aştığı için, bu işler için paralel birer istasyon daha kurulmasına ihtiyaç vardır. Böylelikle her iki istasyonda paralel olarak aynı işler yapıyor olacaktır.

Montaj sisteminde iki tane iş atama kısıtlaması bulunmaktadır: a) 18. iş istasyonda tek başına yapılmalıdır b) 24. ve 25. işler aynı istasyona atanıp, bu istasyona teknolojik kısıtlar ve işlerin hassasiyetinden dolayı başka hiçbir iş atanmamalıdır.

Ele alınan problem çerçevesinde *istasyon kısıtlaması* işler yapılırken iş parçalarının konumlandırılmasına ilişkindir. İstasyon pozisyon kısıtı olarak da düşünülebilir. Bu yüzden, iş parçasının üst yüzeyinde yapılan işler ayrı istasyonlarda, arka yüzeyinde yapılan işler ayrı istasyonlarda gruplandırılmalıdır. Bu şekilde gruplandırmanın sebepleri: ürün pozisyonunun çok sık değiştirilmesinden dolayı üründe oluşacak bozulmaları engellemek, pozisyon değişikliğinden dolayı harcanan süreyi azaltmak.

3. ÖNERİLEN TAMSAYI PROGRAMLAMA MODEL

Bu bölümde, elektronik firmasının bir önceki bölümde söz edilen gerçek hayat montaj hattı dengeleme problemi için tamsayı programlama modeli geliştirilmiştir.



Formülasyonda kullanılan notasyon aşağıdaki gibidir:

N	problemdaki toplam iş sayısı
J	açılabilir maksimum iş istasyonu sayısı
i	işler için indis, $i = 1, \dots, N$
j	iş istasyonları için indis, $j = 1, \dots, J$
C	çevrim süresi
t_i	i işin işlem süresi
P	Öncül iş ilişkisi içerisinde olan iş çiftleri (i, k) kümesi
m_{max}	maksimum paralel iş istasyonu sayısı
F	ön yüzey işleri kümesi
B	arka yüzey işleri kümesi
A	iş istasyonuna tek başına atanması gereken işler kümesi
T	aynı istasyona başka işler olmaksızın birlikte atanan iş çiftleri (i, k) kümesi

Karar değişkenleri

x_{ij}	1 eğer i iş j istasyona atanırsa; 0 diğer türlü, $i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, J$
a_j	1 eğer j istasyon ön yüzey işleri için kullanılırsa; 0 diğer türlü, $j = 1, \dots, J$
e_j	1 eğer j istasyon arka yüzey işleri için kullanılırsa; 0 diğer türlü, $j = 1, \dots, J$
z_j	1 eğer j istasyona paralel bir istasyon açılırsa; 0 diğer türlü, $j = 1, \dots, J$

Önerilen matematiksel model formülasyonu aşağıdaki gibidir:

Amaç fonksiyonu

$$\text{Min } \sum_{j=1}^J (e_j \cdot j + a_j \cdot j + z_j) \quad (1)$$

Öyle ki:

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

$$\sum_{j=1}^J j \cdot x_{kj} - \sum_{j=1}^J j \cdot x_{ij} \geq 0 \quad (3) \quad \forall (i, k) \in P$$

$$\sum_{i=1}^N x_{ij} \cdot t_i \leq C \cdot (a_j + e_j) + C \cdot z_j \quad (4) \quad \forall j (j = 1, 2, \dots, J)$$

$$a_j + e_j \geq z_j \quad (5) \quad \forall j (j = 1, 2, \dots, J)$$

$$a_j + e_j \leq 1 \quad (6) \quad \forall j (j = 1, 2, \dots, J)$$

$$\sum_{i \in F} x_{ij} \leq |F| \cdot (1 - e_j) \quad (7) \quad \forall j (j = 1, 2, \dots, J)$$

$$\sum_{i \in B} x_{ij} \leq |B| \cdot (1 - a_j) \quad (8) \quad \forall j (j = 1, 2, \dots, J)$$

$$\sum_{j=1}^J z_j \leq m_{max} \quad (9)$$

$$N \cdot x_{ij} + \sum_{k=1, k \neq i}^N x_{kj} \leq N \quad (10) \quad \forall i \in A$$

$$N \cdot (x_{ij} + x_{kj}) + \sum_{l=1, l \neq i \wedge l \neq k}^N x_{lj} \leq 2N \quad (11) \quad \forall (i, k) \in T$$

$$x_{ij} = x_{kj} \quad (12) \quad \forall (i, k) \in T \text{ and } \forall j (j = 1, 2, \dots, J)$$



