

# YASAK ARAMA ALGORİTMASINA DAYALI PÜRÜZSÜZLEŞTİRME YAKLAŞIMI İÇEREN KARIŞIK- MODELLİ MONTAJ HATTI DENGELEME

**Betül YAĞMAHAN, Erdal EMEL**

Endüstri Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Uludağ Üniversitesi, Görükle, 16059, Bursa.

[betul@uludag.edu.tr](mailto:betul@uludag.edu.tr), [erdal@uludag.edu.tr](mailto:erdal@uludag.edu.tr)

(Geliş/Received: 06.02.2014; Kabul/Accepted: 17.11.2014)

## ÖZET

Karışık-modelli montaj hatları, çeşitli modellerde talep edilen ürünlerin daha ucuz olacak şekilde montajı için kullanılır. Bu tür hatlar tasarlandığında, montaj hattının zaman, yer, konum vb. kısıtlar altında daha verimli ve düzenli bir şekilde çalışabilmesi için, istasyonlardaki işlemlerin dengelenmesi gerekir. Bu makalede, karışık-modelli montaj hattı dengeleme problemi için belli bir çevrim süresine karşılık istasyon sayısının minimizasyonunu amaçlayan bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Ayrıca önerilen bir yasak arama algoritmasına dayalı pürüzsüzleştirme yaklaşımı ile istasyonlarda modellere ait ortak işlemlerdeki süre farklılıklarından kaynaklanan dengesizlikler giderilmeye çalışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Karışık-model, montaj hattı dengeleme, yasak arama, pürüzsüzleştirme

## MIXED-MODEL ASSEMBLY LINE BALANCING WITH SMOOTHING APPROACH BASED ON TABU SEARCH ALGORITHM

### ABSTRACT

Mixed-model assembly lines are needed for the assembly of products with a variety of models at comparatively lower costs. The design of such lines requires the work to be done at stations well balanced, satisfying the constraints such as time, space and location for optimal productivity and efficiency. This paper presents a heuristic algorithm for the mixed-model assembly line balancing problem to minimize the number of stations for a given cycle time. The proposed algorithm further reduces time discrepancies among stations due to differences in times for common operations of different models by using a smoothing approach which is based on the tabu search algorithm.

**Keywords:** Mixed-model, assembly line balancing, tabu search, smoothing

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Karışık-modelli montaj hatları, iki ya da daha fazla benzer ürünün değişik modellerinin, aynı anda ve karışık olarak üretildiği hatlardır. Karışık-modelli montaj hatları, malzemelerin sürekli akışını sağlaması, son ürün envanterini azaltması ve model değişimi konusunda oldukça esnek olması gibi avantajları nedeniyle yaygın şekilde kullanılır. Ancak, yatırım maliyetleri yüksek olan bu sistemlerde, düşük kapasite kullanımı ve verimsiz çalışmanın maliyeti oldukça yüksektir. Bu nedenle, montaj hatlarının zaman, yer, konum vb. kısıtlar altında verimli ve düzenli bir şekilde çalışabilmesi için, montaj

hatlarının tasarımındaki ana amaçlardan biri, her istasyona eşit miktarda iş dağıtımını yapabilmek, başka bir deyişle, toplam iş yükünü istasyonlar arasında mümkün olduğu kadar eşit şekilde bölmektir. Bu durum, hat dengeleme olarak adlandırılır.

İşlemlerin istasyonlara atanmasının planlanması, çeşitli kısıtları gündeme getirir. Bunlar süre, öncelik, bölgeleme ve gruplama gibi kısıtlardır. Bu tür kısıtlar optimal bir hat dengelemeyi güçleştirir ve hatta olanaksız kılar. Bu nedenle, hat dengelemesinde belirli bir miktar denge kaybı bulunması kaçınılmazdır. Ancak amaç, en az kaybı sağlayacak uygun bir hat dengeleme çözümünü bulmaktır.

Literatürde montaj hattı dengeleme problemleri için geliştirilen birçok yöntem bulunmaktadır. Bunların büyük bir kısmını tek-modelli montaj hattı dengeleme problemi için geliştirilen kesin çözüm yaklaşımları, sezgisel ve metasezgisel yöntemler oluşturmaktadır [1, 2, 3, 4]. Rekabet koşullarının gerekliliğini karşılamak üzere, karışık-modelli montaj hatlarının getirdiği avantajlar kullanılarak, aynı anda birden fazla ürünün üretimine geçilmiştir. Araştırmacıların özellikle son zamanlarda yoğun şekilde karışık-modelli montaj hatlarının dengeleme problemi (Mixed-model Assembly Line Balancing Problem-MALBP) üzerinde çalışmalar yaptığı görülmektedir. MALBP ile ilgili ilk çalışma Thomopoulos [5] tarafından yapılmıştır. Yine Thomopoulos [6], bu çalışmasını pürüzsüz istasyon atamalı karışık-modelli montaj hattı dengeleme konusunda devam ettirmiştir. Macaskill [7], karışık-modelli hatlar için üretim hattı dengeleri üzerinde çalışmış ve hat etkinliğini maksimize edecek şekilde istasyonlara iş gruplarının atamasını gerçekleştirmiştir. Chakravarty ve Shtub [8], süreç-içi envantere sahip karışık-modelli montaj hatlarının dengelenmesi üzerinde çalışmışlardır. Söz konusu çalışmada, çok-aşamalı sistem kullanarak gerekli istasyon sayısını, her bir istasyona atanacak işlemleri ve çevrim süresini belirleyen algoritmalar geliştirmişlerdir. Bu algoritmalar, işçi maliyetleri ile süreç-içi envanter ve hazırlık maliyetlerini içeren toplam üretim maliyetini minimize etmek üzere geliştirilmiştir. Chakravarty ve Shtub [9], normal dağılıma sahip işlem sürelerinin bulunduğu karışık-modelli üretim hatları için bir maliyet minimizasyonu yaklaşımı tanımlamışlardır. Bu çalışmalarında daha önce yaptıkları çalışmayı genişleterek, önceki çalışmada işlem süresi deterministik iken bu kez hem deterministik hem de stokastik işlem süresi kullanılabilen bir süreç tanımlamışlardır. Gökçen ve Erel [10], karışık-modelli montaj hattı dengeleme problemi konusunda sezgisel bir yöntem geliştirmişlerdir. Söz konusu çalışmada, her istasyondaki toplam iş yükü tüm ürünlerin çevrim süresinden daha küçük olacak şekilde, istasyon sayısını minimize edecek bir atama oluşturulur. Askin ve Zhou [11], karışık-modelli montaj hattı dengeleme problemi için bir istasyon paralelleştirme sezgiseli tanımlamışlardır. Bu sürecin amacı, işleme-bağlı donanım/teçhizat maliyetini minimize eden uygun işlem atamaları bulmaktır. Bunu yaparken de istasyonların paralel hale getirilmesi dikkate alınır. Gokcen ve Erel [12, 13], bu problem için sırasıyla hedef ve tamsayı programlama modelleri ile çözüm önermişlerdir. McMullen ve Frazier [14], stokastik işlem süreli ve paralel istasyonlu karışık-modelli montaj hattı dengeleme problemi için bir sezgisel yaklaşım tanımlamışlardır. McMullen ve Frazier [15], bir önceki çalışmalarını tavlama benzetimi yaklaşımını kullanarak genişletmişlerdir. Bu problem için Erel ve Gokcen [16] tarafından bir en-kısa rota formülasyonu önerilmiştir. Matanachai ve Yano [17], dengeli iş yükleri sağlayacak şekilde bir sezgisel

