

PARALEL MONTAJ HATTI DENGEMELEME PROBLEMLERİ İÇİN BİR TAVLAMA BENZETİMİ YAKLAŞIMI

Hakan ÇERÇİOĞLU*, **Uğur ÖZCAN****, **Hadi GÖKÇEN*** ve **Bilal TOKLU***

*Endüstri Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi 06570, Maltepe, Ankara, Türkiye

**Endüstri Mühendisliği Bölümü, Selçuk Üniversitesi 42075 Selçuklu, Konya, Türkiye

cercioglu@gazi.edu.tr, uozcan@selcuk.edu.tr, hgokcen@gazi.edu.tr, btoklu@gazi.edu.tr

(Geliş/Received:12.09.2008 ; Kabul/Accepted:01.04.2009)

ÖZET

Birden fazla montaj hattına sahip imalat sistemlerinin örneklerine Sanayide oldukça yaygın olarak rastlanmaktadır. Bu hatların ürettikleri ürünlerin birbirinin aynı ya da benzeri oldukları ve çevrim zamanlarının birbirine eşit ya da yakın oldukları görülmektedir. Bundan dolayı da, Gökçen vd. (2006), üretim sisteminin verimliliğinin ve kaynak kullanımının artırılması için, paralel bitişik hatların bazı istasyonlarının iş yüklerinin birleştirilmesini önermişlerdir. Birden fazla hattın ortak bir şekilde dengelendiği bu problem, Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemi (PMHDP) olarak isimlendirilmiştir. PMHDP'nin ana amacı en az istasyon sayısına (veya operatör sayısına) ulaşılmasıdır. Bu çalışmada PMHDP için, tavlama benzetimi (TB) tabanlı bir yaklaşım geliştirilmiştir. Çalışma temel olarak Gökçen vd. (2006) çalışmasını ele alarak geliştirilmiştir. Önerilen yaklaşım, sayısal bir örnekle açıklanmış ve bu yaklaşımın performansı Gökçen vd. (2006) çalışmasındaki test verileri üzerinde denenmiştir. Yapılan hesaplama çalışmalarında, 95 test problemi için önerilen yaklaşım, 47 tane optimallliği kanıtlanmış sonucu yakalamış ve Gökçen vd. (2006) çalışmasından iyi 6 tane sonuç bulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Montaj hattı dengeleme, paralel montaj hatları, tavlama benzetimi.

A SIMULATED ANNEALING APPROACH FOR PARALLEL ASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEM

ABSTRACT

Production systems which has more than one assembly line is widely seen in industry. These lines produce same or similar products, and their cycle times are generally considered similar. So, Gökçen et al. (2006) suggested to combine workload of some stations on parallel consecutive lines, in a convenient way, for improving the resource utilization and the efficiency of the production system. This common balancing of more than one assembly line is named Parallel Assembly Line Balancing Problem (PALBP). The major aim of PALBP is to obtain minimum number of stations (or operators). In this paper, a simulated annealing (SA) based approach is developed for PALBP. This paper is built directly on the study of Gökçen et al. (2006). The proposed approach is illustrated with a numerical example and its performance is tested on data set taken from Gökçen et al. (2006). In the computational studies, for 95 test problems, the proposed approach found 47 proven optimal solutions and 6 solutions superior to Gökçen et al. (2006).

Keywords: Assembly line balancing, parallel assembly lines, simulated annealing.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Akış tipi imalat sistemleri içerisinde montaj hatları en çok kullanılan üretim yöntemlerinden biri olarak önemli bir yer tutmaktadır. Yüksek kaliteli standartlaştırılmış ürünlerin imalatında en geniş çaplı olarak kullanılan üretim tekniğidir. Aynı zamanda düşük

miktarlardaki özelleştirilmiş ürünlerin de imalatlarında montaj hatları önem kazanmaktadır. (örn. özellikle otomotiv endüstrisinde parti tipi üretimde). Montaj hatları, birbirlerine konveyör veya benzeri bir mekanik malzeme taşıma ekipmanı ile bağlanmış iş istasyonlarının sıralı olduğu bir tesis yerleşimi tipi olarak tanımlanmıştır [1]. Bu hatlar alt parçaların

birleştirilerek bir son mamul şekline getirilmesi için kullanılmaktadır. İş parçaları (görevler) sıralı olarak hat boyunca başlatılır ve bir istasyondan diğerine aktarılır. Her istasyonda çevrim zamanı (standart bir akış temposunda hattın ardışık çıkan iki birim arasındaki zaman) dikkate alınarak belirli görevler tekrarlanır. Montaj Hattı Dengeleme Problemi (MHDP); montaj maliyetlerini en küçük hale getirecek, talepleri karşılayacak ve montaj sürecindeki kısıtları karşılayacak şekilde, görevlerin iş istasyonlarına mümkün atamasını kapsamaktadır [2]. MHDP, orta dönem üretim planlama faaliyetleri içerisinde çok büyük bir öneme sahiptir [3].

Montaj hatları, geleneksel montaj hatları (tek modelli ve çok/karışık modelli) ve U-tipi montaj hatları (tek modelli ve çok/karışık modelli) olmak üzere iki genel grupta sınıflandırılabilir.

Geleneksel Düz MHDP üzerinde ilk analitik çalışma Salveson [4] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada MHDP'nin bir matematiksel formülasyonu gösterilmiş ve bu problem için bir çözüm önerisi yapılmıştır. MHDP'nin çözümü için bu çalışmayı takip eden bir çok çözüm önerisi yapılmıştır. Bu çalışmalar hem analitik, hem de sezgisel yöntemleri içermektedir.

Geleneksel Düz MHDP'nin çözümü hakkındaki çalışmalar için yayınlanmış çeşitli tarama makaleleri incelenerek detaylı bilgi edinilebilir [1, 3, 5, 6, 7, 8, 9]. U-tipi MHDP ise ilk defa Miltenburg ve Wijngaard [10] tarafından ele alınmıştır. U-tipi MHDP için tamsayı programlama modeli Urban [11] tarafından geliştirilmiştir. Bu güne kadar U-tipi MHDP için bazı çözüm teknikleri geliştirilmiştir [12-18].