$$x_{ij}, a_j, e_j, z_j \in \{0,1\}$$

$$(13) \quad \forall i,j \quad (i = 1,2, \dots, N, j = 1,2 \dots J)$$

Amaç fonksiyonu (1) belirlenmiş olan iş çevrim süresine göre ön yüzey ve arka yüzey işlerin gerçekleşeceği iş istasyonları ile paralel kurulacak iş istasyonlarının sayısını minimize etmektedir. 2. kısıt her işin sadece bir istasyona atanmasını sağlamaktadır. 3. kısıt işler arasındaki öncelik ilişkilerini sağlamaktadır; burada i . iş k . işin öncülüdür. 4. kısıta göre işler j . istasyona ancak o istasyon kullanılıyorsa atanabilir. Ayrıca, j . istasyona atanan işlerin toplam süresi çevrim süresinden daha küçük ya da eşit olmalıdır. Paralel istasyon açma durumunda, atanabilecek toplam işlem süresi çevrim süresinin iki katına kadar artırılabilir. Daha önceden de belirtildiği gibi, bu kısıt özellikle çevrim süresinden uzun işlem sürelerine sahip işler bulunduğu gereklidir. 5. kısıt paralel iş istasyonunun, ancak ve ancak ön yüzey ya da arka yüzey iş istasyonunun açılması durumunda kullanılabilmesini garantilemektedir. 6. kısıta göre bir istasyon ya ön yüzey ya da arka yüzey işlemlerin yapıldığı bir iş istasyonu olarak açılabilir. 7. kısıt ön yüzey işlerinin arka yüzey pozisyon kısıtlı iş istasyonlarına atanmasını engellemektedir. Aynı şekilde, 8. kısıt arka yüzey işlerinin ön yüzey pozisyon kısıtlı iş istasyonlarına atanmasını engellemektedir. 9. kısıt açılacak paralel iş istasyonu sayısını sınırlandırmaktadır. 10. kısıt tek başına yapılacak işleri bir istasyona, 11. ve 12. kısıtlar ise çiftler halinde yapılan işleri bir istasyona atamaktadır. 13. kısıt 0-1 değişkenlerini ifade etmektedir.

Bu çalışmada matematiksel model benzer özellikleri taşıyan herhangi bir montaj sistemine kolaylıkla uyarlanabilecek şekilde genel bir yapıda verilmektedir. Örneğin, bizim problemimizde toplam paralel istasyon sayısı için bir sınırlama bulunmamaktadır. Bu yüzden, 9. kısıt için $m_{max} = 25$ olarak alınmaktadır. 10-12. kısıtlar atamayla ilgili ilave kısıtlamaları modele dahil etmektedir.

4. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölüm iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda, matematiksel model 36 saniyelik çevrim süresi için MHDP'ni çözmek üzere LINGO 9.0 [15] optimizasyon paketinde çalıştırılmıştır. Bu çevrim süresi için elde edilen Tablo 2'deki çözüme göre 20 operatörle %90 hat etkinliğine ulaşılmaktadır. Toplam 11 tane başlıca iş istasyonu açılmakta; bunlardan ikisi (1. ve 6. istasyonlar) tek başına, diğerleri ise paralel iki istasyon şeklinde iki operatör atanarak açılmaktadır.

İkinci bölümde, aynı problem alternatif çalışma programlarına (yani fazla mesai ve/veya Cumartesi günü çalışma, gün içinde birden fazla vardiya) karşılık gelen farklı çevrim süreleri için çözülmüştür. Bu şekilde, toplam işgücü maliyeti farklı çalışma stratejilerine göre karşılaştırılmıştır. Normal bir çalışma vardiyası 8 saat ve saatlik işçilik ücreti 5\$'dır. Bir operatör için günlük çalışma maliyeti ise 40\$'dır. Normal vardiyanın üzerine iki saate kadar fazla mesai yapılabilir ve Cumartesi günleri de maksimum 8 saate kadar çalışılabilir. Fazla mesai için ödenen işçilik ücreti normal işçilik ücretinin %50 fazlası olup, saatlik 7.5\$'a karşılık gelmektedir. Tablo 3'de farklı çevrim sürelerine göre bulunan hat etkinlikleri, operatör sayıları ve haftalık işgücü maliyetleri verilmektedir.