yöntem tanımlamışlardır. Vilarinho ve Simaria [18], paralel istasyonlu ve stokastik işlem süreli karışık-modelli montaj hattı dengeleme problemi için matematiksel model ve tavlama benzetimine dayanan iki aşamalı bir sezgisel sunmuşlardır. McMullen ve Tarasewich [19], paralel istasyonlu ve stokastik işlem süreli karışık-modelli montaj hattı dengeleme problemi için karınca optimizasyonu yaklaşımını kullanmışlardır. Bukchin ve Rubinovitz [20], istasyon sayısı ve işlem tekrarı maliyetini minimize edecek şekilde tamsayı programlama formülasyonu ve dalsınır yaklaşımına dayalı bir sezgisel algoritma önermişlerdir. İş istasyonu sayısını minimize etmek için Haq ve diğ. [21] tarafından bir melez genetik algoritma tanımlanmıştır. Vilarinho ve Simaria [22], önceki çalışmalarına benzer bir çalışma yaparak çözüm yaklaşımı olarak karınca koloni optimizasyonu algoritmasını önermişlerdir. Akpınar ve Bayhan [23], bu problem için, bir melez genetik algoritma kullanmışlardır. Yağmahan [24], hat denge kaybını, istasyonların içindeki ve arasındaki pürüzsüzleştirme indeksinin minimizasyonunu sağlayan karınca koloni optimizasyonu algoritmasını önermiştir. Mamun ve diğ. [25], montaj hattı için bölgeleme kısıtı, paralel istasyon ve süreç tekrarı kararının kontrol edilebilmesini göz önüne alan genetik algoritma dayalı bir çözüm yaklaşımı kullanmışlardır. Son olarak, Akpınar ve diğ. [26], paralel istasyonlu, bölgeleme kısıtlı ve işler arasında sıraya bağımlı olmayan hazırlık zamanlarının olduğu problem için bir melez sezgisel yaklaşım önermişlerdir. Önerilen yaklaşım, genetik algoritma ve karınca koloni optimizasyonu algoritmasına dayanmaktadır.

Yasak arama (tabu search), birleşimsel (combinatorial) problemlerin çözümünde sıklıkla kullanılan bir metasezgisel algoritmadır. Literatürde tek ve çok modelli montaj hattı dengeleme problemi için yasak arama algoritması ve yasak arama algoritmasına dayalı melez yaklaşımlar kullanılmıştır [27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34]. Bununla birlikte farklı montaj hattı yerleşimleri olan paralel [35, 36, 37], çift taraflı [38], paralel çift taraflı [39] ve U-tipi [40, 41] montaj hattı dengeleme problemleri için de yasak arama yaklaşımı önerilmiştir. Ayrıca montaj hattı sıralama (assembly line sequencing) problemi için yasak arama yaklaşımı kullanılan çalışmalar da görülmektedir [42, 43, 44, 45]. Yine karışık-modelli paralel montaj hattı dengeleme probleminin çevrim zamanının minimizasyonunu amaçlayan II. tipi için de tabu arama yaklaşımı geliştirilmiştir [46]. Bu makale kapsamında, karışık-modelli montaj hattı dengeleme problemi için istasyon sayısının minimizasyonunu amaçlayan bir çözüm algoritması geliştirilmiştir. Hat dengeleme problemleri NP-zor türü problemler oldukları için kesin çözüm yöntemleri ile çözüm oluşturmak oldukça zor ve zaman alıcıdır. Bu nedenle burada bir sezgisel yaklaşım tercih edilmiştir. Önerilen yasak arama algoritmasına dayalı pürüzsüzleştirme algoritması ile istasyonlarda

modellere ait ortak işlemlerin sürelerinin farklı olmasından kaynaklanan dengesizlikler giderilmeye çalışılır. Çalışmanın diğer kısımlarında ilk olarak, hat dengeleme probleminin özellikleri açıklanmıştır. Daha sonra, hat dengeleme için önerilen sezgisel algoritma ve bu algoritma ile elde edilen ilk dengeyi pürüzsüzleştirme yaklaşımı tanımlanmıştır. Son olarak, bilgisayar ortamında kodlanan algoritmalar çeşitli boyutlardaki problemlerin çözümü için test edilmiş ve elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.

## 2. PROBLEMİN TANIMI (DEFINITION OF THE PROBLEM)

Karışık-modelli montaj hatları için verilen orta-dönem (veya uzun-dönem) planlama kararları, hattın kurulması ve istasyonlar arasında işlemlerin paylaştırılması ile ilgili olup, hat uzunluğunun (istasyon sayısı, istasyonların uzunluğu), üretim hızının veya bununla eşdeğer istasyon yükü cinsinden çevrim süresinin belirlenmesini içerir. Orta dönem kararların çoğu, karışık-modelli montaj hattı dengeleme probleminin bir parçasıdır. Tek-modelli üretimdeki gibi, bu problem de, belli bir amacı optimize edecek şekilde işlemlerin istasyonlara atanması ve ayrıca kullanılan istasyon sayısı ve/veya çevrim süresinin bulunması problemidir. Ancak bu problem, tek-modelli probleme göre daha zordur. Çünkü istasyonlar her bir modele bağlı olarak dengelenir. Bu yüzden, tek-modelli problemin kapasite ve maliyete bağlı amaçları yetersiz kalır. Malzemelerin sürekli akışını sağlamak, öğrenme etkisinden faydalanmak, aynı donanımdan daha fazla olmasını önlemek için, birkaç modelde ortak olan işlemler aynı istasyona atanmalıdır. Uygulamada ise, modellerdeki (farklı işlemler ve işlem sürelerine sahip) farklı işlem süreleri nedeniyle bir istasyonun kullanımını önemli bir şekilde değiştirebilir. Tek-modelli durumun tersine, çevrim süresi, istasyon süresi üzerinde bir üst sınır değildir, ancak çevrim süresi, ortalama üretim hızına karşılık gelir. Yani, belirli modeller için istasyon süreleri, çevrim süresini aşabilir.

Literatürde MALBP çeşitli tiplerde görülebilir [47]:

1. MALBP-I: Belli bir  $c$  çevrim süresi için amaç, istasyon sayısının minimizasyonu.
2. MALBP-II: Belli bir  $K$  istasyon sayısı için amaç, çevrim zamanının minimizasyonu.
3. MALBP-E:  $K$  istasyon sayısı ve  $c$  çevrim süresi belirli aralıklar içinde değişirken amaç, hat etkinliğinin maksimizasyonu veya  $(c.K)$  değerinin minimizasyonu.

Tek-modelli montaj hattında sadece öncelik ilişkileri diyagramına göre hat dengelemesi yapılırken, karışık-modelli montaj hattında her modele ait öncelik ilişkileri diyagramı dikkate alınarak dengeleme yapılmalıdır. Karışık-modelli montaj hatlarında bir

modelden diğerine sadece işlemlerin öncelik ilişkileri değil, işlemlerin süreleri de değişebilmekte ve sonuç olarak her modelin farklı iş yükü olabilmektedir. Karışık-modelli montaj hatlarında istasyonlara yapılan işlem atamalarına bağlı olarak farklı aylak süreler ve iş yükleri oluşabilir. Bu yüzden, verilen bir  $(c, K)$  kombinasyonunun, iş yükü değişimleri ve fazla iş yükü ve aylak süre üzerinde beklenen etkisine bağlı olarak uygun çözümleri değerlendirmek ve sıralamak için, ek amaç fonksiyonları kullanılmalıdır.

## 3. YASAK ARAMA (TABU SEARCH)

Yasak arama, birleşimsel problemlerin çözümü için Glover [48, 49] tarafından önerilmiş metasezgisel bir yaklaşımdır. Süreç, bir önceki çözümden daha iyi olacak çözümleri araştırır. Yasak arama algoritması, şu parametrelere bağlıdır: başlangıç çözümü, komşuluk yapısı, arama stratejisi, yasaklar listesi ve durdurma kriteri [50]. Bir başlangıç çözümünden başlanarak her bir çözüm için komşuluklar tanımlanır. Komşulukların belirlenmesi rastgele veya organize bir şekilde yapılabilir. En basit şekliyle çözüm, o anki  $S_i$  çözümü ile amaç fonksiyonu değerini minimize eden  $S$  çözümünü yer değiştirir. Amaç fonksiyonunun değerindeki artış, sürecin bir sonraki adımında, geçişi ters çevirme ve  $S_i$  çözümüne geri dönme eğilimini ortaya çıkaracaktır. Böyle bir ters dönüşüm,  $S_i$  ve  $S$  arasında sonsuz bir gidiş geliş neden olabilir. Bu yüzden, yasaklanan değişimlerin bir listesi oluşturulur. Bu listeye yasaklar listesi ( $L$ ) adı verilir. Bu listenin amacı, hem sonsuz bir döngü oluşturmamak hem de en azından ihtimal dahilinde olmayanları gerçekleştirmektir. Yapılan her değişimden sonra, değişimin tersi, yasaklar listesinin en başına girilir, yasaklar listesindeki diğer değişimler ise bir pozisyon geri ötelenir ve en sondaki değişim silinir. Durdurma kriteri olarak, maksimum iterasyon sayısı, iyileşmenin devam etmemesi gibi seçenekler kullanılabilir.