Görülebileceği gibi Geleneksel Düz MHDP ve U-tipi MHDP üzerinde geniş bir literatür çalışması mevcuttur. Diğer taraftan paralel hatlar üzerindeki çalışmalar oldukça azdır. Paralel hatların tasarımında, hatların sayısını ve donanımını dinamik olarak belirlemek için Süer ve Dağlı [19] sezgisel yöntem ve algoritmalar önermişlerdir. Aynı zamanda Süer [20] çalışmasında, tek ürün imalatı için alternatif montaj hattı tasarım stratejileri üzerinde çalışma yapmıştır. Paralel iş istasyonu kavramını içeren diğer çalışmalar ise basit MHDP [21] ve karışık modelli MHDP [22-24] üzerinde odaklanmıştır). Paralel hatlar üzerindeki bu çalışmalar Gökçen vd.'nin [25] yaklaşımından mantık olarak farklıdır. Bu çalışmada tanımlanan yeni problem; birden fazla geleneksel montaj hattının ortak kaynaklarla dengelenmesi üzerine oluşturulmuştur. Çalışmalarında, bu problem Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemi (PMHDP) olarak isimlendirilmiştir. PMHDP'nin ana amacı birden fazla montaj hattının beraberce eş zamanlı olarak dengelenmesidir. Hatların eş zamanlı olarak bir ortak kaynakla çalışması, kaynakların en küçüklenmesi açısından çok büyük önem taşımaktadır. Bunun yanında Benzer vd. [26], PMHDP için bir şebeke modeli geliştirmiştir.

Önerilen çalışma, Gökçen vd.'nin [25] PMHDP çalışmasıyla doğrudan bağlantılı bir çalışmadır.

Çalışmamızda, PMHDP'nin çözümüne yönelik TB tabanlı bir yaklaşım önerilmiştir. Bilindiği kadarıyla, önerilen yaklaşım PMHDP için uygulanan ilk meta-sezgisel yöntemdir. Çalışmanın geri kalan kısmı şu şekilde düzenlenmiştir: Bir sonraki bölümde; PMHDP ele alınmış ve küçük bir problem üzerinde açıklamaları yapılmıştır. Bölüm 3'te, önerilen yaklaşım açıklanmış ve bir örnek problem bu yaklaşımla çözülmüştür. Önerilen yaklaşımın performansı ve Gökçen vd. [25] çalışması ile olan kıyaslaması Bölüm 4 içerisinde yapılmıştır. Son olarak da öneri ve sonuç kısmı Bölüm 5'de ele alınmıştır.

2. PARALEL MONTAJ HATTI Dengeleme Problemi (PMHDP) (PARALEL ASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEM (PALBP))

PMHDP, Süer [20] ve Süer ve Dağlı [19] çalışmalarındaki paralel hat tasarımı yaklaşımlarında isim olarak kullanılmaktadır. Birden fazla hattın bütün eş zamanlı dengelenmesi düşüncesi ilk defa Gökçen vd. [25] tarafından ortaya atılmıştır. PMHDP, istasyon sayısının en küçüklenmesi için iki veya daha fazla hattın birlikte dengelenmesini içermektedir. Montaj hatlarının ortak istasyonlarına görevlerin atanması için her bir montaj hattında üretilen her bir ürünün öncelik diyagramları ayrı ayrı dikkate alınmıştır. Gökçen vd. [25] çalışmasına göre, eğer bir fabrikada ürünler birden fazla hatta üretiliyor ve bu hatların tasarımı da birbirine paralel olarak yapılmışsa, PMHDP yaklaşımı kaynak kullanımında oldukça önemli geliştirmeler sağlayacaktır. Bu çalışmalarında PHMDP için aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

- Her bir montaj hattında sadece bir çeşit ürün üretilmektedir.
- Her bir ürünün öncelik diyagramları bilinmektedir.
- Her bir ürün için görev süreleri belirlidir.
- Her hattın her istasyonunda çalışan operatörler esnektir (her türlü işi yapabilirler).
- Hattın her iki tarafında da çalışılabilmektedir.

Paralel Montaj hatlarının geleneksel Düz Montaj hattı ve U-tipi hatlar gibi diğer Montaj hattı donanımları ile kıyaslandığında çeşitli avantajları mevcuttur: (i) aynı ürün veya benzer ürünlerin birbirine paralel bitişik hatlarda üretilebilmesini sağlar, (ii) ortak kaynak kullanımına izin vererek boş zamanları azaltarak hatların verimliliğini yükseltir, (iii) her bir montaj hattı için değişik çevrim süreleriyle üretim olanağı sağlar, (iv) operatörler arasındaki iletişim ve gözlenebilirlik olanaklarını artırır, (v) operatör gereksinimlerini azaltır, (vi) alet ve ekipman maliyetlerini azaltır.

Gökçen vd.'nin [25] matematiksel modelinde aşağıdaki notasyon kullanılmıştır;

C :çevrim zamanı

h :hat numarası, $h = 1, \dots, H$.

k :istasyon numarası, $k = 1, \dots, K$.

$\|M_{hk}\|$:h hattındaki k istasyonuna atanabilecek görevlerin sayısı

n_h :h hattındaki görev sayısı

t_{hi} :h hattındaki i görevinin tamamlanma zamanı.

K_{max} :en büyük istasyon sayısı.

P_h :h hattındaki öncelik diyagramındaki öncelik ilişkileri kümesi

x_{hik} :h hattındaki i görevi k istasyonuna atanmışsa 1, diğer durumlarda 0 değerini alan tamsayı değişken

U_{hk} :k istasyonu h hattında kullanılmışsa 1, diğer durumlarda 0.

z_k :eğer k istasyonu kullanılmışsa 1, diğer durumlarda 0.

Gökçen vd.'nin [25] PMHDP için geliştirdikleri matematiksel model şu şekildedir:

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{Min} \sum_{k=\lfloor k_{\min} \rfloor}^{K_{\max}} z_k \quad (1)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{k=1}^{K_{\max}} x_{hik} = 1, \quad i = 1, \dots, n_h, \quad h = 1, \dots, H \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{n_h} t_{hi} x_{hik} + \sum_{i=1}^{n_{h+1}} t_{(h+1)i} x_{(h+1)ik} \leq C z_k, \quad k = 1, \dots, K_{\max}, \quad h = 1, \dots, H - 1 \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{n_h} x_{hik} - \|M_{hk}\| U_{hk} \leq 0 \quad h = 1, \dots, H \quad k = 1, \dots, K_{\max} \quad (4)$$

$$U_{hk} + U_{(h+a)k} \leq 1 \quad h = 1, \dots, H - 2 \quad a = 2, \dots, H - h \quad k = 1, \dots, K_{\max} \quad (5)$$

