

# SÜRDÜRÜLEBİLİR DENGİ İÇİN ERGONOMİK FAKTÖRLERİ İÇEREN U-TİPİ MONTAJ HATTI DENGELMESİ

**Banu GÜNER<sup>a</sup>, Servet HASGÜL<sup>b</sup>**

<sup>a</sup> Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

<sup>b</sup> Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir  
**badogan@anadolu.edu.tr, shasgul@ogu.edu.tr**

(Geliş/Received: 13.05.2011; Kabul/Accepted: 18.11.2011)

## ÖZET

Bu çalışmada, U-tipi montaj hattı dengeleme problemi için, işçilerin performans değerlerini, harcadığı enerji miktarlarını ve görevler arasındaki uyumsuzluk ilişkilerini dikkate alan yeni bir matematiksel model sunulmaktadır. U-tipi montaj hattı dengeleme problemiyle ilgili çoğu araştırma istasyon sayısını azaltmayı amaçlamaktadır. Ancak, bu durum işçiye aşırı iş yükü atanmasına neden olabilmektedir. İşçiye atanan iş yükü kapasitesini aştığında, yorgunluk ve dikkatsizlik görülebilir ve bu yüzden hattın üretim hızının değişmesi olasılığı, kalite problemleri ve iş kazaları riski artabilir. Sözü edilen bu problemlerin üstesinden gelebilmek ve sürdürülebilir dengeyi sağlamak için ergonomik faktörleri de içeren yeni bir tam sayılı programlama modeli önerilmiştir. Bu faktörleri dikkate alan çeşitli model varyasyonları literatürden alınmış test problemleri üzerinde uygulanmıştır. Önerilen modelin, U-tipi montaj hatlarında işçilere görev atama kararlarının verilmesinde yararlı olacağı sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** U-tipi montaj hattı, montaj hattı dengeleme problemi, ergonomik faktörler, sürdürülebilir denge

## U-TYPE ASSEMBLY LINE BALANCING WITH ERGONOMIC FACTORS FOR BALANCE STABILITY

### ABSTRACT

In this paper, we present a new mathematical model of U-type assembly line balancing problem based on the performance factors of the operators, the amount of energy used and incompatibility between the tasks. Many researchers worked on U type line balancing problems are focused on minimizing of number of workstations. However, this may cause overloaded work assignments to workers. Excess workload may cause fatigue and carefulness and consequently output rate of the line fluctuates, quality problems arise, and risk of work accidents is increased. In order to tackle with the mentioned problems and to provide the stability, an integer programming model that includes some ergonomic factors is proposed. In this study, model versions are examined by considering ergonomic factors on test problems from the literature. We conclude that the suggested model may be very useful to make decisions on allocating tasks to workers in U-type assembly lines.

**Key words:** U-type assembly line, assembly line balancing problem, ergonomic factors, balance stability

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geleneksel hat dengeleme probleminde modellenen üretim hattı düz olarak biçimlendirilmiştir. İşletmelerde yerleşim, işgücü ve benzeri kısıtlardan dolayı geleneksel montaj hatları istenen verimlilik ve esnekliği sağlamakta yetersiz kalmaktadır. Bunun için

çok fonksiyonlu işçilerden yararlanma çabasında olan firmalar genellikle U-tipi montaj hattı yerleşimini benimserler. Geleneksel düz montaj hatlarının U-tipi yerleşim biçiminde düzenlenmesiyle, işçiler düz bir hat yerleşiminde mümkün olmayan görev birleştirmelerini yerine getirebilmek üzere U hattının iki kolu arasında hareket edebilmektedirler. Bu

esneklik TZÜ felsefesini benimseyen firmalara, tesislerinde toplam işçi sayılarını azaltma yeteneği ve daha etkin bir tesis düzenlemesi imkanı verir. U-tipi hat yerleşiminin pek çok yararı olmasına karşın literatürde genellikle istasyon sayısını azaltmak amaç olarak benimsenir, oysa istasyon sayısının azaltılması işçilere daha fazla yük atanması anlamına gelmektedir. Atama sırasında işçilere fiziksel veya zihinsel olarak daha fazla yük ataması yapıp yapılmadığı dikkate alınmamaktadır. Öncelik ilişkileri, iş elemanı süreleri ve çevrim süresi temel alınarak hattın dengelenmesi sağlanır.

Dengeleme sonrasında hattın üretim hızının planlananla aynı olup olmadığı ve bunun kararlılığı tamamıyla işçi performanslarına bağlıdır. Bir işçiye fazla yük atandığında işçinin fizyolojik kapasitesinin aşılması yorgunluğa, yorgunluk ise insanın psikolojik özelliklerinin bozulmasına neden olur. Bu bozulma yapılan işe karşı; bıkkınlık, bitkinlik, isteksizlik, beceriksizlik, işten kaçma şeklinde yansır. Bir süre sonra hattın üretim hızında değişme, üretilen üründe kalite problemleri, termin sürelerinde sapmalar ortaya çıkar. Bahsedilen nedenlerle U-tipi montaj hatlarının dengelenmesinde insan faktörü göz ardı edilmemelidir.

Bu çalışma, U-tipi montaj hatlarının dengelenmesinde göz önünde bulundurulabilecek ergonomik faktörlerin araştırılmasını ve bu faktörlerden bazılarını içeren bir modelin, Urban'ın [1] tam sayılı programlama modelini temel alarak geliştirilmesini içermektedir. Geliştirilen model küçük ve orta büyüklükteki problem türleri için test edilmiş ve sonuçlar tartışılmıştır. Burada sayısal testlerin amacı model performansını ya da çözüm sürelerini test etmek değil, modelin uygulanabilirliğini görmek olmuştur.