Yasak arama yaklaşımı aşağıdaki gibi özetlenebilir [51]:

- Adım 1. Başlangıç değerlerinin atanması:  
 $i = 1$  için  $S_1$  başlangıç çözümü belirlenir ve  $S_0 = S_1$ .
- Adım 2.  $S_i$ 'nin komşuluklarından aday sıralama  $S$  belirlenir.  
Eğer  $S_i \rightarrow S$  değişimi yasaklar listesindeki bir değişimle yasaklanmış ise,  $S_{i+1} = S_i$  ve Adım 3'e gidilir.  
Eğer  $S_i \rightarrow S$  değişimi yasaklar listesindeki bir değişimle yasaklanmamış ise,  $S_{i+1} = S$ .  
Yasaklar listesinin en başına değişimin tersi girilir ve yasaklar listesindeki diğer değişim çiftleri bir pozisyon ötelenir.  
Eğer amaç fonksiyonu  $Z(S) < Z(S_0)$  ise  $S_0 = S$  ve Adım 3'e gidilir.

Adım 3.  $i = i + 1$ .

Eğer Durdurma Kriteri sağlanıyorsa algoritma sonlandırılır (Çıkış), Diğer durumda, Adım 2'ye gidilir.

#### 4. ÖNERİLEN YÖNTEM (THE PROPOSED METHOD)

##### 4.1. Montaj Hattı Dengeleme (Assembly Line Balancing)

Bu çalışma kapsamında, belli bir  $c$  çevrim süresi için  $K$  istasyon sayısının minimizasyonu amacına sahip karışık-modelli montaj hattı dengeleme problemi (MALBP-1) ele alınmıştır. Hat dengeleme problemleri NP-zor türü problemler oldukları için kesin yöntemlerle optimal çözüm oluşturmak oldukça zor ve zaman alıcıdır. Bu nedenle burada sezgisel yöntem tercih edilmiştir. Önerilen yöntem, hattın çevrim süresinin bilindiği varsayımına dayanarak, önceki çalışmalara benzer şekilde karışık-modelli hattı, tek-modelli bir hatta dönüştürür. Buna göre kullanılan karışık-modelli montaj hattı dengeleme yöntemi, tek-modelli montaj hatları için geliştirilmiş olan Helgeson ve Bernie' nin [52] Sıralanmış Pozisyon Ağırlıkları Yöntemini (Ranked Positional Weight Method-RPWM) esas alır. Atamalar çevrim ve öncelik kısıtları bozulmaksızın gerçekleştirilir. Bu yaklaşıma uygun olarak tanımlanan Algoritma-1 ile hat için ilk denge elde edilir. Bu sezgiselin kullanılma nedeni, kolay anlaşılır, hızlı ve optimale yakın çözümler verebilmesidir.

Algoritma-1 için kullanılan varsayımlar ve hattın özellikleri şöyledir:

1. Her model için talebin bilindiği varsayılır. Hat itme esası olarak çalışır. Yani üretim planı hattı çalıştırır.
2. Tüm işlemler için işlem süreleri deterministiktir.
3. Tüm işlemlerin öncelik ilişkileri belirlidir ve öncelik kısıtları modelden modele tutarlıdır. Yani, herhangi bir model için  $x$  işlemi,  $y$  işleminden önce geliyorsa,  $y$  işleminin  $x$  işleminden önce geldiği bir model yoktur.
4. Çevrim süresi  $c$ , önceden belirlidir.
5. En büyük işlem süresi çevrim süresinden daha büyük olamaz.
6. Aynı denge tüm modeller için geçerlidir. İşlemler, farklı modeller için farklı istasyonlara atanamaz.

Algoritma-1 için kullanılan kısıtlar ise şöyledir:

Herhangi bir istasyondaki ortalama işlem süresi  $T_k$ , çevrim süresini aşamaz:

$$T_k = \sum_m T_{mk} / D < c, \forall k \quad (1)$$

Burada  $T_{mk}$ ,  $k$ . istasyondaki  $m$  modelinin toplam işlem süresi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$T_{mk} = d_m \sum_{j \in A_k} t_{jm}, \forall m, \forall k \quad (2)$$

Tüm öncelik ilişkileri sağlanmalıdır. Yani,  $v$  işleminin önceliği  $u$  işleme ise,  $u$  işlemi atanmadan  $v$  işlemi atanmamalıdır:

$$\sum_k kX_{uk} - \sum_k kX_{vk} \leq 0, (u, v) \in \wp \quad (3)$$

Her işlem mutlaka herhangi bir istasyona atanmalıdır:

$$\sum_k X_{jk} = 1, \forall j \quad (4)$$

Bu varsayımlar ve kısıtlar altında, ilk olarak problem tek-modelli hat dengeleme problemine dönüştürülür. Buna göre tüm modellere ait bir bileşik öncelik diyagramı oluşturulmalıdır. Bileşik öncelik diyagramındaki işlemler için süreler aşağıdaki gibi tespit edilir:

$$t_j = \frac{\sum d_m t_{jm}}{D}, \forall j \quad (5)$$

Algoritma-1'e göre işlemler, istasyonlara pozisyon ağırlıkları ( $PA$ ) dikkate alınarak atanır. Pozisyon ağırlıkları, her işlemin kendi standart süresi ile bu işlemi izleyen tüm işlemlerin işlem sürelerinin toplanması ile bulunmuştur.  $PA_j$ ,  $j$  işleminin pozisyonunu, bu işlemin diğer işlemler arasında elde ettiği öncelikle işlenebilme avantajını süre cinsinden mutlak bir değer olarak temsil etmektedir. Buna göre, birleştirilmiş öncelik ilişkileri diyagramında  $j$  işleminin pozisyon ağırlığı,  $B_j$  kümesinde yer alan işlemlerin süreleri toplamından hesaplanır [52]:

$$PA_j = t_j + \sum_{i \in B_j} t_i, \forall j \quad (6)$$

$PA_j$  ağırlıkları büyükten küçüğe doğru sıralanır. İstasyon atamaları yapılırken, en büyük pozisyon ağırlığına sahip olan işlem birinci önceliğe sahiptir.

Algoritma-1'in aşamaları aşağıdaki gibi özetlenebilir [53]:

Adım 1. Tüm işlemler için başlangıç değerlerinin atanması:

$$M, c, J, d_m, t_{jm}, D = \sum_m d_m,$$

$$t_j = \frac{\sum_m d_m t_{jm}}{D}, PA_j = t_j + \sum_{i \in B_j} t_i, \forall j.$$

- Adım 2.  $PA_j$  değerleri büyükten küçüğe doğru sıralanır.
- Adım 3.  $k = 1, X_j = 0 \quad \forall j.$
- Adım 4.  $T_k = 0, A_k = \{ \}$  ve  $Y_k = c.$
- Adım 5.  $PA_j$  değeri en büyük olan  $j$  işlemi seçilir.
- Adım 6. Eğer  $j$  işlemi daha önce atanmamış ise Adım 7'ye gidilir, aksi halde Adım 10'a gidilir.
- Adım 7. Eğer  $Y_k > t_j$  ise Adım 8'e gidilir, aksi halde Adım 10'a gidilir.
- Adım 8. Eğer  $j$  işleminin tüm öncelikleri atanmış ise Adım 9'a gidilir, aksi halde Adım 10'a gidilir.
- Adım 9.  $j$  işlemi  $k$  istasyonuna atanır.  $X_j = 1, T_k = T_k + t_j, A_k = A_k + \{j\}$  ve  $Y_k = c - T_k$  hesaplamaları yapılır. Eğer istasyonlara atanacak başka bir işlem kalmadı ise algoritma sona erdirilir, aksi halde Adım 5'e geri dönülür.
- Adım 10.  $j$  işlemi en düşük pozisyon ağırlığına sahip işlem ise  $k$  istasyonu kapatılır, yeni bir istasyon açılır.  $k = k + 1$  yapılır ve Adım 4'e geri dönülür. Aksi halde bir sonraki en yüksek pozisyona ağırlığına sahip olan işlemi seçilir ve Adım 6'ya geri dönülür.