Tablo 3'de de görüldüğü gibi 36 saniyelik çevrim süresine karşılık gelen, günde bir vardiya şeklinde çalışma programı, 4000\$ ile en düşük haftalık işgücü maliyetini vermektedir. Eğer fazla mesai ya da gün içinde birden fazla vardiyayı içeren bir opsiyon en düşük maliyeti vermiş olsaydı, firmanın üretime devam etmesi için katlanılan tüm genel giderlerin de dikkate alınması gerekecekti.

**Tablo 2.** İşlerin İstasyonlara Atanması

İş istasyonu	İş	İşlem süresi	Toplam zaman	Operatör sayısı
1	2	8.74	28.54	1
	9	19.80		
2	1	13.59	63.83	2
	3	50.24		
3	4	31.43	65.74	2
	5	34.31		
4	6	22.17	71.42	2
	7	11.89		
	8	17.66		
	10	8.65		
5	11	11.05	65.20	2
	12	5.51		
	13	36.00		
6	14	23.69	30.59	1
	15	30.59		
7	16	8.51	51.75	2
	17	43.24		
8	18	70.12	70.12	2
9	19	26.22	60.30	2
	20	34.08		
10	21	11.61	68.29	2
	22	24.87		
	23	31.81		
11	24	57.92	70.87	2
	25	12.95		
Toplam işlem zamanı			646.65	20

**Tablo 3.** Farklı Çevrim Süreleri İçin Toplam İşgücü Maliyetleri

Çevrim süresi	Hat etkinliği	İş istasyonu sayısı	Paralel iş istasyonu sayısı	Gerekli operatör sayısı	Gerekli haftalık işgücü saati	Haftalık işgücü maliyeti
C = 36	0.90*	11	9	20	5*8 saat	4,000*
C = 43.2	0.83	10	8	18	5*8 saat + 8 saat Cumartesi	4,680
C = 45	0.80	10	8	18	5 * (8 saat + 2 saat fazla mesai)	4,950
C = 52.2	0.83	8	7	15	5*(8 saat + 2 saat fazla mesai) + 8 saat Cumartesi	5,025
C = 72	0.82	7	4	11	2 vardiya (8 saat/vardiya)	4,400
C = 108	0.75	7	1	8*	3 vardiya (8 saat/vardiya)	4,800

SONUÇ

Klasik montaj hattı dengeleme literatürü genellikle basit montaj hattı problemi üzerine odaklanmıştır; fakat son yıllarda daha gerçekçi problemleri içeren çalışmalar giderek artmaktadır. Bu çalışmada, paralel iş istasyonlu endüstriyel bir montaj hattı sisteminin, hat dengeleme problemi formüle edilip çözülmektedir. İlk olarak, verilen bir çevrim süresi için öncelik ilişkilerini, pozisyon kısıtlarını ve diğer atama kısıtlarını dikkate alarak toplam operatör sayısını minimize edecek şekilde, montaj işlerinin seri hatta atamasını gerçekleştiren bir tamsayı programlama modeli önerilmiştir. Daha sonra, farklı çalışma şekillerine karşılık gelen alternatif çevrim süreleri için problemimiz çözülmüş ve elde edilen sonuçlar toplam işgücü maliyeti ve hat etkinliğine göre karşılaştırılmıştır. Pratikte montaj sistemleri maliyet fonksiyonları, ekipman seçimi, senkronize işler, alternatif prosesler, iş rotasyonu, karışık model üretimi ve maliyet/kar odaklı birden fazla amaç fonksiyonu gibi ilave özellikler ile karakterize edilmektedir. Gelecek araştırmalarda komplike gerçek hayat problemlerinin bu ilave özelliklerle nasıl ele alınacağı ve etkin bir şekilde pratik durumlara entegre edilebileceği incelenmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] AMEN, M., "Cost-oriented assembly line balancing: Model formulations, solution difficulty, upper and lower bounds", *European Journal of Operational Research*, 168, 747-770, 2006.
- [2] ASKIN R. G. ve ZHOU M., "A parallel station heuristic for the mixed-model production line balancing problem", *International Journal of Production Research*, 35, 3095-3106, 1997.
- [3] BAYBARS, I., "A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem", *Management Science*, 32, 909-932, 1986.
- [4] BECKER, C. ve SCHOLL, A., "A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing", *European Journal of Operational Research*, 168, 694-715, 2006.
- [5] BUKCHIN, J. ve TZUR, M., "Design of flexible assembly line to minimize equipment cost", *IIE Transactions* 32, 585-598, 2000.
- [6] BUXEY, G.M. "Assembly line balancing with multiple stations", *Management Science*, 20, 1010-1021, 1974.
- [7] ÇAKIR B., ALTIPARMAK F., ve DENGİZ B., "Multi-objective optimization of a stochastic assembly line balancing: A hybrid simulated annealing algorithm", *Computers & Industrial Engineering*, 30, 376-384, 2011.