## 2. U-TİPİ MONTAJ HATLARI (U-TYPE ASSEMBLY LINES)

Montaj işleminin yapılabilmesi için gerekli işler, bu işlerin aldıkları süreler ve aralarındaki öncelik ilişkileri verildiğinde, işlerin bir performans ölçüsü eniyilenecek şekilde sıralı iş istasyonlarına atanması, montaj hattı dengeleme problemi olarak tanımlanmaktadır [2].

Donanımın ve iş istasyonlarının yerleşim biçimi, hat tipindeki üretimleri etkileyen önemli bir etmendir. Hattın bulunduğu yer ve üretilecek ürünün özellikleri hattın alacağı şekli belirler. Fiziksel montaj hatları değişik biçimlerde tasarlanabilir. Son yıllarda işletmelerin tam zamanında üretim ilkesini uygulamaya başlaması ile geleneksel düz hatların yerini U tipi hatlar almaya başlamıştır. Bu yerleşim tipinin benimsenmesi U-tipi montaj hatlarının dengelenmesi problemini ortaya çıkarmıştır. Literatürde U-Tipi montaj hattı dengeleme konusunda çok sayıda çalışma mevcuttur.

Bu konuda ilk çalışma Miltenburg ve Wijngaard [3] tarafından ortaya konan dinamik programlama yaklaşımıdır. Basit U-tipi montaj hattı dengeleme probleminde eniyi çözümü sunan bir diğer yöntem ise Urban [1] tarafından geliştirilen tam sayılı programlama modelidir. U-tipi montaj hattı dengeleme problemi üzerine bir başka çalışma Gökçen ve Ağpak'ın [4] hedef programlama yaklaşımıdır.

Problemin NP-Hard yapıda olması nedeniyle, büyük boyutlu problemlere daha kısa sürede çözüm bulabilmek için, çeşitli sezgisel ve meta-sezgisel algoritmaları içeren çalışmalar mevcuttur. Sezgisel ve meta-sezgisel yöntemler için Ajenblit ve Wainwright'ın [5] U-tipi hat dengeleme problemi için önerdiği genetik algoritma, Scholl ve Klein'in [6] dal-sınır prosedürünü kullanan ULINO (U Line Optimizer) sezgiseli, Ağpak ve Gökçen'in [7] U tipi montaj hattı dengeleme problemlerini çözebilecek şekilde uyarlanmış (U-COMSOAL) algoritması ve Aase vd.'nin [8] dal-sınır algoritmasını kullanan sezgisel çalışmaları örnek olarak verilebilir.

Geleneksel hat dengeleme problemi ile U-tipi montaj hattı dengeleme problemi arasındaki anahtar fark, görevlerin atanmasıyla ilgilidir. Geleneksel hat dengeleme probleminde atanabilir görevler kümesi öncülleri atanmış görevlerden oluşmaktadır. U tipi montaj hattı dengeleme probleminde, atanabilir görevler kümesi, öncülleri atanmış görevler kümesi ile ardılları atanmış görevler kümesinin birleşiminden oluşmaktadır. İstasyona atanacak işler düz hatlardakinden farklı olarak bu bileşik kümeden seçilir.

Geleneksel düz hatların yerine tasarlanması biraz karmaşık da olsa U-tipi montaj hatlarının tercih edilmesinin çeşitli yararları vardır. Bu tür hatların başlıca yararları şu şekilde sıralanabilir [3, 9]:

- Yerleşim nedeniyle çalışanların birbirleriyle daha rahat görsel temas ve iletişim kurmaları sağlanır. Kalite problemleri ortaya çıktığında işçilerin birbirleriyle yardımlaşmaları daha kolaydır ve hızlı bir şekilde problemi çözebilirler.
- Çalışanlar U-tipi hatlarda birçok farklı işi yerine getirebilecek veya birçok farklı makineyi kullanabilecek yüksek beceriye sahip hale gelirler. Çalışanlar birden fazla işi yerine getirebilme düzeyine ulaştıklarında işler arasındaki ilişkileri daha derinlemesine kavramaktadırlar. Bu kavrama, işçilerin süreç iyileştirme ve geliştirme faaliyetlerine daha etkin katkıda bulunmalarını sağlar.
- Tam zamanında üretim uygulamasının sonucunda talepteki değişikliklere uyum sağlanabilmesi kolaylaşır. U-tipi hattın üretim hızı hatta yeni işçi ilave edilmesi veya işçi eksiltilmesi ile düzenlenebilir.

- U hatlarda ihtiyaç duyulan istasyon sayısı geleneksel hatlarda ihtiyaç duyulandan daha azdır. Çünkü U-tipi hatlarda işlerin istasyonlarda gruplandırılması için daha fazla yol vardır.

Stokların azaltılması, malzeme taşımalarının basitleştirilmesi, üretim planlaması ve kontrolünün kolaylaştırılması, takım çalışması ve çalışanların problem çözmeye daha yatkın olması, daha iyi kalite kontrol sağlanması gibi birçok sebepten dolayı U-tipi hatlar geleneksel düz hatlara tercih edilmektedir.

### 3. U-TİPİ MONTAJ HATLARI İÇİN ERGONOMİK FAKTÖRLER (ERGONOMİC FACTORS FOR U-TYPE ASSEMBLY LINES)

Gunther vd. [10], sanayide çalışan mühendislere uyguladıkları anket sonucunda, hat dengelemeye ilişkin oluşturulan amaç ve kısıtların pek çok gerçek hayat problemi için yetersiz kaldığını göstermiştir.

