

**ÇİFT TARAFLI MONTAJ HATTI Dengeleme problemleri için
Yeni Çözüm Önerileri**

Uğur Özcan

**Doktora Tezi
Endüstri Mühendisliği**

**Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Ekim 2009
Ankara**

Uğur ÖZCAN tarafından hazırlanan ÇİFT TARAFLI MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMLERİ İÇİN YENİ ÇÖZÜM ÖNERİLERİ adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

Tez Danışmanı, Endüstri Müh. Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

Endüstri Müh. Anabilim Dalı, Gazi Üni.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

Endüstri Müh. Anabilim Dalı, Gazi Üni.

Prof. Dr. Levent KANDİLLER

Endüstri Müh. Anabilim Dalı, Çankaya Üni.

Prof. Dr. Cevriye GENCER

Endüstri Müh. Anabilim Dalı, Gazi Üni.

Doç. Dr. Burak BİRGÖREN

Endüstri Müh. Anabilim Dalı, Kırıkkale Üni.

Tarih: 01/10/2009

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nail ÜNSAL

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Uğur ÖZCAN

ÇİFT TARAFLI MONTAJ HATTI Dengeleme Problemleri İçin Yeni özüm Önerileri

(Doktora Tezi)

Uğur ÖZCAN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Ekim 2009

ÖZET

Bu tezde, çift taraflı montaj hattı dengeleme problemlerine yeni çözüm önerileri sunulmuştur. İlk olarak, belirli bir çevrim zamanı için hattın uzunluğunu birincil amaç ve operatör sayısını ikincil amaç olarak en küçükleyen yeni bir karma tamsayılı matematiksel programlama modeli ve tabu araması algoritması önerilmiştir. İkinci olarak, çift taraflı montaj hatlarında çok kriterli karar verme ele alınmıştır. Bu doğrultuda, kesin ve belirli amaçlar için yeni bir karma tamsayılı amaç programlama modeli ve kesin olmayan ve belirsiz amaçlar için yeni bir karma tamsayılı bulanık amaç programlama modeli önerilmiştir. Üçüncü olarak, hazırlık zamanlı çift taraflı montaj hattı dengeleme problemi için yeni bir karma tamsayılı matematiksel programlama modeli ve bir sezgisel algoritma önerilmiştir. Önerilen matematiksel modeller ve sezgisel algoritmaların sonuçlarının etkinliğı test problemleri üzerinde incelenmiştir. Bu tez çalışmasındaki matematiksel modeller GAMS matematiksel programlama paket programı ile modellenerek çözölmüş, sezgisel algoritmaların yazılımının kodlanmasında ise MS Visual Basic 6.0 kullanılmıştır.

Bilim Kodu : 906.1.141
Anahtar Kelimeler : Montaj hattı dengeleme, çift taraflı montaj hatları
Sayfa Adedi : 105
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Bilal TOKLU

**NEW SOLUTION PROPOSALS TO TWO-SIDED ASSEMBLY LINE
BALANCING PROBLEMS**

(Ph.D. Thesis)

Uğur ÖZCAN

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

October 2009

ABSTRACT

In this thesis, new solution proposals to two-sided assembly line balancing problems are presented. First, a new mixed integer mathematical programming model and a tabu search algorithm which minimizes the line length as the primary objective and minimizes the number of operators as a secondary objective are proposed. Second, multiple-criteria decision-making in two-sided assembly line balancing is considered. For this purpose, a new mixed integer goal programming model for precise goals and a new fuzzy mixed integer goal programming model for imprecise goals are presented. Third, a new mixed integer mathematical programming model and a heuristic algorithm are proposed to two-sided assembly line balancing problem with sequence-dependent setup times. The effectiveness of the proposed mathematical models and the heuristic algorithms are investigated on test problems. The proposed mathematical models are solved using GAMS mathematical programming package and the proposed heuristic algorithms have been compiled in MS Visual Basic 6.0.