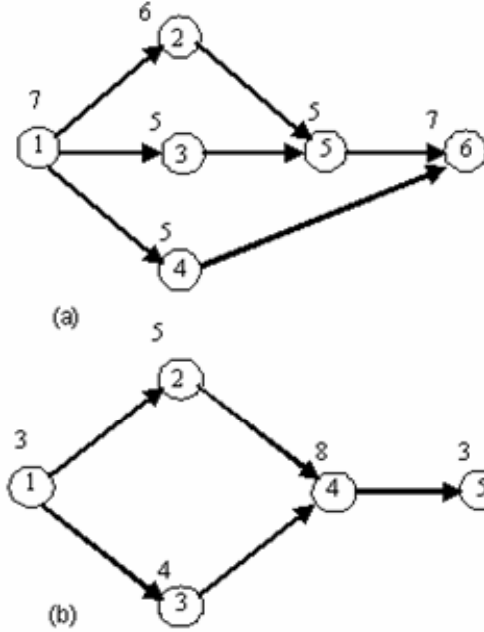
$$\sum_{k=1}^{K_{\max}} (K_{\max} - k + 1)(x_{hrk} - x_{hsk}) \geq 0, \quad \forall (r, s) \in P_h \quad (6)$$

$$x_{hik}, z_k, U_{hk} \in \{0, 1\}$$

h, i, k için (2) nolu kısıt her bir görevin bir istasyona ve aynı zamanda da bir sefer atanmasını sağlamaktadır. (3) nolu kısıt herhangi bir istasyonun iş yükünün çevrim zamanını aşmamasını sağlamaktadır. (4) ve (5) nolu kısıtlar, h hattının k istasyonunda çalışan bir operatörün sadece paralel bitişik hatlardaki görevleri yapabildiğini sağlar. (Örn: h hattındaki operatör $h+1$ veya $h-1$ hatlarındaki görevleri de üstlenebilir.) (6) nolu kısıt h hattı üzerindeki öncüllük ilişkisinin bozulmamasını sağlamaktadır.

Gökçen vd. [25] makalesinde ele alınan 6 görevli ve 5 görevli örnek probleminin öncelik diyagramları sıra-

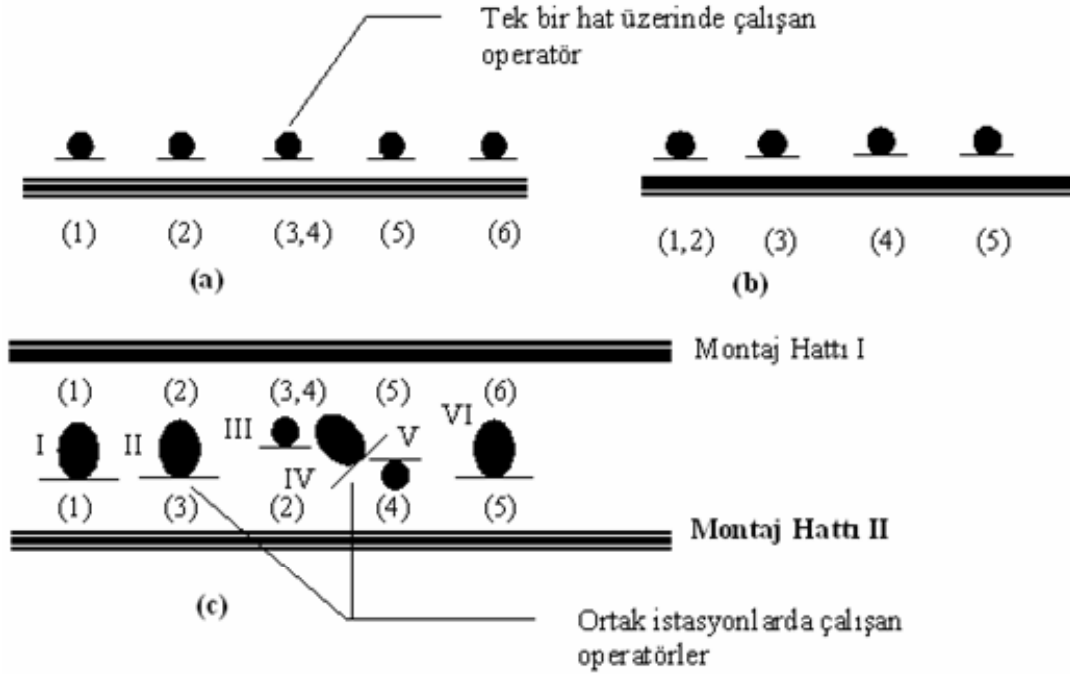
sıyla Şekil 1(a) ve Şekil 1(b)'de verilmiştir. Çevrim zamanlarının 10 zaman birimi olduğu varsayılmıştır. Birinci diyagramda ürün 1 için verilen görevler



Şekil 1. Öncelik Diyagramları (a) Ürün 1 (Montaj Hattı 1) için ve (b) Ürün 2 (Montaj Hattı 2) için (Precedence diagrams for a) product 1 (assembly line 1) and product 2 (assembly line 2)

(düğümler), ikinci diyagram için verilenlerle aynı değildir. Örneğin, birinci ürünün (veya hattın) 1. görevi, ikinci ürünün (veya hattın) 1. görevinden farklıdır. Şekil 2(a) ve 2(b) sırasıyla 6-görevli örnek problem ve 5 görevli örnek problemin geleneksel hat dengelemeyle çözümünü göstermiştir. Şekil 2(a)'da görevler sırasıyla 7,6,10,5, ve 7 istasyon zamanlarıyla beş iş istasyonuna atanmıştır. Yine aynı şekilde, Şekil 2(b)'de görevler sırasıyla 8, 4, 8, ve 3 istasyon zamanlarıyla dört istasyonuna atanmıştır. Şekil 2(c) ise örnek problemlerin paralel montaj hattı yaklaşımıyla çözümünü göstermektedir.

Bu çözümde, İstasyon I'deki operatör Montaj Hattı I ve Montaj Hattı II'nin 1 numaralı görevlerini tamamlamaktadır. Bahsedildiği gibi, Paralel Montaj Hatlarındaki operatörler iki ayrı ürün üzerinde aynı çevrim zamanı içerisinde çalışabilmektedirler. Aynı zamanda görülmektedir ki; bu çözüm istasyon zamanları sırasıyla 10,10,10, 10, 8 ve 10 olmak üzere 6 (geleneksel istasyon çözümüne göre 3 istasyon daha az) iş istasyonundan oluşmuştur. Hem Montaj Hattı I, hem de Montaj Hattı II için açılan iş istasyonlarına *ortak iş istasyonları*, diğer tip iş istasyonlarına ise *ayrık iş istasyonları* adı verilmiştir. Buna göre, I, II, IV ve VI istasyonları ortak iş istasyonlarını, III ve V istasyonları ise ayrık iş istasyonlarını oluşturmaktadır.



Şekil 2. (a) 6 görevli geleneksel montaj hattı problemi için görev atamaları, (b) 5 görevli geleneksel montaj hattı problemi için görev atamaları, ve (c) PMHDP için görev atamaları (The task assignments of (a) traditional assembly line for the 6-task problem, (b) traditional assembly line for the 5-task problem and (c) parallel assembly lines)

3. ÖNERİLEN YAKLAŞIM (THE PROPOSED APPROACH)

3.1. Tavlama Benzetimine (TB) Genel Bakış (Overview of the Simulated Annealing (SA))

Bu çalışmada PMHDP için TB tabanlı bir sezgisel yaklaşım önerilmiştir. TB ilk defa Kirkpatrick vd. [27] tarafından ortaya konulan stokastik bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım, metallerin fiziksel olarak tavlınması işleminden esinlenilerek kombinatoriyal problemlerin çözümleri için geliştirilmiştir. Bu işlem içerisinde, bir metal eriyene kadar ısıtılır, ve metalin sıcaklığı, metal en düşük enerji durumuna veya taban durumuna erişinceye kadar yavaşça düşürülür.