Problem çözümlerini basitleştirmek için, Boudreau vd.'nin [11] çalışmalarında vurguladıkları gibi insana yönelik pek çok varsayım yapılmaktadır. (İnsanlar deterministiktir, birbirlerinden fiziksel ve psikolojik olarak etkilenmezler, öğrenme ve problem çözme yeteneği yoktur, vb.). Bu varsayımlar insan faktörü ve çalıştıkları iş sistemi arasındaki etkileşimin göz ardı edilmesine neden olmaktadır. İnsan faktörünün dikkate alınması, hem çalışanlara yönelik çözümler hem de üretkenlikte artış sağlayacaktır.

İnsan performansı, fiziksel ve zihinsel iş yükünün her ikisinden de yoğun şekilde etkilenebilir. Ağır iş yükü insanda genellikle yorgunluk ve strese yol açabilir ve korkunç sonuçlara neden olabilir. Kritik görevleri yerine getirirken yetersizlik, güçsüzlük ortaya çıkabilir. Hafif iş yükü, dikkat eksikliği ve bıkkınlık nedeniyle hatalar ortaya çıkarabilir [12]. Tüm bunlar dikkate alındığında, montaj hatlarında işçilere iş yükü açısından daha dengeli atama yapılması gerekmektedir.

Montaj hatlarının tasarımında ve dengelenmesinde insan faktörünü dikkate alan çalışmaların sayısı çok azdır. Karşılaşılan çalışmalardan ilkinde, Corominas vd. [13], talepteki mevsimsel değişikliklere uyum sağlayabilmek amacıyla geçici işçi çalıştıran işletmelere yönelik bir tamsayı doğrusal programlama modeli sunmuşlardır. Modelde, geçici işçilerin görevleri yerine getirme sürelerinin sürekli işçilerden fazla oluşu dikkate alınmıştır.

Choi [14], işlerin tekrar etme sıklığı ve ağırlığından, çevresel sebeplerden ve uygunsuz vücut pozisyonlarından (posture) kaynaklanan risk faktörlerini dikkate alarak karma modellenli montaj hatları için hedef programlama yaklaşımı ile çözüm aramıştır.

Costa ve Miralles [15], engelli işçilerden etkin olarak faydalanabilmesi için, montaj hatlarında iş rotasyonunu belirleme amacıyla, bu işçilerin görev süreleriyle ilgili performanslarını içeren karma tamsayı doğrusal model ve sezgisel bir ayrıştırma modeli önermişlerdir.

U-tipi montaj hatlarını dengelerken, istasyonlara atanan işçilere yüklenen işlerin ergonomik olarak dengeli dağıtılıp dağıtılmadığına pek önem verilmemektedir. Eğer dengeleme yapıldığında ergonomik olarak işçilere kaldırabileceğinden fazla yüklenme yapılmışsa bir süre sonra yorgunluk görülecek, bu da dengeden sapmalara neden olacaktır. İşçinin aşırı yorgunluktan dolayı dikkatinde dağılmalar olduğunda, iş kazaları meydana gelecek ya da kalite problemleri oluşmaya başlayacaktır. Bu nedenle özellikle U-tipi hatlarda görevleri çok daha farklı şekillerde gruplama imkanı olduğundan, ergonomik faktörler ve daha da gerçekçi bir dengelemenin önemi artmaktadır.

Göz önünde bulundurulacak ergonomik faktörler dengeleme sırasında modele eklendiğinde, daha insancılaştırılmış bir denge elde etmek mümkün olacaktır.

Modele eklenerek ergonomik iyileşme sağlanabilecek kısıtlar aşağıda listelenmiştir:

- İşçilere atama yaparken işi daha az sıkıcı (ya da daha ilgi çekici) hale getiren işleri dağıtmak
- Aynı iş alanına ya da işçiye çeşitli fiziksel aktivite gerektiren atamalardan sakınmak
- Ortak gereç kullanılan iş elemanlarını aynı istasyona atamak
- Ortak parça kullanılan iş elemanlarını aynı istasyona atamak
- Benzer beceri gerektiren iş elemanlarını aynı istasyona atamak
- Eş zamanlı hareket gerektiren iş elemanlarını birlikte gruplandırmak
- İşçilere atanacak işler için toplam zorlanmayı dengeli dağıtmak
- İşlerin risk düzeylerini dikkate almak
- Çalışanların fizyolojik özelliklerinden kaynaklanan kısıtları dikkate almak
- Dikkat gerektiren işlere kalifiye işçileri atamak
- Uyumsuz işleri aynı istasyona atamamak vb.

### 4. MODEL VE PROBLEMİN ÇÖZÜMÜ (MODEL AND SOLVING THE PROBLEM)

Çalışma, U-tipi montaj hatlarının sürdürülebilir şekilde dengelenmesi amacıyla bazı ergonomik faktörleri içeren bir modelin, Urban'ın [1] tamsayı programlama modelini temel alarak geliştirilmesini içermektedir. İzleyen başlıklarda Urban'ın modeli ve eklenecek kısıtlar tanıtılmaktadır.

#### 4.1. Urban'ın Tamsayı Programlama Modeli (Urban's Integer Programming Model)

Basit U tipi hat dengeleme probleminde en iyi çözümü sunan yaklaşımlardan birisi, Urban [1] tarafından geliştirilen, tam sayılı programlama modelidir. Urban'ın modelinde amaç;  $m$  adet ( $j = 1, \dots, m$ ) iş istasyonuna atanacak ve tamamlanma süreleri  $t_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) olan  $n$  tane işlem olduğu varsayıldığında, verilen 1. tip problem (çevrim süresinin sabit olduğu, en küçük istasyon sayısının araştırıldığı) için ihtiyaç duyulan istasyon sayısının,  $m^*$ ,  $C$  çevrim süresi içinde enküçüklenmesidir.