Science Code : 906.1.141

Key Words : Assembly line balancing, two-sided assembly lines

Page Number: 105

Adviser : Prof. Dr. Bilal TOKLU

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim süresince yaptığım bütün çalışmalarında kıymetli yardım ve katkılarıyla beni yönlendirdiği için Sayın Prof. Dr. Bilal TOKLU'ya, araştırmam süresince bilgi ve tecrübelerinden istifade ettiğim ve değerli zamanlarını çalışmalarımın olgunlaşmasına ayıran Sayın Prof. Dr. Levent KANDİLLER'e ve Sayın Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN'e teşekkürü bir borç bilirim. Selçuk Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümünde ve Gazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümünde hizmet vermekte olan değerli Öğretim Üyelerine ve Araştırma Görevlisi arkadaşlarıma teşekkür ederim. Özellikle arkadaşlarım Arş. Gör. Kemal ALAYKIRAN'a ve Arş. Gör. Emre ÇALIŞKAN'a çalışmalarımda bana her türlü konuda yardımcı oldukları teşekkür ederim. Ayrıca beni yetiştiren ve her zaman destekleriyle yanımda olan çok kıymetli aileme, bütün çalışmalarım boyunca bana yardımcı olan eşime ve yaramazlıklarıyla çalışmalarımı engelleyen oğluma teşekkür ederim. Bu tez çalışması kıymetli babam ve yaramaz oğluma armağan olsun.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. ÇİFT TARAFLI MONTAJ HATLARI	7
2.1. Montaj Hatları	7
2.2. Çift Taraflı Montaj Hatları İle İlgili Temel Kavramlar.....	11
2.3. Çift Taraflı Montaj Hatları	12
2.4. Çift Taraflı Montaj Hattı Dengeleme Problemi	14
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	19
4. ÇİFT TARAFLI MONTAJ HATTI DENGEME.....	22
4.1. Matematiksel Model.....	22
4.2. Tabu Araması Algoritması.....	25
4.2.1. Tabu araması algoritmasına giriş	25
4.2.2. Tabu araması algoritmasının geliştirilmesi	25
4.2.3. Örnek problem çözümü.....	31
4.3. Test Sonuçları ve Değerlendirme	33

Sayfa

5. ÇİFT TARAFLI MONTAJ HATTI Dengelemede Çok Kriterli Karar Verme	37
5.1. Amaç Programlama Modeli	38
5.1.1. Amaç programlama	38
5.1.2. Önerilen amaç programlama modeli	39
5.2. Bulanık Amaç Programlama Modeli	41
5.2.1. Bulanık amaç programlama	41
5.1.2. Önerilen bulanık amaç programlama modeli	43
5.3. Örnek Problem Çözümü	46
5.4. Test Sonuçları ve Değerlendirme	48
6. HAZIRLIK ZAMANLI ÇİFT TARAFLI MONTAJ HATTI Dengeleme	50
6.1. Hazırlık Zamanlı Çift Taraflı Montaj Hatları	51
6.2. Matematiksel Model	52
6.3. İstasyon Sayısı İçin Bir Alt Sınır Hesaplaması	54
6.4. Önerilen Çözüm Yaklaşımı	56
6.5. Örnek Problem Çözümü	60
6.6. Test Sonuçları ve Değerlendirme	62
7. SONUÇ	65
8. İLERİ ÇALIŞMA ÖNERİLERİ	67
8.1. Çift İstasyon Sayısı	67
8.1.1. Çift istasyonlara en erken atama ve en geç atama	67
8.1.2. Çift istasyon sayısı için bir alt sınır hesaplaması	70
8.2. Mümkün Eşitsizlikler	70

Sayfa

8.2.1. Düzüm paketleme problemine gevşetme	70
8.2.2. Sırt çantası problemine gevşetme	75
8.3. Paralel İş Alanları.....	76
8.4. Montaj Pozisyonu Yüksekliği	77
8.5. Atama Kısıtları	78
KAYNAKLAR	80
EKLER.....	95
EK-1 Montaj hattı dengeleme problemlerinin sınıflandırılması	96
ÖZGEÇMİŞ	103

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Çift taraflı montaj hattı dengeleme üzerine yapılan çalışmalar	21
Çizelge 4.1. Matematiksel modelin test sonuçları	34
Çizelge 4.2. Karşılaştırma sonuçları	36
Çizelge 5.1. $P_1 \gg P_2 \gg P_3$ için elde edilen sonuçlar	47
Çizelge 5.2. 24 görevli problemin verileri	48
Çizelge 5.3. Amaçların önem sıraları ve alt ve üst tolerans limitleri	49
Çizelge 5.4. Elde edilen sonuçlar	49
Çizelge 6.1. Örnek problem verileri	60
Çizelge 6.2. Önerilen yaklaşımın bir iterasyona ait çözüm süreci	61
Çizelge 6.3. P9 problemi sonuçları	63
Çizelge 6.4. Test sonuçları	64
Çizelge 8.1. Örnek problemde görevlerin atanabileceği çift istasyonlar	68
Çizelge 8.2. Yeni çift istasyon aralıkları	70