Temel bir TB modeli, belirlenen başlangıç parametreleri (örn. başlangıç sıcaklığı (T), soğutma oranı (R), ve her bir enerji seviyesindeki iterasyon sayısı (IT)) ile başlangıç durumuna getirilir ve başlangıç çözümü ve onun maliyet değeri ile çözüm başlatılır. Tanımlanan bu çözüm, güncel çözüm olarak kabul edilir. Güncel çözüm üzerinde hareket operatörü (çaprazlama ve yerleştirme gibi) uygulanarak bir komşuluk çözümü elde edilir. Komşu çözümünün maliyeti hesaplanarak güncel çözüm ile karşılaştırması yapılır. Eğer komşu çözümün maliyeti güncel çözümün maliyetinden daha iyi ise, bu çözüm güncel çözüm olarak kabul edilir ve komşu çözümün değerini alır. Eğer komşu çözümün maliyeti güncel çözümün maliyetinden daha kötü ise, Metropolis kriteri uygulanır; bu çözüm $\exp(-\Delta/T)$ olasılığı ile güncel çözüm olarak kabul edilir. (Δ , komşu çözümden, güncel çözümü çıkarmak suretiyle elde edilen maliyetteki değişimi ifade etmektedir.) Diğer durumda ise güncel çözüm

değişmeden kalır. Bu arama mekanizması, istenilen bir durdurma kriterine ulaşıncaya kadar her bir sıcaklık düzeyinde IT kez tekrarlanır. Her IT kerde, sıcaklık $T=T \times R$ eşitliği ile hesaplanır.

3.2. TB tabanlı Yaklaşımın Geliştirilmesi (Developing the SA-based approach)

PMHDP için önerilen TB-tabanlı algoritma şu adımlarla açıklanmıştır:

Adım 0: Verileri gir: öncüllük ilişkileri, görev zamanları, ve her bir hattın çevrim zamanları. TB parametrelerini gir: T, başlangıç sıcaklığı; R, soğutma katsayısı; IT, her bir sıcaklıktaki belirlenen hareket sayısı; p, hareket operatörünün seçim olasılığı ve T_{min} , belirlenmiş en düşük sıcaklık. Eşitlik 1'i kullanarak Teorik minimum istasyon sayısını (K_{min}) bul.

$$K_{min} = \left[\sum_h \left(\sum_i t_{hi} / C_h \right) \right]^+ \quad (1)$$

Bu eşitlikte C_h h hattının çevrim zamanını, t_{hi} h hattındaki i'nci görevin görev zamanını ve $[X]^+$ ise X'e eşit veya büyük en küçük tamsayıyı ifade etmektedir. Gökçen vd.'nin (2006) EKOK yöntemini kullan.

Adım 1: Bir başlangıç çözümü (S_i) oluştur ve bu çözümü güncel çözüme (S_c) ve mümkün çözüme (S_f) ata ($S_c=S_i$ ve $S_f=S_i$).

Adım 2: S_c 'nin iki ardışık istasyonunu birleştirerek yeni bir güncel çözüm (S_c) elde et.

- Adım 3:** Eğer S_c mümkün ise $S_f=S_c$, S_f 'den toplam istasyon sayısını (NS) hesapla ve Adım 2'ye dön, diğer durumlarda E_c 'yi (S_c 'nin maliyeti) hesapla ve TB parametrelerini yükle. $n=1$.
- Adım 4:** S_c 'den hareket operatörü ile bir komşuluk çözümü (S_n) üret ve bu komşuluk çözümünün maliyetini (E_n) hesapla.
- Adım 5:** Maliyetteki değişimi hesapla, $\Delta = E_n - E_c$
- Adım 6:** Eğer $\Delta < 0$ ise $S_c=S_n$, $E_c=E_n$ yap ve Adım 8'e git.
- Adım 7:** Eğer $\Delta > 0$ ise komşuluk çözümü $\exp(-\Delta/T)$ olasılığı ile güncel çözüm olarak kabul et ve $S_c=S_n$, $E_c=E_n$ yap. Diğer durumda S_c ve E_c 'yi değiştirme ve Adım 11'e git.
- Adım 8:** Eğer S_c mümkün bir çözüm ise $S_f=S_c$ yap, NS'yi S_f 'den hesapla, diğer durumda Adım 11'e git.
- Adım 9:** Eğer $NS = K_{\min}$ ise Adım 13'e git.
- Adım 10:** TB sürecini durdur ve Adım 2'ye git.
- Adım 11:** Eğer $n=IT$ ise şu parametreleri değiştir: $T=TxR$, ve $n=1$. Diğer durumda $n=n+1$ yap ve Adım 4'e dön.
- Adım 12:** Eğer $T \geq T_{\min}$ ise Adım 4'e dön
- Adım 13:** Dur.

Önerilen metodun hiyerarşik yapısını göstermek üzere aşağıdaki Şekil 3 üzerinde akış şeması verilmiştir.

Başlangıç Çözümü: Önerilen TB yaklaşımının başlangıç çözümü Erel vd. [15] çalışmasındaki Çözüm Üretici (Solution Generator-SG) mekanizması ile oluşturulmaktadır. SG başlangıçta tüm görevleri ayrı istasyonlara sırasıyla atamakta ve en küçük toplam iş yükünü sağlayacak şekilde bir çevrim zamanını aşma durumuyla karşılaşılana kadar istasyon sayısını azaltmak için bitişik olan iki istasyonu birleştirmektedir. Eğer mümkün olmayan bir durum oluşursa, bu uygun olmayan çözüm TB için başlangıç çözümü olarak kullanılmaktadır. SG'nin yapmış olduğu ilk atama sonucunda elde edilen istasyon sayısı görev sayısına eşit olduğundan, bu ilk atama çevrim zamanına ve öncüllük kısıtlarına göre her zaman mümkündür. (uygun çözümdür). Eğer bir hat dengesi uygun çözüm değilse, bu denge TB için başlangıç çözümü olarak kullanılmaktadır.