Model:

$$\text{Min } Z = \sum_{j=[m_{\min}]+1}^{m_{\max}} z_j \quad (1)$$

Kısıtlar;

$$\sum_{j=1}^{m_{\max}} (x_{ij} + y_{ij}) = 1 \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n t_i (x_{ij} + y_{ij}) \leq C \quad j = 1, \dots, [m_{\min}] \quad (3a)$$

$$\sum_{i=1}^n t_i (x_{ij} + y_{ij}) \leq C z_j; \quad j = [m_{\min}] + 1, \dots, [m_{\max}] \quad (3b)$$

$$\sum_{j=1}^{m_{\max}} (m_{\max} - j + 1) (x_{rj} - x_{sj}) \geq 0 \quad \forall (r, s) \in P \quad (4a)$$

$$\sum_{j=1}^{m_{\max}} (m_{\max} - j + 1) (y_{sj} - y_{rj}) \geq 0 \quad \forall (r, s) \in P \quad (4b)$$

$$x_{ij}, y_{ij}, z_j \in \{0,1\} \quad \forall i, j \quad (5)$$

Burada;

$i$  görevler indisi,  
 $j$  istasyonlar indisi,  
 $n$  toplam görev sayısı,  
 $m_{\max}$  en büyük iş istasyonu sayısı,  
 $m_{\min}$  teorik olarak ihtiyaç duyulan en küçük istasyon sayısı,  $m_{\min} = \frac{\sum_i t_i}{C}$

$C$  çevrim süresi,  
 $P = \{1, \dots, p, \dots, |P|\}$ : Öncelik ilişkilerini yansıtan düzenlenmiş iş çiftlerinin kümesi  $\{p = (r, s), r$  işlemi  $s$  işleminden hemen önce gelmektedir.

$x_{ij}$  asıl öncelik diyagramındaki  $i$  işin  $j$  istasyona atanması durumunda 1, diğer durumlarda 0.

$y_{ij}$  hayali öncelik diyagramındaki  $i$  işin  $j$  istasyona atanması durumunda 1, diğer durumlarda 0.

$z_j$   $j$  İstasyondan yararlanılması durumunda 1, diğer durumlarda 0.

Modelin amacı ihtiyaç duyulan istasyon sayısının enküçüklenmesidir. 2 numaralı kısıt kümesi her işlemin, ya asıl öncelik diyagramında ya da hayali diyagramda [1], sadece bir istasyona atanmasını sağlar. 3 numaralı kısıt kümesi her bir istasyona atanan işlemlerin sürelerinin toplamının çevrim süresini aşmamasını sağlar. 4 numaralı kısıt kümesi işlemler arasındaki öncelik ilişkilerinin uygulanmasını sağlar. 5 numaralı kısıt kümesi ise 0-1 tamsayı kısıtlarıdır.

#### 4.2. Yeni Kısıt Önerileri (The New Constraint Suggestions)

Çalışmada, sürdürülebilir bir denge elde edebilmek için dengeleme sırasında ergonomik faktörlerin dikkate alınması gerektiği vurgulanmaktadır. Bu ergonomik faktörlerden bazıları için yeni kısıtlar geliştirilmiştir. Aşağıda sıralanan bu kısıtların dikkate alınmasıyla, işçilere atanan fazla iş yüklerinin önüne geçilmesi ve daha insancıl bir atamanın yapılması hedeflenmektedir.

#### 4.3. Görevler arasındaki uyumsuzluk ilişkilerinin dikkate alınması (Consideration of the incompatibility relations between tasks)

Montaj hatlarında yerine getirilecek görevler arasında uyumsuzluk ilişkileri bulunabilmektedir. Örneğin görevlerden bazıları kirli el işi iken bazıları temiz el işi olabilir [13]. Bu tür görevlerin aynı istasyonda gruplanması durumunda, işçiler kirli el işini yerine getirdikten hemen sonra elini temizlemeli ve temiz el işini yapmalıdır. Bu durum işçinin hem iş yükünü artıracak hem de stresin ve strese bağlı pek çok sorunun ortaya çıkmasına neden olacaktır. Bu gibi görevlerin aynı istasyonda gruplanması uygun olmayacaktır. Uyumsuzluk ilişkisine sahip görevlere bir başka örnek de; aynı istasyonda gruplandığında işçinin vücut konumunu iş süresince değiştirmesine izin vermeyecek, aynı kas gruplarının sürekli gergin kalmasına neden olabilecek görevlerdir. İş ve işyeri düzenlemelerinde vücut konumunun en az yorucu, en az enerji harcamayı gerektiren konum olması gerekmektedir. Konum ne kadar doğru belirlenmiş olsa da, iş süresinde vücut konumunun değiştirilebileceği, aynı kas gruplarının sürekli gergin kalmayacağı bir düzenleme oluşturulmalıdır [16]. Bu tür görevlerin aynı istasyona atanmasının, o istasyondaki tekrarlı görevleri yerine getiren işçinin kas ve iskelet sisteminde sorunlara yol açması olağandır. Bu durumu önleyecek kısıt izleyen şekilde yazılabilir:

$U$ : uyumsuz işlerden oluşan ikili görevler kümesi olmak üzere;

$$(x_{aj} + y_{aj}) + (x_{bj} + y_{bj}) \leq 1 \quad \forall (a, b) \in U \quad (6)$$

Açıklanan sebeplerle uyumsuzluk ilişkisi bulunan ya da farklı bir ergonomik sebepten işçinin yükünü artıran görevlerin aynı istasyona atanması bu kısıt yoluyla engellenecektir.