Bu sezgisel yöntemin akış diyagramı Şekil 1'de gösterilmiştir.

#### 4.2. Pürüzsüzleştirme (Smoothing)

MALBP-I için Algoritma-1 ile elde edilen çözüm, iş yüklemeye başlangıç dengesini oluşturmaktadır. Bu başlangıç dengesi, istasyonlarda modellere ait ortak işlemlere ait sürelerin farklı olmasından kaynaklanan dengesizliklere sahiptir. Bu dengesizliğin ortaya çıkardığı olumsuzluğu önlemek için pürüzsüzleştirme yapmak üzere Algoritma-2 önerilmiştir. Daha önceki araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada en iyi çözümü belirlemek için bir yerel araştırma yöntemi olan Yasak Arama kullanılmıştır.

Önerilen yasak arama algoritmasına göre, öncelikle Algoritma-1 tarafından oluşturulan başlangıç çözümünün işlemleri, çevrim süresi ve öncelik kısıtlarını bozmaksızın, istasyonlar arasında işlerin karşılıklı yerdeğişimi yöntemi (interchange) ile elde edilen komşulukların yasaklar listesinde olmayanları için amaç fonksiyonu minimize edilmeye çalışılır. Arama maksimum iterasyon sayısına ( $J_{max}$ ) kadar devam etmelidir. Algoritmanın kodlama gösteriminde çözümün kendisi (permütasyonlu kodlama) kullanılmıştır. Algoritma-2 için akış diyagramı Şekil 2'de gösterilmiştir [53]. Verilen bir  $(c, K)$  kombinasyonunda, iş yükü değişimleri ve fazla iş

yükü dengesizliklerini pürüzsüzleştirmek amacıyla Algoritma-2' de Thomopoulos [6] tarafından tanımlanmış amaç ifadesi kullanılmıştır:

$$Z = \sum_k \sum_m |T_{mk} - \bar{T}_m| \quad (7)$$

burada  $\bar{T}_m$ ,  $m$  modelinin bir istasyon başına düşen dönemsel ortalamalı işlem süresi aşağıdaki gibi belirlenir:

$$\bar{T}_m = d_m \sum_k \sum_{j \in A_k} t_{jm} / K, \forall m \quad (8)$$

#### 5. DENEYSEL ÇALIŞMA (THE COMPUTATIONAL EXPERIENCE)

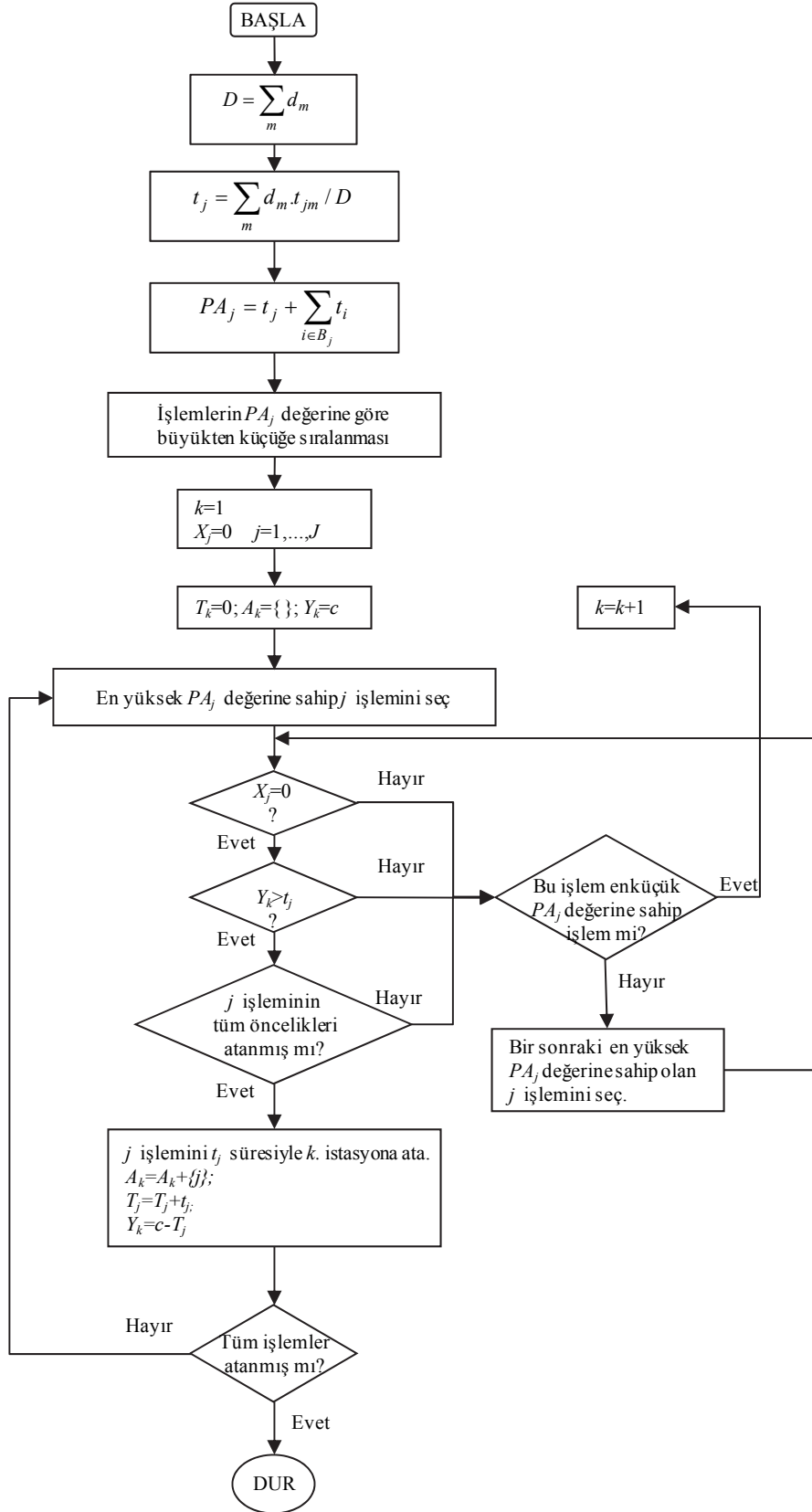
MALBP-I için oluşturulan iki çözüm algoritmasının etkinliğini test etmek amacıyla literatürden alınmış problemler kullanılmıştır. Ancak bu problemlerin tek-modelli montaj hattı problemleri olması nedeniyle burada öncelik ilişkileri değiştirilmeksizin, tek-modelli problemler için verilmiş işlem süreleri, farklı modellerin işlem süreleri ortalamaları olacak şekilde kullanılmıştır. Problemler için işlem sayısı ( $J$ ), minimum, maksimum ve toplam işlem süreleri ( $t_{min}$ ,  $t_{max}$  ve  $t_{top}$ ), öncelik ilişkileri sayısı (order strength - OS), süre değişkenliği oranı (time variability ratio - TVR), öncelik ilişkileri diyagramı iraksama derecesi (degree of divergence of precedence graph - div) ve öncelik ilişkileri diyagramı yakınsama derecesi (degree of convergence of precedence graph - conv) Tablo 1'de özetlenmiştir.

Her bir problemde model sayısı  $M = 3$  adet ve her bir modelin talebinin eşit olduğu ( $d_m = 10$  birim) kabul edilmiştir. <http://www.assembly-line-balancing.de> internet adresinden test problemlerinin verilerine erişilebilir. Karışık-modelli montaj hattı dengeleme probleminin çözümüne yönelik önerilen yaklaşım Delphi v.7 ortamında kodlanmıştır. Önerilen pürüzsüzleştirme amaçlı yasak arama algoritması için yasaklar listesi uzunluğu  $l = 7$ , maksimum iterasyon sayısı  $I_{max} = 200$  olarak belirlenmiştir.