Komşuluk Üretimi: Yeni bir hat dengesi, iki hareket operatörü kullanılarak görevlerin istasyonlar arasında tekrar atanmasıyla üretilmektedir: paralel hatların değişik istasyonlarından p olasılığı ile rassal seçilmiş iki görevin çaprazlanması (swap operatörü) ve paralel hatlardan en küçük istasyon zamanına sahip farklı bir istasyona $(1-p)$ olasılığı ile rassal seçilmiş bir görevin araya konulması (insert operatörü). Her bir durumda sadece öncüllük ilişkileri kısıtları ve atama kısıtları kontrol edilmektedir. Eğer uygun bir çözüm oluşuyorsa, bu yeni denge komşuluk çözümü olarak kabul edilir, diğer durumda ise uygun bir hareket bulunana kadar süreç devam ettirilir.

Maliyet Fonksiyonu: Oluşturulan çözümlerin kalitesini değerlendirmek için en büyük istasyon zamanı maliyet fonksiyonu (E) olarak kullanılmıştır. Bu maliyet fonksiyonu aynı zamanda Erel vd. [15] çalışmasında da kullanılmıştır.

Durdurma Kriteri: TB süreci uygun bir çözüm bulunduğu durumlarda durdurulur, sistem donduğunda veya teorik minimum istasyon sayısına ulaşıldığında arama sürecinden çıkılır.

3.3. Açıklamalı Örnek (Illustrative Example)

Önerilen yaklaşım, Tablo 1 'de verilen Gökçen vd. [25] tarafından PMHDP için Jackson'ın klasik probleminden değiştirilerek elde edilen iki paralel hatlı test problemi üzerinde gösterilmiştir. Çevrim zamanı 8 olarak belirlenmiş, ve algoritmanın parametreleri şu şekilde belirlenmiştir: $T_0 = 100$, $T_{\min} = 10^{-5}$, $IT = 21$, $R = 0.998$, $p = 0.5$. Çözüm sürecinin adım adım gösterimi Şekil 4-8 üzerinde gerçekleştirilmiştir

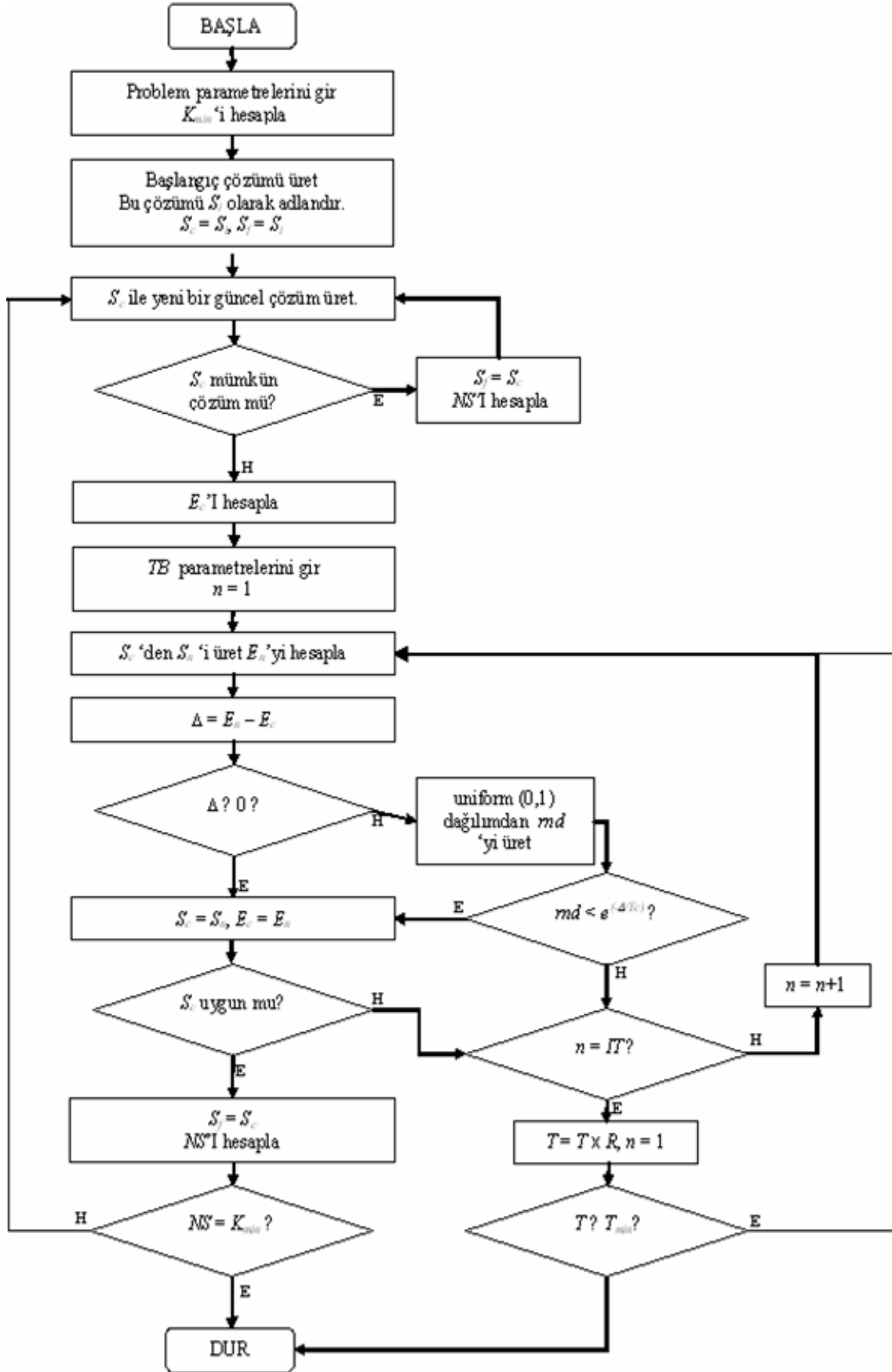
Tablo 1. Örnek problem için veriler (Data of the example problem)

Montaj Hattı I			Montaj Hattı II		
Görev	Hemen Takipçiler	Görev Zamanı	Görev	Hemen Takipçiler	Görev Zamanı
1	2, 3, 4, 5	6	1	2, 3, 4, 5	6
2	6	2	2	6	2
3	7	5	3	7	5
4	7	7	4	7	7
5	7	1	5	7	1
6	8	2	6	8	2
7	9	3	7	9	3
8	10	6	8	10	6
9	11	5	9	-	5
10	11	5	10	-	5
11	-	4			