- [8] DECKRO, R.F., "Balancing cycle time and workstations", IIE Transactions 21, 106-111, 1989.
- [9] EREL, E. ve SARIN, S. C., "A survey of the assembly line balancing procedures", Production Planning and Control, 9, 414-434, 1998.
- [10] GHOSH, S. ve GAGNON, R. J., "A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems", International Journal of Production Research, 27, 637-670, 1989.
- [11] INMAN, R.R. ve LEON, M., "Scheduling duplicate serial stations in transfer lines" International Journal of Production Research, 32, 2631-2644, 1994.
- [12] ISKANDER, W.H. ve CHOU, J., "Unbalanced production line scheduling with partial job specialization", Naval Research Logistics 37, 789-805, 1990.
- [13] KIM Y.K., SONG W.S., ve KIM J.H., "A mathematical model and a genetic algorithm for two-sided assembly line balancing" Computers & Operations Research, 36, 853-865, 2009.
- [14] LAPIERRE, S.D. ve RUIZ, A.B., "Balancing assembly lines: An industrial case study", Journal of the Operational Research Society, 55, 589-597, 2004.
- [15] LINGO User's Guide. Lindo Systems Inc., Chicago, Illinois, 2004.
- [16] NOURMOHAMMADIA, A. ve ZANDIEHB, M., "Assembly line balancing by a new multi-objective differential evolution algorithm based on TOPSIS", International Journal of Production Research, 49, 2833-2855, 2011.
- [17] PASTOR, R. ve COROMINAS, A., "Assembly line balancing with incompatibilities and bounded workstation loads", Ricerca Operativa 30, 23-45, 2000.
- [18] SABUNCUOGLU, I., EREL, E., ve ALP, A., "Ant colony optimization for the single model U-type assembly line balancing problem", Intern. Journal of Production Economics, 120, 287-300, 2009.
- [19] SCHOLL, A., "Balancing and sequencing of assembly lines", New York: Springer-Verlag, 1999.
- [20] SCHOLL, A. ve BECKER, C., "State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing", European Journal of Operations Research, 168, 666-693, 2006.
- [21] SCHOLL, A., FLIEDNER, M., ve BOYSEN, N., "Balancing assembly lines with assignment restrictions", European Journal of Operational Research, 200, 688-701, 2010.
- [22] SURESH, G., VINOD, V.V., ve SAHU, S., "A genetic algorithm for assembly line balancing", Production Planning and Control, 7, 38-46, 1996.
- [23] SUWANNARONGSRI, S. ve PUANGDOWNREONG, D., "Optimal assembly line balancing using tabu search with partial random permutation technique", International Journal of Management Science and Engineering Management, 3(1), 3-18, 2008.
- [24] TALBOT, F.B., PATTERSON, J.H., ve GEHRLEIN, W.V., "A comparative evaluation of heuristic line balancing techniques", Management Science, 32, 430-454, 1986.
- [25] WANG, F. ve WILSON, R.C., "Comparative analyses of fixed and removable item mixed model assembly lines", IIE Transactions 18, 313-317, 1986.

ÖZGEÇMİŞ

Şeyda TOPALOĞLU

Doç.Dr. Şeyda Topaloğlu Dokuz Eylül Üniversitesi (DEÜ), Endüstri Mühendisliği Bölümünde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. Aynı bölümden Yüksek Lisans Derecesini Temmuz 1997 ve Doktora Derecesini Temmuz 2003 tarihlerinde almıştır. Başlıca araştırma konuları şöyledir: matematiksel programlama, çizelgeleme, montaj hattı dengeleme, yöneylem uygulamaları.

Gonca TUNÇEL

Yrd.Doç.Dr.Gonca Tunçel Dokuz Eylül Üniversitesi (DEÜ), Endüstri Mühendisliği Bölümünde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. Aynı bölümden Yüksek Lisans Derecesini Ağustos 1999 ve Doktora Derecesini Aralık 2005 tarihlerinde almıştır. Bir yıl süreli Post-doktora çalışmasını, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG) - Laboratory G-SCOP, Fransa'da Ağustos 2007'de tamamlamıştır. Başlıca araştırma konuları şöyledir: kesikli olay sistemlerinin modellenmesi ve analizi, üretim planlama ve çizelgeleme, kurumsal kaynak planlama, esnek imalat sistemleri, montaj hattı dengeleme, lojistik / tedarik zincirlerinde karmaşıklık ve risk yönetimi.