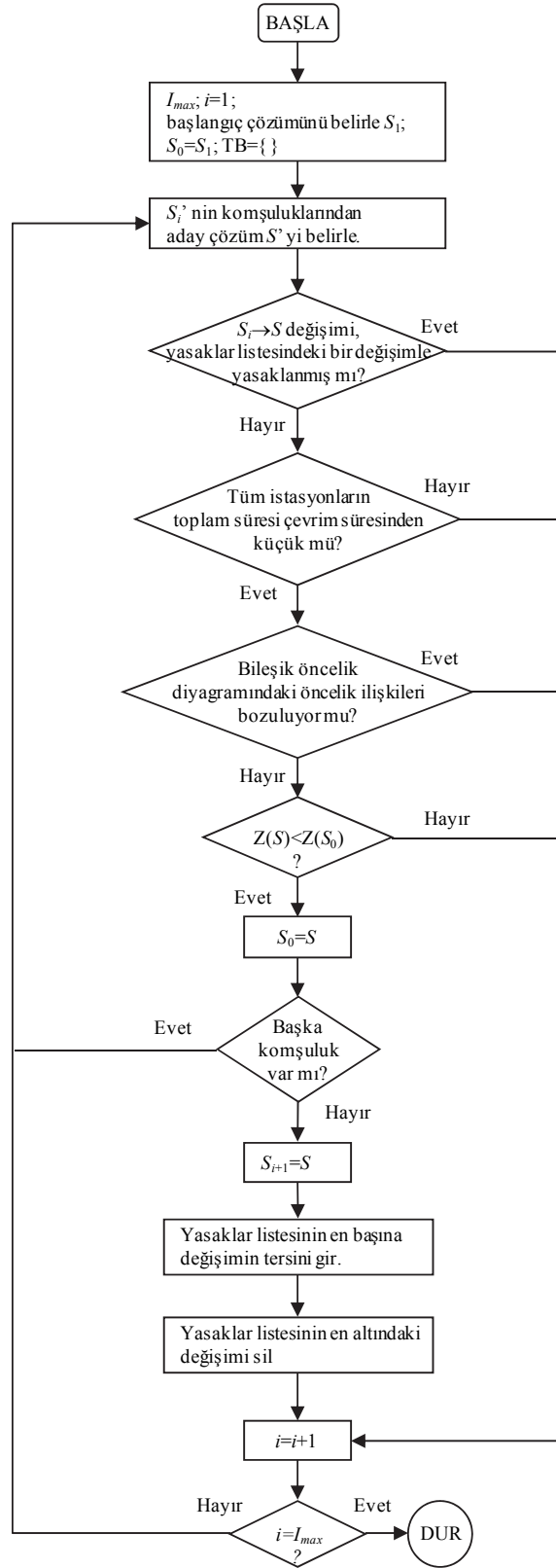
Bir montaj hattında  $e$  denge kaybı, çevrim süreleri toplamı ile (5) ifadesine göre elde edilen işlem sürelerinin toplamı arasındaki farkın, çevrim süreleri toplamına olan oranı olarak ifade edilmektedir:

$$e = \frac{c.K - \sum_j t_j}{c.K} \quad (9)$$

Test problemlerinde, literatürde tanımlı çeşitli çevrim sürelerine ( $c$ ) göre değişen 56 farklı senaryo denenmiştir. Önerilen çözüm yaklaşımı (Algoritma-1) ile elde edilen ilk dengeleme sonuçları için bulunan istasyon sayıları ( $K$ ), denge kaybının ortalama ( $e$ ) ve sapma ( $\Delta$ ) değerleri Tablo 2'de verilmektedir.



Şekil 1. Algoritma-1: Başlangıç Çözümü (Algorithm-1: Initial Solution)



Şekil 2. Algoritma-2: Pürüzsüzleştirme (Algorithm-2: Smoothing)

**Tablo 1.** Test Problemlerinin Özellikleri (Definition of Test Problems)

Problem No	Problem Adı	$J$	$t_{\min}$	$t_{\max}$	$t_{\text{top}}$	OS	TVR	div	conv
1	Bowman	8	3	17	75	75,00	24593,00	0,88	0,80
2	Roszieg	25	1	13	125	71,67	13,00	0,74	0,69
3	Buxey	29	1	25	324	50,74	25,00	0,74	0,78
4	Sawyer	30	1	25	324	44,83	25,00	0,83	0,83
5	Kilbridge	45	3	55	552	44,55	18,33	0,67	0,69
6	Hahn	53	40	1775	14026	83,82	44,38	0,63	0,63
7	Arcus1	83	233	3691	75707	59,09	15,84	0,73	0,73

Algoritmanın performansı, Genetik Algoritma (GA) metasezgiseli ve Scholl ve Klein [54] tarafından geliştirilen SALOME dal-sınır algoritması ile karşılaştırılmıştır. GA, montaj hattı dengeleme gibi birleşimsel optimizasyon problemlerinin çözümünde çok yaygın olarak kullanılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir [55, 56, 57, 58]. Kullanılan standart GA metasezgiselinin yapısı Şekil 3’de görülmektedir. GA için, başlangıç popülasyonu rastgele oluşturulmuş, PMX çaprazlama operatörü ve kaydırarak yer değiştirme (shift change) mutasyon operatörü kullanılmıştır. Kullanılan diğer parametre değerleri ise şöyledir: Popülasyon büyüklüğü = 30, nesil sayısı = 40, çaprazlama oranı = 0.8, mutasyon oranı = 0.2.

Tablo 2’de son satırda Algoritma-1 için ortalama denge kaybının %12.03, GA için %11.78 ve SALOME için %7.95 olduğu görülmektedir. Algoritma-1 için optimal istasyon sayısına göre fark %4.98 iken, GA için %4.47 ve SALOME için bu değer %0’dır. Önerilen algoritmanın, GA metasezgiseline ve MALBP-I için optimale yakın çözüm üreten SALOME algoritmasına yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

- Adım 1. Başlangıç popülasyonunun oluşturulması  
Bireylerin değerlendirilmesi (uygunluk değerinin hesaplanması)

Adım 2. Ebeveynlerin seçimi  
Çaprazlamanın yapılması  
Mutasyonun uygulanması  
Bireylerin değerlendirilmesi (uygunluk değerinin hesaplanması)  
O an ki popülasyonda en iyi bireylerin saklanması (elitist strateji)

Adım 3. Eğer Durdurma Kriteri sağlanıyorsa algoritmanın sonlandırılması, aksi halde Adım 2’ye geri dönülmesi.

**Şekil 3.** Genetik Algoritmanın Yapısı (Genetic Algorithm Structure) [59]

İlk denge çözümlerini pürüzsüzleştirmek amacıyla, bu çalışma kapsamında önerilen Algoritma-2 kullanıldığında, elde edilen pürüzsüzleştirme sonrası amaç fonksiyonu ( $Z$ ) ve % iyileştirme oranları ise Tablo 3’de gösterilmiştir. Önerilen algoritmanın model büyüklüğüne bağlı olmaksızın performansını ölçebilmek için  $Z'$  normalize edilmiş amaç fonksiyonu değerleri kullanılmıştır. Tablo 3’de verilen  $Z'$  değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$Z' = \frac{Z}{J \cdot \left( \frac{\max(t_{jm}) + \min(t_{jm})}{2} \right)} \quad (10)$$

Tablo 3’de görüldüğü gibi, önerilen Algoritma-2, Algoritma-1 ile elde edilen ilk denge sonuçlarını tüm problemler için ortalama %10 oranında iyileştirmektedir. Bu iyileşme miktarının maksimum değerinin %42.53 olduğu, bunun yanında 56 farklı senaryonun sadece 4 tanesi için herhangi bir iyileşme sağlanmadığı görülmektedir.

## 6. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu makalede, karışık-modelli montaj hattındaki istasyonların belli bir çevrim süresi içinde atıl sürelerini en küçüklemek ve istasyon sayısını minimize etmek üzere istasyonlar arası işlem sürelerinin dengelenmesini amaçlayan bir yöntem önerilmiştir. Önerilen sezgisel yöntem ile karışık-modelli hat, önce tek-modelli hatta dönüştürülerek dengelenmektedir. Böylece hat için iyileştirmeye açık bir denge elde edilmektedir. Oluşturulan ilk dengeyi pürüzsüzleştirmek için bu çalışmada yasak arama algoritmasına dayalı bir pürüzsüzleştirme algoritması önerilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar, önerilen pürüzsüzleştirme algoritmasının, hattaki ilk denge sonuçlarını iyileştirdiğini ve daha dengeli bir iş yükü ataması gerçekleştirdiğini göstermektedir.