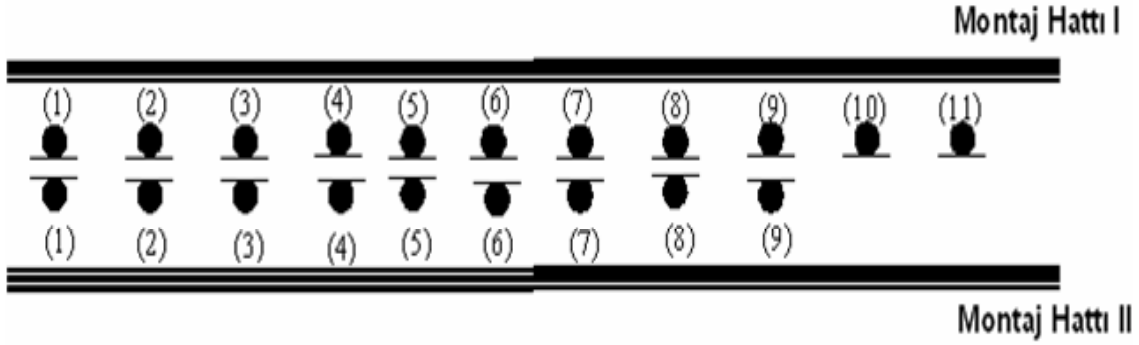
Çözüm sürecinin başında her bir görev bağımsız hatlar üzerinde ayrı ayrı istasyonlara atanmıştır. Bu çözüm, ilk çözümdür ve çevrim zamanı kısıtına ve öncüllük ilişkileri kısıtına göre hep uygun çözüm olmuştur. Şekil 4'te görüldüğü gibi, toplam istasyon sayısı, paralel hatların toplam görev sayısına eşittir.

SG mekanizması kullanılarak yeni bir çözüm elde edilir ve bu çözümün fizibilitesi kontrol edilir. Şekil 4 deki 5 ve 6 istasyonlarının birleşimi en küçük toplam iş yükünü sağlamaktadır. Şekil 5'te, bu istasyonlar birleştirilerek toplam istasyon sayısı 21'den 20'ye indirilmiştir. Bu işlem her bir hat için uygun olmayan bir çözüm (istasyon iş yükü çevrim zamanını geçen bir çözüm) elde edilene kadar devam ettirilir.

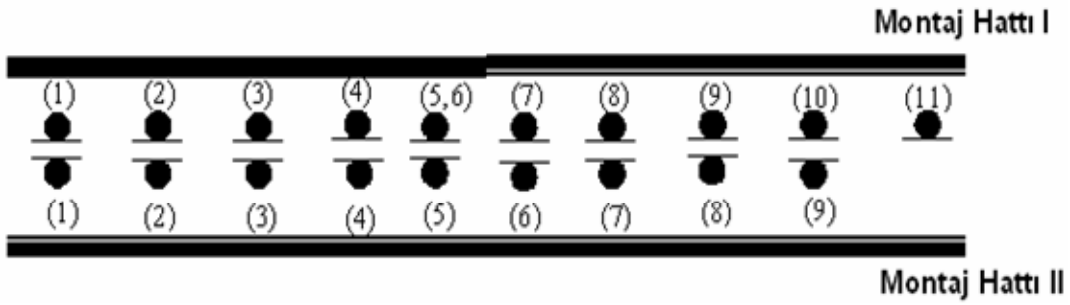
Şekil 6'da istasyon 7'nin iş yükü (10 ve 11. görevlerin görev zamanları toplamı) 9 olduğundan 14 istasyonlu ilk uygun olmayan çözüm elde edilmiştir. Elde edilen bu uygun olmayan çözüm TB için bir başlangıç çözümü olarak kullanılmıştır.



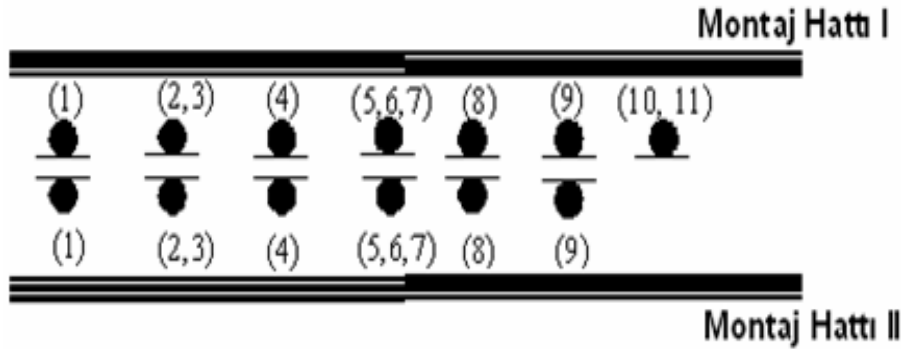
Şekil 3. Önerilen yaklaşımın akış şeması (Flowchart of the proposed algorithm)



Şekil 4. İlk çözüm (The first Solution)



Şekil 5. SG ile bulunan ilk uygun çözüm (The first feasible solution with SG)

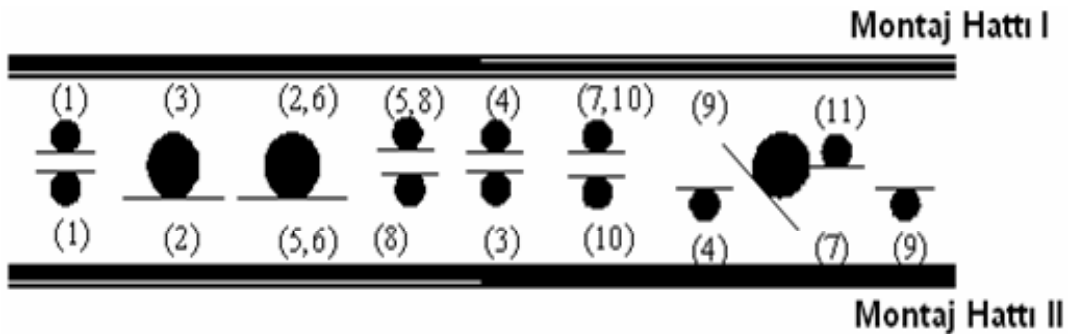


Şekil 6. SG ile bulunan ilk uygun olmayan çözüm (TB için başlangıç çözümü) (The first infeasible solution with SG (initial solution for SA))

Yukarıda da TB'nin arama mekanizmasının açıklamasında bahsedildiği gibi; uygun bir çözüm bulunduğu anda işlem durdurulmakta, veya sistem donduğunda veya teorik minimum istasyon sayısına ulaşıldığında süreç içerisinde çıkılmaktadır. Şekil 7'de, 14 istas-

yon için uygun bir çözüm bulunduğu için, TB süreci durdurulmuştur. Bundan sonra da süreç istasyonları birleştirmek için SG mekanizmasına dönmüştür.

SG ve TB arasındaki dönüşümlü arama sürecinden



Şekil 7. İlk TB sonucu (The first SA result)

sonra, arama mekanizması sistem donana kadar çevrim zamanı kısıtına göre uygun 12 istasyonlu bir çözüm araştırmıştır, fakat uygun bir çözüm elde edilememiştir. Bundan dolayı Şekil 8’de görülen uygun çözüm en iyi uygun çözüm olarak kabul edilmiştir.