#### 4.4. Görevlerin enerji gereksinim düzeylerinin dikkate alınması (Consideration of the required energy level of tasks)

Görevler için ihtiyaç duyulacak enerji gereksinimleri işin yapısına göre birbirinden farklılık gösterebilir. Bu durumda süre olarak kısa fakat enerji gereksinimi açısından zor görevleri aynı istasyonda grupladığımızda işçiye kaldırılabileceğinden fazla yük atanabilir. Bu da zaman içinde işçinin yorulmasına, dikkatinin dağılmasına hatta iş kazalarına sebep olabilir. Bu nedenle görevlerin yapısına göre ihtiyaç duyacakları enerji miktarları göz önünde bulundurulurken atama yapılmalıdır. Burada temel amaç, işçilerin işleri yapmak için harcayacakları enerji miktarlarını istasyonlara dengeli bir şekilde dağıtarak, aşırı zorlanmayı önlemektir. Modelde;

$e_i$   $i$  görevi için saniyede ihtiyaç duyulan enerji miktarı,

$E$  her bir istasyona atanabilecek toplam enerji düzeyi için bir sınır değer,

olmak üzere; enerji gereksinimine ilişkin eklenen kısıtlar şu şekildedir:

$$\sum_{i=1}^n t_i e_i (x_{ij} + y_{ij}) \leq E \quad (7a)$$

$$j = 1, \dots, [m_{min}]$$

$$\sum_{i=1}^n t_i e_i (x_{ij} + y_{ij}) \leq E z_j \quad (7b)$$

$$j = [m_{min}] + 1, \dots, [m_{max}]$$

Her bir istasyona atanabilecek toplam enerji düzeyi için üst sınırı temsil eden  $E$  parametresi için, sürekli performans sınırını geçmeyecek bir değer kullanılması gerekmektedir. Sürekli performans sınırı iş hekimliğine göre şu şekilde tanımlanır: Sürekli performans sınırı, enerji sunumu ve gereksiniminin dengede kaldığı, çok fazla yorulmadan ve özel molalara gereksinim göstermeden 8 saatlik bir vardiya boyunca yapılabilen en büyük işi ifade eder. Sekiz saatlik vardiya süresince beklenilebilir, umulabilir sürekli performans sınırı olarak erkeklerde ~8600 kJ enerji, kadınlarda ~5800 kJ enerji değerleri literatürde kabul görmüş en büyük değerlerdir [16].

#### 4.5. İşgörenlerin farklı özelliklerinin dikkate alınması (Consideration of the different characteristics of employees)

Montaj hattı dengeleme problemi için geliştirilen pek çok yöntemde, işçilerin görevleri standart sürede

tamamladıkları varsayılır. Ancak, tecrübe, beceri, yaş ya da cinsiyet gibi niteliklere bağlı olarak görevler standart sürede tamamlanamayabilir.

Corominas vd.'ne göre [13], geçici işçiler görevleri tamamlamak için kalıcı işçilerden daha fazla süreye ihtiyaç duyarlar, yani görev süresi görevi yapan işçi tipine bağlı olarak değişir. Çalışmamızda ise her işçinin işler için farklı performans değeri olduğu göz önüne alınmıştır (engelli işçi, stajyer, yabancı işçi, yarım günlük çalışan, kadrolu işçi gibi özel gruplar da performans değerlerinde değişiklik yaratacaktır). Tüm bunlar dikkate alındığında işçilerin görevleri standart sürede gerçekleştirebildikleri varsayımı gerçek sistemlerde geçerliliğini yitirmektedir. Her bir işçinin görevleri yerine getirmek için farklı bir performans değeri vardır. Bu değerleri göz önünde bulundurduğumuzda izleyen kısıtların modele eklenmesi zorunluluğu doğmaktadır. Modelde;

$k$  işçiler indisi,  
 $p_k$   $k$  işçisine ait performans değeri,  
 $v_{jk}$   $j$ . istasyona  $k$ . işçinin atanması durumunda 1, diğer durumlarda 0,

olmak üzere, eklenen kısıtlar aşağıdaki gibidir:

$$\sum_{i=1}^n t_i (x_{ij} + y_{ij}) \leq C - \frac{p_k - 1}{p_k} C v_{jk} \quad (3a')$$

$$j = 1, \dots, [m_{min}]$$

$$k = 1, \dots, m_{max}$$

$$\sum_{i=1}^n t_i (x_{ij} + y_{ij}) \leq C z_j - \frac{p_k - 1}{p_k} C v_{jk} \quad (3b')$$

$$j = [m_{min}] + 1, \dots, m_{max}$$

$$k = 1, \dots, m_{max}$$

$$z_j - \sum_{k=1}^{m_{max}} v_{jk} \leq 0 \quad j = 1, \dots, m_{max} \quad (8a)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} v_{jk} = 1 \quad j = 1, \dots, m_{max} \quad (8b)$$

$$\sum_{j=1}^{m_{max}} v_{jk} = 1 \quad k = 1, \dots, m_{max} \quad (8c)$$

İlk iki kısıtla istasyon sürelerinin çevrim süresini aşması engellenirken, ilgili istasyona atanan işçinin performans değerinin göz önünde bulundurulması sağlanır. Diğer kısıtlarsa bir işçinin yalnızca bir istasyona atanmasını garanti etmektedir.

Performans değeri kısıtları (3a', 3b', 8a, 8b ve 8c) ile enerji gereksinimi kısıtları (7a ve 7b) birlikte modellendiğinde enerji gereksinim miktarı ilgili görevin işlem süresine bağlı olduğundan performans değeri kısıtlarının (3a' ve 3b') yapısına uyulanmaktadır.