**Tablo 2.** Algoritma-1 ile İlk Dengeleme Sonuçları (Initial Solutions for Algorithm-1)

Problem No	<i>c</i>	Algoritma-1			GA			SALOME			
		<i>K</i>	$\Delta$ (%)	<i>e</i> (%)	<i>K</i>	$\Delta$ (%)	<i>e</i> (%)	<i>K</i> veya LB	<i>K</i> veya UB	$\Delta$ (%)	<i>e</i> (%)
<i>1</i>	20	5	0,00	25,00	5	0,00	25,00	5	5	0,00	25,00
<i>2</i>	14	10	0,00	10,71	10	0,00	10,71	10	10	0,00	10,71
	16	9	12,50	13,19	9	12,50	13,19	8	8	0,00	2,34
	18	8	0,00	13,19	8	0,00	13,19	8	8	0,00	13,19
	21	6	0,00	0,79	6	0,00	0,79	6	6	0,00	0,79
	25	6	0,00	16,67	6	0,00	16,67	6	6	0,00	16,67
	32	4	0,00	2,34	4	0,00	2,34	4	4	0,00	2,34
<i>3</i>	27	14	7,69	14,29	13	0,00	7,69	13	13	0,00	7,69
	30	12	0,00	10,00	12	0,00	10,00	12	12	0,00	10,00
	33	11	0,00	10,74	11	0,00	10,74	11	11	0,00	10,74
	36	10	0,00	10,00	10	0,00	10,00	10	10	0,00	10,00
	41	9	12,50	12,20	9	12,50	12,20	8	8	0,00	1,22
	47	8	14,29	13,83	8	14,29	13,83	7	7	0,00	1,52
54	7	0,00	14,29	7	0,00	14,29	7	7	0,00	14,29	
<i>4</i>	25	15	7,14	13,60	15	7,14	13,60	14	14	0,00	7,43
	27	14	7,69	14,29	14	7,69	14,29	13	13	0,00	7,69
	30	12	0,00	10,00	12	0,00	10,00	12	12	0,00	10,00
	33	11	0,00	10,74	11	0,00	10,74	11	11	0,00	10,74
	36	10	0,00	10,00	10	0,00	10,00	10	10	0,00	10,00
	41	9	12,50	12,20	9	12,50	12,20	8	8	0,00	1,22
	47	8	14,29	13,83	8	14,29	13,83	7	7	0,00	1,52
	54	7	0,00	14,29	7	0,00	14,29	7	7	0,00	14,29
75	5	0,00	13,60	5	0,00	13,60	5	5	0,00	13,60	
<i>5</i>	56	10	0,00	1,43	11	10,00	10,39	10	10	0,00	1,43
	57	10	0,00	3,16	11	10,00	11,96	10	10	0,00	3,16
	62	10	11,11	10,97	10	11,11	10,97	9	9	0,00	1,08
	69	9	12,50	11,11	9	12,50	11,11	8	8	0,00	0,00
	79	8	14,29	12,66	8	14,29	12,66	7	7	0,00	0,18
	92	7	16,67	14,29	7	16,67	14,29	6	6	0,00	0,00
	110	6	0,00	16,36	6	0,00	16,36	6	6	0,00	16,36
	111	5	0,00	0,54	6	20,00	17,12	5	5	0,00	0,54
	138	5	25,00	20,00	5	25,00	20,00	4	4	0,00	0,00
184	4	33,33	25,00	3	0,00	0,00	3	3	0,00	0,00	
<i>6</i>	2004	8	0,00	12,51	8	0,00	12,51	8	8	0,00	12,51
	2338	8	14,29	25,01	8	14,29	25,01	7	7	0,00	14,30
	2806	6	0,00	16,69	6	0,00	16,69	6	6	0,00	16,69
	3507	5	0,00	20,01	5	0,00	20,01	5	5	0,00	20,01
	4676	5	25,00	40,01	4	0,00	25,01	4	4	0,00	25,01
<i>7</i>	3786	22	4,76	9,11	22	4,76	9,11	21	21	0,00	4,78
	3985	21	5,00	9,53	21	5,00	9,53	20	20	0,00	5,01
	4206	19	0,00	5,26	20	5,26	10,00	19	19	0,00	5,26
	4454	19	5,56	10,54	19	5,56	10,54	18	18	0,00	5,57
	4732	17	0,00	5,89	18	5,88	11,12	17	17	0,00	5,89
	5048	17	6,25	11,78	16	0,00	6,27	16	16	0,00	6,27
	5408	16	6,67	12,51	15	0,00	6,67	15	15	0,00	6,67
	5824	14	0,00	7,15	14	0,00	7,15	14	14	0,00	7,15
	5853	14	0,00	7,61	14	0,00	7,61	14	14	0,00	7,61
	6309	13	0,00	7,69	13	0,00	7,69	13	13	0,00	7,69
	6842	12	0,00	7,79	12	0,00	7,79	12	12	0,00	7,79
	6883	12	0,00	8,34	12	0,00	8,34	12	12	0,00	8,34
	7571	11	0,00	9,09	11	0,00	9,09	11	11	0,00	9,09
	8412	10	0,00	10,00	10	0,00	10,00	10	10	0,00	10,00
	8898	9	0,00	5,46	9	0,00	5,46	9	9	0,00	5,46
	10816	8	0,00	12,51	8	0,00	12,51	8	8	0,00	12,51
<b>Ortalama</b>			<b>4,98</b>	<b>12,03</b>		<b>4,47</b>	<b>11,78</b>			<b>0,00</b>	<b>7,95</b>

**Tablo 3.** Algoritma-2 ile Pürüzsüzleştirme Sonuçları (Smoothing Solutions for Algorithm-2)

Problem No	Z değeri		Z' değeri		İyileştirme Miktarı (%)
	Pürüzsüzleştirme Öncesi	Pürüzsüzleştirme Sonrası	Pürüzsüzleştirme Öncesi	Pürüzsüzleştirme Sonrası	
1	664	548	8,30	6,85	17,47
2	1220	1080	6,97	6,17	11,48
	1233	1006	7,05	5,75	18,41
	952	892	5,44	5,10	6,30
	490	460	2,80	2,63	6,12
	870	500	4,97	2,86	42,53
	450	450	2,57	2,57	0,00
3	3318	3164	8,80	8,39	4,64
	2498	2281	6,63	6,05	8,69
	2647	2345	7,02	6,22	11,41
	3354	2596	8,90	6,89	22,60
	3126	2604	8,29	6,91	16,70
	3490	2717	9,26	7,21	22,15
	2659	2422	7,05	6,42	8,91
4	2854	2674	7,32	6,86	6,31
	2872	2495	7,36	6,40	13,13
	2191	2125	5,62	5,45	3,01
	2396	1883	6,14	4,83	21,41
	3020	2520	7,74	6,46	16,56
	2955	2055	7,58	5,27	30,46
	2735	2092	7,01	5,36	23,51
	3025	2437	7,76	6,25	19,44
	2112	1336	5,42	3,43	36,74
	5	3904	3818	2,99	2,93
4104		3998	3,14	3,06	2,58
4906		4866	3,76	3,73	0,82
4735		4735	3,63	3,63	0,00
5235		5020	4,01	3,85	4,11
5382		5342	4,12	4,09	0,74
5380		5380	4,12	4,12	0,00
2968		2968	2,27	2,27	0,00
6732		6672	5,16	5,11	0,89
8340		8240	6,39	6,31	1,20
6		118987	115407	2,47	2,40
	169582	142967	3,53	2,97	15,69
	129903	129363	2,70	2,69	0,42
	101380	101380	2,11	2,11	0,00
	185516	119132	3,86	2,48	35,78
7	745497	682302	4,58	4,19	8,48
	709508	629452	4,36	3,87	11,28
	624151	545562	3,83	3,35	12,59
	641822	628922	3,94	3,86	2,01
	521403	480248	3,20	2,95	7,89
	585147	579782	3,59	3,56	0,92
	574631	523570	3,53	3,22	8,89
	602005	542961	3,70	3,33	9,81
	607285	550781	3,73	3,38	9,30
	531703	502606	3,27	3,09	5,47
	526453	488741	3,23	3,00	7,16
	544961	521861	3,35	3,20	4,24
	561780	542523	3,45	3,33	3,43
	404778	404778	2,49	2,49	0,00
	322402	288404	1,98	1,77	10,55
	438810	438810	2,69	2,69	0,00
	<b>Ortalama</b>	<b>180565,20</b>	<b>167653,20</b>	<b>4,91</b>	<b>4,32</b>