En son çözüm 13 istasyona sahiptir. En son paralel montaj hattı dengesindeki istasyonlara görev atamaları ve istasyonların iş yükleri Tablo 2’de verilmiştir.

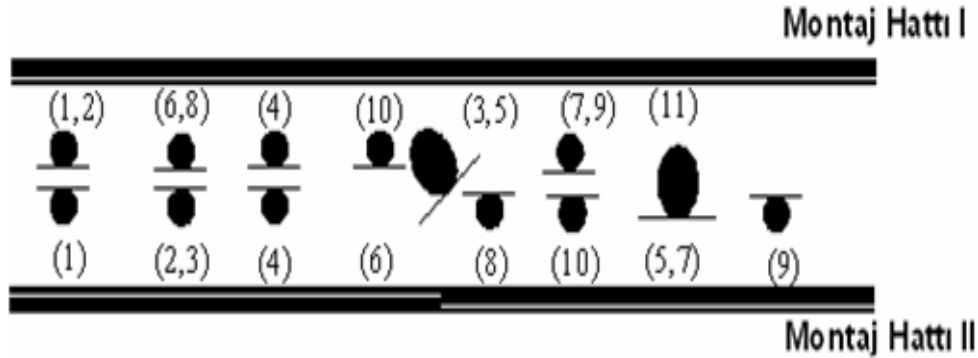
Şekil 8 ve Tablo 2’de görüldüğü gibi, istasyonların ikisi (5. ve 7. istasyonlar) hem Montaj Hattı I, hem de Montaj Hattı II üzerinde (karşıya geçişli istasyon-ortak istasyon) yer almakta, diğerleri ise klasik istasyonlardır. Tablo 2’de görülebileceği gibi hiçbir istasyonun iş yükü çevrim zamanını geçmemektedir.

4. SAYISAL SONUÇLAR

Bu bölümde, önerilen TB-tabanlı yaklaşımın 95 test problemi üzerinde uygulanması sonucunda elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Test problemleri, Gökçen vd. [25] çalışmasındaki küçük (1-30)orta (31-70) ve büyük (71 ve daha fazla) görevli test problemlerinden elde edilmiştir. Bu problemler için geçerli olan görev zamanları, çevrim zamanları ve öncüllük diyagramları da bu çalışmadan alınmıştır. Tüm test problemleri için paralel hat sayısı 2 olarak alınmıştır. Önerilen yaklaşım Visual Basic 6.0 programlama dili kullanılarak programlanmış ve test problemleri kümesi 512 MB RAM’e sahip Pentium IV 3.0 GHz PC’de çözümlen-

miştir. Algoritma için tüm parametreler ön araştırma denemelerinden elde edilmiş ve $T_0=100$ ve $T_{\min}=10^{-5}$, $IT = \text{Montaj hattı I görev sayısı} + \text{Montaj hattı II görev sayısı}$, $R=0,998$, $p=0,5$ olmak üzere sabitleştirilmiştir. Her bir problem boyutu (küçük orta ve büyük) için hesaplama zamanları yaklaşık olarak sırasıyla 10, 60 ve 180 saniye olmak üzere birbirine yakın değerler almıştır.

Tablo 3’te, önerilen yaklaşımdan elde edilen sonuçlar, Gökçen vd.’nin [25] kullandıkları süreç tarafından elde edilen sonuçlar ve teorik minimum istasyon sayıları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Her bir test problemi önerilen yaklaşım kullanılarak 5’er defa çözülmüştür. Her bir test problemi üzerinde gerçekleştirilen denemelerden elde edilen sonuçların her seferinde aynı değeri aldığını belirtmek gerekir. Her bir küçük ve orta boyutlu test problemi için önerilen yaklaşımın Gökçen vd (2006)’nin yöntemleriyle elde etmiş oldukları çözümlerle aynı olduğu gözlenmiştir. 47 test problemi için, algoritma optimalliği ispatlanmış çözümleri bulmuştur. Büyük boyutlu 6 test problemi için, önerilen yaklaşım Gökçen vd. [25] yaklaşımından daha iyi sonuç vermiş, diğer çözümler ise Gökçen vd. [25] ile aynı olarak belirlenmiştir. Görülebilmektedir ki, önerilen yaklaşım Gökçen vd.’nin [25] yaklaşımının üzerine biraz daha geliştirme yapmıştır.



Şekil 8. Nihai TB sonucu (The final SA result)

Tablo 2. İstasyonlara görev atamaları ve istasyonları iş yükleri (Task assignments to stations and workloads of stations)

İstasyon	Montaj Hattı I için görev(ler)	Montaj Hattı II için görev(ler)	İş Yüğü	İstasyon	Montaj Hattı I için görev(ler)	Montaj Hattı II için görev(ler)	İş Yüğü
1	1, ve 2	-	8	8	-	1	6
2	6, ve 8	-	8	9	-	2, ve 3	7
3	4	-	7	10	-	4	7
4	10	-	5	11	-	8	6
5	3,5	6	8	12	-	10	5
6	7, ve 9	-	8	13	-	9	5
7	11	5, ve 7	8				

Tablo 3. Karşılaştırma Sonuçları (Comparison results)

Test problemleri	Görev Sayıları (Hat I-Hat II)	Çevrim Zamanı	Teorik Minimum istasyon sayısı	Gökçen et al. (2006)	Önerilen Yaklaşım (TB)
Merten	7-6	9	6	7	7
		11	5	5	5
		13	5	5	5
		17	4	4	4
Jaeschke	9-8	9	8	8	8
		11	7	7	7
		13	6	6	6
		15	5	5	5
Jackson	11-10	17	4	4	4
		8	11	13	13
		10	9	9	9
		13	7	7	7
Roszieng	25-24	15	6	6	6
		19	5	5	5
		14	18	18	18
		16	16	16	16
Sawyer	30-28	17	15	15	15
		22	12	12	12
		30	9	9	9
		25	26	26	26
Kilbridge	45-43	27	24	25	25
		30	22	22	22
		36	18	18	18
		41	16	16	16
Hahn	53-51	54	12	12	12
		57	20	20	20
		79	14	14	14
		92	12	12	12
Tonge	70-66	110	10	10	10
		138	8	8	8
		184	6	6	6
		2004	14	14	14
Wee-Mag	75-71	2338	12	12	12
		2806	10	10	10
		3507	8	8	8
		4676	6	6	6
Wee-Mag	75-71	160	43	45	45
		168	41	43	43
		207	34	34	34
		234	30	30	30
Wee-Mag	75-71	270	26	26	26
		293	24	24	24
		28	105	123	123
		29	102	123	123
Wee-Mag	75-71	31	95	121	121
		33	89	119	119
		34	87	119	119
		41	72	116	116
Wee-Mag	75-71	42	70	107	107
		43	69	98	98
		49	60	62	62
		54	55	60	60

5. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION)