#### 4.6. Sayısal Sonuçlar (Numerical Experience)

Önerilen model küçük boyutlu problemlerin testi için 11 görevli Jackson'ın [17] ve orta büyüklükteki problemlerin testi için de 29 görevli Buxey'in [18] test problemi üzerinde denenmiştir. Test problemlerinin farklı çevrim süreleri için elde edilmiş eniyi değerleri [19], karşılaştırmalarda kullanılmıştır.

Literatürdeki test problemleri geliştirilen modeldeki parametre verilerini içermediğinden, bir veri üretme sistematığı geliştirilmiş ve modelde bu türetilen veriler kullanılmıştır. Model **GAMS** yazılımı kullanılarak kodlanmış, çözümde **CPLEX** çözücü kullanılmıştır. Klasik test problemlerinden Jackson için Urban'ın tam sayılı programlama modelinden hareketle elde edilen atamalar ve istasyon süreleri Tablo 1'de görülmektedir.

**Tablo 1** Jackson C=10 problemi için Urban'ın modelinden elde edilen atamalar ve istasyon süreleri (Assignment and station times for Jackson C=10 problem obtained from the Urban's model)

İstasyon No	Atanan İş Elemanları	İşlem Süresi	Toplam Süre
1	1 2 5	6 2 1	9
2	9 11	5 4	9
3	3 10	5 5	10
4	4 7	7 3	10
5	6 8	2 6	8

Yeni ek kısıtların dikkate alınmadığı durumda görüldüğü gibi, sadece işlem süreleri, öncelik ilişkileri ve çevrim süresi dikkate alınarak 5 istasyona görevler atanmıştır. Bu istasyonlarda görev alacak işçilerin işleri standart sürede tamamlayabildiği kabul edilir yani işçilerin hepsinin performans değeri 1,00'e eşittir. Ancak gerçek hayatta bu mümkün değildir. Her işçinin tecrübe, yaş ya da cinsiyet gibi farklı özelliklerine bağlı olarak performans değerleri de

**Tablo 2** Jackson C=10 problemi için performans değerlerinin dikkate alındığı istasyon süreleri (The station times that are taken into account performance values for Jackson C=10 problem)

İst.No	İst.Toplam Süresi	İşçi No	Performans Değeri	Performans Değeri*Toplam Süre
1	9	1	1,41	12,690
2	9	2	1,01	9,090
3	10	3	0,78	7,800
4	10	4	1,12	11,200
5	8	5	0,80	6,400

farklılık göstermektedir. Bu durumda yukarıdaki atamaya bağlı kalındığında işleri daha kısa sürede yapabilen operatörlerin fazla boş süresi oluşabilecek, daha uzun sürede yapabilen işçilerinse sürekli çalışması gerekecek hatta atandıkları istasyonda dar boğaz yaratacaklardır. Zaman içinde bu işçilere bağlı olarak hattın üretim hızında sapma meydana gelecektir. Bu durumun sayısal olarak da gösterilebilmesi amacıyla Jackson problemi için Tablo 2'de görülen performans değerleri türetilmiştir.

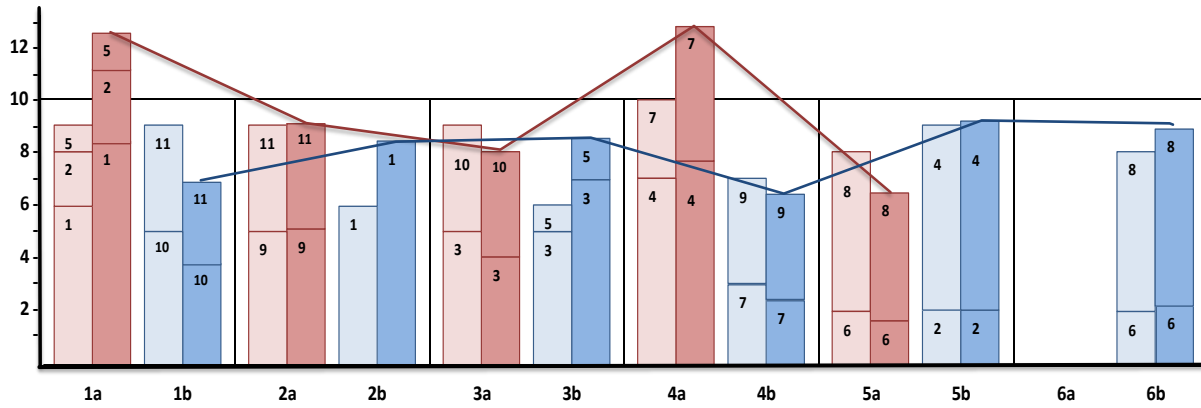
**Tablo 3** Jackson problemi için türetilmiş işçi performans değerleri (Derived performance value of worker for Jackson problem)

İşçi No	Performans Değeri
1	1,41
2	1,01
3	0,78
4	1,12
5	0,80
6	1,47
7	0,89
8	0,91

Bu değerler göstermektedir ki, her bir işçi görevleri "performans değeri \* standart süre" kadar bir sürede tamamlayabilir. Örneğin Urban'ın modeline göre yapılan dengelemede her bir istasyona aynı numaralı işçinin atandığı varsayımını yaparsak (yani birinci istasyona birinci işçi, ikinci istasyona ikinci işçi gibi) Tablo 3'teki gerçek istasyon süreleri ortaya çıkar.