Pürüzsüzleştirme algoritmasında başlangıç çözümü için, dengeleme sonucunu veren RPWM yerine daha farklı algoritmalar (sezgisel veya metasezgisel) kullanılabilir. Bunun dışında pürüzsüzleştirme algoritmasının sonuçlarını iyileştirmek üzere bir parametre optimizasyonu yapılabilir; algoritma için farklı komşuluk ve liste yapıları analiz edilebilir. Önerilen algoritma, küçük değişikliklerle farklı tipteki montaj hattı dengeleme problemlerine de (U-tipi hatlar, paralel hatlar vb.) uyarlanabilir.

#### SEMBOLLER VE KISALTMALAR (SYMBOLS AND ABBREVIATIONS)

$m$	model, $m = 1, \dots, M$
$j$	işlem, $j = 1, \dots, J$
$k$	istasyon, $k = 1, \dots, K$
$c$	çevrim süresi
$d_m$	planlama döneminde $m$ modelinin talebi
$D$	planlama döneminde tüm modeller için toplam talep $D = \sum_m d_m$
$t_{jm}$	$m$ modeline ait $j$ işleminin işlem süresi
$t_j$	işlemler için ortalama süre
$\mathcal{P}$	işlemlerin öncelik ilişkileri kümesi
$B_j$	birleştirilmiş öncelik ilişkilerinde $j$ işlemini takip eden işlemlerin kümesi
$PA_j$	$j$ işleminin pozisyon ağırlığı
$A_k$	$k$ istasyonuna atanmış işlemler kümesi
$X_{jk} =$	$\begin{cases} 1, & \text{eğer } j \text{ işlemi } k \text{ istasyonuna atanmış ise} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
$Y_k$	İstasyon boş süresi
$T_k$	İstasyon ortalama işlem süresi
$T_{mk}$	$k$ istasyonundaki $m$ modelinin toplam işlem süresi
$\bar{T}_m$	$m$ modelinin bir istasyon başına düşen dönemsel ortalama işlem süresi.
$I_{max}$	maksimum iterasyon sayısı
$t_{min}$	minimum işlem süresi
$t_{max}$	maksimum işlem süresi
$t_{top}$	toplam işlem süresi
$S_i$	$i$ anki çözüm
$S$	aday çözüm
$l$	yasaklar listesi uzunluğu
$Z$	amaç fonksiyonu değeri
$Z'$	normalize edilmiş amaç fonksiyonu değerleri
$e$	denge kaybı
$\Delta$	sapma
MALBP	Karışık-modelli Montaj Hattı Dengeleme Problemi (Mixed-model Assembly Line Balancing Problem)
RPWM	Sıralanmış Pozisyon Ağırlıkları Yöntemi (Ranked Positional Weight Method)
GA	Genetik Algoritma
LB	Alt Sınır (Lower Bound)
UB	Üst Sınır (Upper Bound)

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Scholl, A. ve Becker, C., "State-of-the-art Exact and Heuristic Solution Procedures for Simple Assembly Line Balancing", **European Journal of Operations Research**, Cilt 168, 666–693, 2006.
- Becker, C. ve Scholl, A., "A Survey on Problems and Methods in Generalized Assembly Line Balancing", **European Journal of Operational Research**, Cilt 168, 694–715, 2006.
- Boysen, N., Flidner, M. ve Scholl, A., "A Classification of Assembly Line Balancing Problems", **European Journal of Operational Research**, Cilt 183, 674–693, 2007.
- Kalender, F.Y., Yılmaz, M.M. ve Türkbey, O., "Montaj Hattı Dengeleme Problemine Bulanık Bir Yaklaşım", **Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 23, No 1, 129–138, 2008.
- Thomopoulos, N.T., "Line Balancing-Sequencing for Mixed-Model Assembly", **Management Science**, Cilt 14, No 2, B59–B75, 1967.
- Thomopoulos, N.T., "Mixed Model Line Balancing with Smoothed Station Assignments", **Management Science**, Cilt 16, No 9, 563–603, 1970.
- Macaskill, J.L.C., "Production Line Balances for Mixed-model Lines", **Management Science**, Cilt 19, No 4, 423–434, 1972.
- Chakravarty, A.K. ve Shtub, A., "Balancing Mixed-model Lines with In-process Inventories", **Management Science**, Cilt 31, No 9, 1161–1174, 1985.
- Chakravarty, A.K. ve Shtub, A., "A Cost Minimization Procedure for Mixed-model Production Lines with Normally Distributed Task Times", **European Journal of Operational Research**, Cilt 23, 25–36, 1986.
- Gökçen, H. ve Erel, E., "Karışık Modelli Montaj Hattı Dengeleme Problemi için bir Sezgisel Yöntem", **Verimlilik Dergisi**, Cilt 2, 131–140, 1995.
- Askin, R.G. ve Zhou, M., "A Parallel Station Heuristic for the Mixed-model Production Line Balancing problem", **International Journal of Production Research**, Cilt 35, No 11, 3095–3105, 1997.
- Gokcen, H. ve Erel, E., "A Goal Programming Approach to Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem", **International Journal of Production Economics**, Cilt 48, 177–185, 1997.
- Gokcen, H. ve Erel, E., "Binary Integer Formulation for Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem", **Computers and Industrial Engineering**, Cilt 34, 451–461, 1998.
- McMullen, P.R. ve Frazier, G.V., "A Heuristic for Solving Mixed-Model Line Balancing Problems with Stochastic Task Durations and