Bu çalışmada, PMHDP'nin çözümü için TB-tabanlı

bir yaklaşım önerilmiştir. Yapılan çalışma Gökçen vd. [25] çalışması üzerine yapılandırılmıştır. Bilindiği kadarıyla, önerilen yaklaşım PMHDP için yapılan ilk meta-sezgisel yaklaşımıdır. Model performansı

Tablo 3. Karşılaştırma Sonuçları (Devamı) (Comparison results (Continued))

Test problemleri	Görev Sayıları (Hat I-Hat II)	Çevrim Zamanı	Teorik Minimum istasyon sayısı	Gökçen et al. (2006)	Önerilen Yaklaşım (TB)
Arcus1	83-79	3786	39	40	40
		3985	37	38	38
		4206	35	36	36
		4454	33	34	33
		4732	31	32	32
		5853	25	26	25
		6842	22	22	22
		7571	20	20	20
		8412	18	18	18
		10816	14	14	14
		Lutz2	89-85	11	86
12	79			82	82
13	73			75	75
14	68			71	71
15	63			64	64
16	59			60	60
17	56			56	56
19	50			50	50
20	47			48	48
Lutz3	89-85			75	43
		79	41	43	43
		83	39	40	40
		87	37	38	38
		92	35	36	36
Mukherje	94-90	176	47	48	48
		183	45	46	46
		192	43	44	44
		201	41	42	42
		211	39	40	40
		222	37	38	38
		234	35	36	35
		248	33	34	34
		263	31	32	32
		281	29	30	30
		301	27	28	28
		324	26	26	26
		351	24	24	24
Arcus2	111-107	5785	52	55	53
		6016	50	53	52
		6267	48	50	50
		6540	46	48	47
		6837	44	46	46
		7162	42	44	44

Gökçen vd. [25] çalışmasından alınan veri setleri üzerinde test edilmiştir. Bu yaklaşımdan elde edilen sonuçlar, Gökçen vd. [25] yaklaşımından elde edilen sonuçlarla ve teorik en küçük istasyon sayıları ile kıyaslanmıştır. Karşılaştırma sonuçları önerilen yaklaşımın performansının yeterli olduğunu göstermektedir. Önerilen yaklaşım, birden çok montaj hattının ortak dengesi sonucunda, montaj hattı etkinliği üzerinde önemli bir geliştirme sağladığı görülmüştür. Bu çalışma Montaj Hattı Dengeleme Problemi ile ilgilenen araştırmacılar için değişik bir bakış açısı sağlamıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Baybars, I., "A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem". **Management Science**, 32, 909-932, 1986.
2. Simaria, A.S., Vilarinho, P.M., "2-ANTBAL: An ant colony optimisation algorithm for balancing two-sided assembly lines", **Computers and Industrial Engineering**, 56,489-506,2009.
3. Becker, C., Scholl, A., "A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing", **European Journal of Operational Research**, 168, 694-715, 2006.

4. Salveson, M.E., “The assembly line balancing problem”, **Journal of Industrial Engineering**, 6, 18-25, 1955.
5. Ghosh, S., Gagnon, 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.
6. Erel, E., Sarin, S.C., “A survey of the assembly line balancing procedures”, **Production Planning and Control**, 9, 414-434, 1998.
7. Scholl, A., Becker, C., “State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing”, **European Journal of Operational Research**, 168, 666-693, 2006
8. Boysen, N., Flidner, M., Scholl, A., “A classification of assembly line balancing problems”, **European Journal of Operational Research**, 183, 674-693, 2007.
9. Boysen, N., Flidner, M., Scholl, A., “Assembly line balancing: Which model to use when?”, **International Journal of Production Economics**, 111, 509-528, 2008.
10. Miltenburg, J., Wijngaard, J., “The U-line line balancing problem”, **Management Science**, 40, 1378-1388, 1994.
11. Urban, T.L., “Optimal balancing of U-shaped assembly lines”, **Management Science**, 44, 738-741, 1998.
12. Ohno, K., Nakade, K., “Analysis and optimization of U-shaped production line”, **Journal of the Operations Research Society of Japan**, 40, 90-104, 1997.
13. Sparling, D., Miltenburg, J., “The mixed-model U-line balancing problem” **International Journal of Production Research**, 36, 485-501, 1998.
14. Scholl, A., Klein R., “ULINO: Optimally balancing U-shaped JIT assembly lines” **International Journal of Production Research**, 37, 721-736, 1999.
15. Erel, E., Sabuncuoglu I., Aksu, B.A. “Balancing of U-type assembly systems using simulated annealing” **International Journal of Production Research**, 39, 3003-3015, 2001.
16. Guerriero, F., Miltenburg, J., “The stochastic U-line balancing problem”, **Naval Research Logistics**, 50, 31-57, 2003.
17. Gökçen, H., Ağpak, K., Gencer, C., Kızılkaya, E. “A shortest route formulation of simple U-type line balancing problem”, **Applied Mathematical Modelling**, 29, 373-380, 2005.
18. Gökçen, H., Ağpak, K., “A goal programming approach to simple U-line balancing problem”, **European Journal of Operational Research**, 171, 577-585, 2006
19. Süer, G.A., Dağlı, C., “A knowledge-based system for selection of resource allocation rules and algorithms”, **Handbook of Expert System Applications in Manufacturing: Structures and Rules**, Editör: Mital, A., Anand, S., Chapman & Hall, Londra, İngiltere 108-147, 1994.
20. Süer, G.A., “Designing parallel assembly lines”, **Computers and Industrial Engineering**, 35, 467-470, 1998.
21. Simaria, A.S., Vilarinho, P.M., “The simple assembly line balancing problem with parallel workstations-a simulated annealing approach.”, **International Journal of Industrial Engineering**, 8, 230-240, 2001.
22. Askin, R.G., Zhou, M., “A parallel station heuristic for the mixed-model production line balancing problem”, **International Journal of Production Research**, 35, 3095-3105, 1997.
23. McMullen, P.R., Frazier, G.V., “A heuristic for solving mixed-model line balancing problems with stochastic task durations and parallel stations”, **International Journal of Production Economics**, 51, 177-190, 1997.
24. Vilarinho, P.M., Simaria, A.S., “A two-stage heuristic method for balancing mixed-model assembly lines with parallel workstations”, **International Journal of Production Research**, 40, 1405-1420, 2002.
25. Gökçen, H., Ağpak, K., Benzer, R. “Balancing of parallel assembly lines” **International Journal of Production Economics**. 103, 600-609, 2006.
26. Benzer, R., Gökçen H., Çetinyokuş T., & Çerçioğlu H., “A Network Model for Parallel Line Balancing Problem”, **Mathematical Problems in Engineering**. doi:10.1155/2007/10106, 2007
27. Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., Veechi, M.P., “Optimization by simulated annealing”, **Science**, 220, 671-679, 1983.