Tablo 3'ten de görüldüğü gibi birinci istasyonda istasyon toplam süresinin 9 olması beklenirken işçinin gerçek performans değeri bu süreyi 12,69 saniyeye çıkarmaktadır. Çevrim süresinin üstüne çıkan bu gerçek süre zaman içinde hattın dengesinin bozulmasına neden olacaktır. Bu durum, işçinin diğer üç işçiye göre daha çok yorulmasına, yaptığı montajda hatalara hatta iş kazalarına yol açacaktır.

Şekil 1'deki grafikte, birinci seri Urban'ın orijinal model atamasından elde edilen 5 istasyonun her birine ait süreleri ve istasyonlara atanan görevleri göstermektedir (Tablo 1'deki süreler). İkinci seri



**Şekil 1** Jackson C=10 problemi için (a) Urban'ın modeli ve (b) performans kısıtı eklenmiş modelin çözümünden elde edilen istasyon süreleri ve istasyonlara atanan görevler (The station times and assigned tasks obtained from (a) Urban's model and (b) Urban's model with performance constraint for Jackson C=10 problem )

yukarıda açıklandığı şekilde işçilerin gerçek performanslarının Urban'ın model atamasında ortaya çıkaracağı gerçek istasyon sürelerini göstermektedir (Tablo 3'deki süreler). Görüldüğü üzere işçilerin gerçek performans değerleri birinci ve dördüncü istasyonlarda çevrim süresinin aşılmasına neden olmaktadır.

Üçüncü seri, Urban'ın modeline işçilerin performans değeri kısıtını ekleyerek elde edilen atamanın standart sürelerle gösterimidir. Örneğin ikinci istasyona yalnızca 1 görevi atanmıştır ve standart süresini bakıldığında çevrim süresinin yalnızca yarısının kullanılmasına neden oluyormuş gibi gözükmemektedir. Fakat dördüncü seride görüldüğü gibi, o istasyona atanan işçinin performans değerine bağlı olarak gerçekte daha uzun sürede tamamlanmaktadır. Geliştirilen kısıtlarla işçiler için bir varsayıma gerek kalmamakta hangi istasyona hangi işçinin atandığını da model belirlemektedir.

Performans değeri ek kısıtları sonrasında dikkat

edilirse istasyon sayısı altıya çıkmıştır. Bu durum istasyon sayısını azaltmayı hedeflersek istenmeyen bir durumdur. Ancak elde edilen denge her zaman sürdürülebilir olması için bu artış kabul edilebilir. Çünkü beş istasyonla zaman içinde hem işçi hem de işveren açısından daha kötü sonuçlarla karşılaşılabilir ve bu denge beklenen üretim hızını sağlayamayacaktır.

Geliştirilen model her kısıt için ayrı ayrı ve daha sonra kısıtların ortak bileşimleri için test edilmiş ve sonuçlar Tablo 4'de özetlenmiştir. Tablo her bir kısıtın istasyon sayısına etkisini ve Urban'ın modelinin orijinal atamasında (önerdiğimiz kısıtların dikkate alınmaması durumunda) çevrim süresini aşan istasyon oranlarını, işçilerin kaldırabileceği enerji düzeylerini aşan istasyon oranlarını ve uyumsuz işlerin aynı istasyona atandığı (ihlal edildiği) istasyon oranlarını da içermektedir.

Enerji gereksinimini dikkate alan kısıt için gerekli  $e_i$  parametresine veri üretirken, Babalık'ın [16] 8 saatlik

**Tablo 4** Jackson ve Buxey'in test problemlerinden elde edilen sonuçlar (Results obtained from Jackson and Buxey's test problems)

Problem adı ve görev sayısı (n)	Jackson (n=11)			Buxey (n=29)		
Çevrim süresi	7	10	21	27	41	54
Urban'ın modeline göre yeni istasyon sayısı (m*)	7	5	3	13	8	6
Performans kısıtı eklendiğinde	7+1	5+1	3	13	8+1	6+1
Enerji kısıtı eklendiğinde	7	5	3	13	8	6
Uyumsuz işler kısıtı eklendiğinde	7	5	3	13	8	6
Performans ve enerji kısıtları eklendiğinde	7+1	5+1	3+1	13	8+1	6+1
Performans ve uyumsuz işler kısıtları eklendiğinde	7+1	5+1	3	13	8+1	6+1
Enerji ve uyumsuz işler kısıtları eklendiğinde	7	5	3	13	8	6
Performans, enerji ve uyumsuz işler kısıtları eklendiğinde	7+1	5+1	3+1	13	8+1	6+1
Performans dikkate alınmadığında çevrim süresini aşan istasyon oranı	4/7	2/5	1/3	2/13	4/8	4/6
Enerji düzeyini aşan istasyon oranı	0/7	1/5	1/3	3/13	4/8	2/6
Uyumsuz iş ihlali oranı	1/7	0/5	0/5	0/13	1/8	1/6

vardiyada “erkek ve kadın işçilerde iş ağırlığına göre harcanan enerji” miktarı verilerinden yararlanılmıştır. Veriler türetilirken başlangıçta her bir işin ağırlığı 5’li ölçekten (Çok hafif iş, Hafif iş, Orta ağır iş, Ağır iş, Çok ağır iş) rassal olarak seçilmiş ardından ilgili ağırlık düzeyi için geçerli sayısal aralıktan (kJ birimiyle harcanan enerji) düzgün dağılıma uygun türetilmiş ve modelde bir saniyeye karşı gelen değeri kullanılmıştır.