- Parallel Stations”, **International Journal of Production Economics**, Cilt 51, 177–190, 1997.
15. McMullen, P.R. ve Frazier, G.V., “Using Simulated Annealing to Solve a Multiobjective Assembly Line Balancing Problem with Parallel Workstations”, **International Journal of Production Research**, Cilt 36, No 10, 2717–2741, 1998.
  16. Erel, E. ve Gokcen, H., “Shortest-Route Formulation of Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem”, **European Journal of Operational Research**, Cilt 116, 194–206, 1999.
  17. Matanachai, S. ve Yano, C.A., “Balancing Mixed-Model Assembly Lines to Reduce Work Overload”, **IIE Transactions**, Cilt 33, 29–42, 2001.
  18. Vilarinho, P.M. ve Simaria, A.S., “A Two-Stage Heuristic Method for Balancing Mixed-Model Assembly Lines with Parallel Workstations”, **International Journal of Production Research**, Cilt 40, No 6, 1405–1420, 2002.
  19. McMullen, P.R. ve Tarasewich, P. “Using Ant Techniques to Solve the Assembly Line Balancing Problem”, **IIE Transactions**, Cilt 35, 605–617, 2003.
  20. Bukchin, J. ve Rubinovitz, J., “A Branch-and-Bound Based Solution Approach for the Mixed-Model Assembly Line-Balancing Problem for Minimizing Stations and Task Duplication Costs”, **European Journal of Operational Research**, Cilt 174, No 1, 492–508, 2006.
  21. Haq, A.N., Jayaprakash, J., ve Rengarajan, K., “A Hybrid Genetic Algorithm Approach to Mixed-Model Assembly Line Balancing”, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Cilt 28, 337–341, 2006.
  22. Vilarinho, P.M. ve Simaria, A.S., “ANTBAL: An Ant Colony Optimization Algorithm for Balancing Mixed-Model Assembly Lines with Parallel Workstations”, **International Journal of Production Research**, Cilt 44, No 2, 291–303, 2006.
  23. Akpınar, S. ve Bayhan, G.M., “A Hybrid Genetic Algorithm for Mixed Model Assembly Line Balancing Problem with Parallel Workstations and Zoning Constraints”, **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, Cilt 24, 449–457, 2011.
  24. Yağmahan, B., “Mixed-Model Assembly Line Balancing Using a Multi-Objective Ant Colony Optimization Approach”, **Expert Systems with Applications**, Cilt 38, No 10, 12453–12461, 2011.
  25. Mamun, A.A., Khaled, A.A., Ali, S.M. ve Chowdhury, M.M., “A Heuristic Approach for Balancing Mixed-Model Assembly Line of Type I Using Genetic Algorithm”, **International Journal of Production Research**, Cilt 50, No 18, 5106–5116, 2012.
  26. Akpınar, S., Bayhan, G.M. ve Baykasoglu, A., “Hybridizing Ant Colony Optimization via Genetic Algorithm for Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem with Sequence Dependent Setup Times Between Tasks”, **Engineering Applied Soft Computing**, Cilt 13, 574–589, 2013.
  27. Chiang, W.C., “Tabu Search with Target Analysis to the Assembly Line Balancing Problems-An Artificial Intelligence Approach”, **Artificial Intelligence and Manufacturing Research Planning Workshops**, 30–34, 1996.
  28. Scholl, A. ve Voß, S. “Simple Assembly Line Balancing – Heuristic Approaches”, **Journal of Heuristics**, Cilt 2, 217–244, 1996.
  29. Chiang, W.C., “The Application of a Tabu Search Metaheuristic to the Assembly Line Balancing Problem”, **Annals of Operations Research**, Cilt 77, 209–227, 1998.
  30. Pastor, R., Andres, C., Duran, A. ve Pe’rez, M., “Tabu Search Algorithms for an Industrial Multi-Product and Multi-Objective Assembly Line Balancing Problem, with Reduction of the Task Dispersion”, **Journal of the Operational Research Society**, Cilt 53, No 12, 1317–1323, 2002.
  31. Lapierre, S.D., Ruiz, A. ve Soriano, P., “Balancing Assembly Lines with Tabu Search”, **European Journal of Operational Research**, Cilt 168, 826–837, 2006.
  32. Suwannarongsri, S., Limnararat, S. ve Puangdownreong, D., “A Hybrid Tabu Search Method for Assembly Line Balancing”, **Proc. the 7th WSEAS International Conference on Simulation, Modelling and Optimization (SMO’07)**, 443–448, 2007a.
  33. Suwannarongsri, S., Limnararat, S. ve Puangdownreong, D., “A New Hybrid Intelligent Method for Assembly Line Balancing”, **Proc. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management**, 1115–1119, 2007b.
  34. 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**, Cilt 3, No 1, 3–18, 2008.
  35. Esmailian, G.R., Sulaiman, S., Ismail, N., Ahmad, M.M.H.M. ve Hamed, M., “Application of MATLAB to Create Initial Solution for Tabu Search in Parallel Assembly Lines Balancing”, **International Journal of Computer Science and Network Security**, Cilt 8, 132–136, 2008.
  36. Özcan, U., Çerçioğlu, H., Gökçen, H. ve Toklu, B., “A Tabu Search Algorithm for the Parallel Assembly Line Balancing Problem”, **Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 22, No 4, 313–323, 2010.

37. Ismail, N., Esmailian, G.R., Hamed, M. ve Sulaiman, S., "Balancing of Parallel Assembly Lines with Mixed-Model Product", **International Conference on Management and Artificial Intelligence IPEDR**, Cilt 6, 120–124, 2011.
38. Özcan, U. ve Toklu, B., "A Tabu Search Algorithm for Two-Sided Assembly Line Balancing", **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Cilt 43, No 7-8, 822–829, 2009.
39. Özcan, U., Gökçen, H. ve Toklu, B., "Balancing Parallel Two-Sided Assembly Lines", **International Journal of Production Research**, Cilt 48, No 16, 4767–4784, 2010.
40. Özcan, U. ve Peker, A., "Karışık Modelli U-tipi Montaj Hatlarında Hat Dengeleme ve Model Sıralama Problemleri için Yeni bir Sezgisel Yaklaşım", **Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 22, No 2, 277–286, 2007.
41. Suwannarongsri, S. ve Puangdownreong, D., "Optimal Balancing of Multi-objective U-shaped Assembly Lines using the TSGA Method", **IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM 2008)**, 307–311, 2008.
42. Bard, J.F., Shtub, A. ve Joshi, S.B., "Sequencing Mixed-Model Assembly Lines to Level Parts Usage and Minimize Line Length", **The International Journal of Production Research**, Cilt 32, No 10, 2431–2454, 1994.
43. McMullen, P.R., "JIT Sequencing for Mixed-Model Assembly Lines with Setups using Tabu Search", **Production Planning & Control: The Management of Operations**, Cilt 9, No 5, 504–510, 1998.
44. Boysen, N., Kiel, M. ve Scholl, A., "Sequencing Mixed-Model Assembly Lines to Minimise the Number of Work Overload Situations", **International Journal of Production Research**, Cilt 49, No16, 4735–4760, 2011.
45. Majidi, M., Najafi, E. ve Pour, N.S., "Solving the Problem of Mixed-Model Assembly Line in JIT Production System using PSO and TS Algorithms Combination", **Journal of Applied Sciences and Engineering Management**, Cilt 1, No 1, 36–45, 2013.
46. Esmailian, G.R., Sulaiman, S., Ismail, N., Hamed, M. ve Ahmad, M.M.H.M., "A Tabu Search Approach for Mixed-Model Parallel Assembly Line Balancing Problem (Type II)", **International Journal of Industrial and Systems Engineering**, Cilt 8, No 4, 407–431, 2011.
47. Scholl, A., **Balancing and Sequencing of Assembly Lines**, Physica-Verlag, Darmstadt, 1995.
48. Glover, F., "Tabu Search-Part I", **ORSA Journal on Computing**, Cilt 1, No 3, 190–206, 1989.
49. Glover, F., "Tabu Search-Part II", **ORSA Journal on Computing**, Cilt 2, No 1, 4–32, 1990.
50. Yağmahan, B. ve Yenisey, M.M., "Scheduling Practice and Recent Developments in Flow Shop and Job Shop Scheduling", **Computational Intelligence in Flow Shop and Job Shop Scheduling**, Editör: Chakraborty U.K., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 261–300, 2009.
51. Blazewicz, J., Ecker, K.H., Pesch, E., Schmidt, G. ve Weglarz, J., **Scheduling Computer and Manufacturing Processes**, Springer-Verlag, Berlin, 1996.
52. Helgeson, W.B. ve Birnie, D.P., "Assembly Line Balancing Using the Ranked Positional Weight Technique", **Journal of Industrial Engineering**, Cilt 12, No 6, 394–398, 1961.
53. Yağmahan, B., **Karışık Modelli Montaj Bantlarında Hat Dengeleme ve Çizelgeleme**, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 1999.
54. Scholl, A. ve Klein, R., "SALOME: A Bidirectional Branch and Bound Procedure for Assembly Line Balancing", **INFORMS Journal on Computing**, Cilt 9, 319–334, 1997.
55. Anderson, E.J. ve Ferris, M.C., "Genetic Algorithms for Combinatorial Optimization: The Assembly Line Balancing Problem", **ORSA Journal on Computing**, Cilt 6, No 2, 161–173, 1994.
56. Suresh, G., Vinod, V.V. ve Sahu, S., "A Genetic Algorithm for Assembly Line Balancing", **Production Planning and Control**, Cilt 7, No 1, 38–46, 1996.
57. Ponnambalam, S.G., Aravindan, P. ve Naidu, G.M., "A Multi-Objective Genetic Algorithm for Solving Assembly Line Balancing Problem", **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Cilt 16, 341–352, 2000.
58. Haq, A.N., Jayaprakash, J. ve Rengarajan, K., "A Hybrid Genetic Algorithm Approach to Mixed-Model Assembly Line Balancing", **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Cilt 28, 337–341, 2006.
59. Gen, M. ve Cheng, R., **Genetic Algorithms and Engineering Optimization**, John Wiley&Sons, New York, 2000.