Tablodan da görüldüğü üzere enerji gereksinimi kısıtları ve uyumsuz iş kısıtı tek başlarına ya da birlikte modele dahil edildiklerinde Urban’ın modelindeki yeni istasyon sayıları aynı kalmıştır. Ancak performans değeri kısıtı istasyon sayısını artırabilmektedir. Sürdürülebilir denge hedeflendiğinde istasyon sayısının artması kabul edilebilir olmalıdır. Uzun dönemde hem işçi hem de işveren açısından getirisi ergonomik faktörlerin dikkate alınmadığı duruma göre daha avantajlı olacaktır. Planlanan üretim hızına ulaşılacak, işçi yıpranmaları, kalite problemleri ve iş kazaları riski enazlanacaktır.

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Geleneksel düz hatların yerine tasarlanması biraz karmaşık da olsa U hatlarının tercih edilmesinin çeşitli yararları vardır. Ancak literatürde de sıkça karşılaştığımız istasyon sayısını azaltmaya yönelik bir amaç insan faktörünü göz ardı edebilmektedir. İstasyon sayısını azaltmaya çalışırken işçiye taşıyabileceğinden fazla yük atanması işçide oluşacak yorgunluğu artıracak, bu da oluşturulan dengeden sapmaya kadar sistemde sorunlara yol açabilecektir.

U hatlarını dengelerken ergonomik faktörlerin göz önünde bulundurulması durumunda ise dengeden sapma ihtimali ve işçilere fazla yük atanmasından dolayı oluşabilecek yorgunluk, dikkat dağılması ve dolayısıyla iş kazaları ve kalite problemleri azaltılabilecektir.

Bu nedenle çalışmamızda ergonomik faktörleri de içeren bir model önerisi yapılmıştır. Geliştirilen model sonucunda elde edilen dengenin daha sürdürülebilir olduğu sayısal testlerle gösterilmeye çalışılmıştır. Model küçük ve orta büyüklükteki problemler için etkin yanıt vermektedir. Ancak büyük boyutlu problemlerde, eklenen kısıtların getirdiği yük, çözüm süresinin uzamasına neden olmaktadır. Böyle durumlarda hızlı sonuç veren sezgiseller kullanılabilir.

## 6. KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Urban, T.L., “Note. Optimal Balancing of U-Shaped Assembly Lines”, **Management Science**, Cilt 44, No 5, 738-741, 1998.
2. Ağpak, K., Gökçen, H., Saray, N.N. ve Özel, S., “Stokastik Görev Zamanlı Tek Modelli U Tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemleri İçin Bir

- Sezgisel”, **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 17, No 4, 115-124, 2002.
3. Miltenburg, G.J. and Wijngaard, J., “The U-line Line Balancing Problem”, **Management Science**, Cilt 40, No 10, 1378-1388, 1994.
4. Gökçen, H. and Ağpak, K., “A Goal programming Approach to Simple U-Line Balancing Problem”, **European Journal of Operational Research**, Cilt 171, 577-585, 2006.
5. Ajenblit, D.A. and Wainwright, R.L., “Applying Genetic Algorithms To The U-Shaped Assembly Line Balancing Problem”, **Proceedings of the IEEE Conference on Evolutionary Computation**, 96-101, 1998.
6. Scholl, A. and Klein, R., “ULINO: Optimally balancing U-shaped JIT assembly lines”, **International Journal of Production Research**, Cilt 37, No 4, 721-736, 1999.
7. Ağpak, K. ve Gökçen, H., “U Tipi Montaj Hatlarının Dengelenmesi İçin Bir Sezgisel Metot: Düzenlenmiş Comsoal (U-Comsoal)”, **Endüstri Mühendisliği Dergisi**, Cilt 12, No 2, 23-32, 2001.
8. Aase, G.R., Schniederjans, M.J. and Olson, J.R., “U-OPT: an analysis of exact U-shaped line balancing procedures”, **International Journal of Production Research**, Cilt 41, No 17, 4185-4210, 2003.
9. Okur, A.S., **Yalın Üretim 2000’li Yıllara Doğru Türkiye Sanayii İçin Yapılanma Modeli**, 2. Baskı, Tofaş Söz Yayın, İstanbul, 1997.
10. Gunther, R.E., Johnson, G.D. ve Peterson, R.S., “Currently Practiced Formulations For the Assembly Line Balance Problem”, **Journal of Operations Management**, Cilt 3, No 4, 209-221, 1983.
11. Boudreau, J., Hopp, W., McClain, J.O. ve Thomas, L.J., “On the Interface Between Operations and Human Resource Management”, **Manufacturing & Service Operations Management**, Cilt 5, No 3, 179-202, 2003.
12. Huey, B.M. and Wickens, C., **Workload Transition: Implications for Individual and Team Performance**, National Academic Press, Washington, DC, 1993.
13. Corominas, A., Pastor, R. ve Plans, J., “Balancing Assembly Line with Skilled and Unskilled Workers”, **Omega**, Cilt 36, No 6, 1126-1132, 2008.
14. Choi, G., “A goal programming mixed-model line balancing for processing time and physical workload”, **Computers & Industrial Engineering**, Cilt 57, 395-400, 2009.
15. Costa, A.M. and Miralles, C., “Job rotation in assembly lines employing disabled workers”, **International Journal of Production Economics**, Cilt 120, No 2, 625-632, 2009.



16. Babalık, F. C., **Mühendisler İçin ERGONOMİ İşbilim**, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 2007.
17. Jackson, J.R., “A computing procedure for a line balancing problem”, **Management Science**, Cilt 2, 261-272, 1956.
18. Buxey, G.M., “Assembly Line Balancing with Multiple Stations”, **Management Science**, Cilt 20, No 6, 1010–1021, 1974.
19. <http://www.assembly-line-balancing.de/> (Erişim Tarihi: 21.03.2008).