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Geleneksel düz montaj hattı.....	8
Şekil 2.2. U-tipi montaj hattı.....	8
Şekil 2.3. (a) Karışık modellenli geleneksel düz montaj hattı ve (b) karışık modellenli U-tipi montaj hattı.....	9
Şekil 2.4. Paralel montaj hatları	10
Şekil 2.5. Geleneksel düz montaj hatlarında paralel istasyonlar; (a) tek istasyon ve (b) iki paralel istasyon	10
Şekil 2.6. Çift taraflı montaj hattı konfigürasyonu	13
Şekil 2.7. Bir öncelik şeması.....	14
Şekil 2.8. İki farklı çözüm: (a) dört istasyona ihtiyaç var (b) üç istasyona ihtiyaç var	15
Şekil 2.9. 16 görevli örnek problemin öncelik ilişkileri şeması, görev zamanları ve görevlerin operasyon tarafları.....	16
Şekil 2.10. Çevrim zamanı 15 için istasyonlara görev atamaları (a) tek taraflı montaj hattı (b) çift taraflı montaj hattı.....	17
Şekil 4.1. ESM'nin geometrik gösterimi.....	29
Şekil 4.2. 12 görevli örnek problem verileri	31
Şekil 4.3. Başlangıç çözümü (x_0)	31
Şekil 4.4. Başlangıç çift taraflı montaj hattı dengesi	31
Şekil 4.5. İlk iterasyondaki aday çözümler	32
Şekil 4.6. İlk iterasyondaki en iyi aday çözüm (ikinci iterasyon için başlangıç çözümü)	32
Şekil 4.7. İlk iterasyondaki çift taraflı montaj hattı dengesi	32
Şekil 4.8. Tabu listesi.....	33

Şekil	Sayfa
Şekil 4.9. Önerilen yaklaşım ile elde edilen çift taraflı montaj hattı dengesi	33
Şekil 5.1. Çift istasyon sayısını ifade eden bulanık amacın üyelik fonksiyonu.....	44
Şekil 5.2. Çevrim zamanını ifade eden bulanık amacın üyelik fonksiyonu.....	44
Şekil 5.3. İstasyon başına düşen görev sayısını ifade eden bulanık amacın üyelik fonksiyonu	45
Şekil 6.1. Bir çift taraflı montaj hattında boş zamanlar	51
Şekil 6.2. Önerilen yaklaşımın bir iterasyonuna ait örnek çözümü	60
Şekil 6.3. Önerilen matematiksel modelin sonucu.....	62
Şekil 8.1. Dokuz görevli örnek bir problem.....	68
Şekil 8.2. Altıncı görevin solu için oluşturulan graf.....	72
Şekil 8.3. Paralel dört iş alanı için bazı montaj pozisyonları.....	76
Şekil 8.4. Çift taraflı montaj hatların montaj pozisyon yükseklikleri.....	77

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
i, h, p, r	Görev
j, g	Çift istasyon
k	Hattın operasyon tarafı; $k = \begin{cases} 1 & \text{sol taraf} \\ 2 & \text{sağ taraf} \end{cases}$
(j, k)	Çift istasyon j ve onun operasyon tarafı k
s	(j, k) istasyonunda görev operasyon sırasının bir pozisyonu
I	Görev kümesi; $I = \{1, 2, \dots, i, \dots, nt\}$
J	Çift istasyon kümesi; $J = \{1, 2, \dots, j, \dots, nms\}$
A_L	Hattın sol tarafından yapılan görevler kümesi; $A_L \subset I$
A_R	Hattın sağ tarafından yapılan görevler kümesi; $A_R \subset I$
A_E	Hattın her iki tarafından yapılan görevler kümesi; $A_E \subset I$
$P(i)$	Görev i 'nin hemen öncülleri kümesi
$P_a(i)$	Görev i 'nin bütün öncülleri kümesi
$S(i)$	Görev i 'nin hemen ardılları kümesi
$S_a(i)$	Görev i 'nin bütün ardılları kümesi
P_0	Hiç öncülü olmayan görevler kümesi; $P_0 = \{i \in I \mid P(i) = \emptyset\}$
t_i	Görev i 'nin operasyon zamanı
π_{ip}	(j, k) istasyonunda i görevinden hemen sonra gelen p görevi için hazırlık süresi
ψ	Çok büyük bir sayı

Simgeler**Açıklama** **$C(i)$** Görev i 'nin operasyon tarafı karşısında yer alan

$$\text{görevler kümesi; } C(i) = \begin{cases} A_L & \text{if } i \in A_R \\ A_R & \text{if } i \in A_L \\ \emptyset & \text{if } i \in A_E \end{cases}$$

 $K(i)$ Görev i 'nin operasyon tarafı kümesi;

$$K(i) = \begin{cases} \{1\} & \text{if } i \in A_R \\ \{2\} & \text{if } i \in A_L \\ \{1,2\} & \text{if } i \in A_E \end{cases}$$

 $ES(i)$ Görev i 'nin en erken atanabileceği eş istasyon **$LS(i)$** Görev i 'nin en geç atanabileceği eş istasyon **ct**

Çevrim zamanı

 ε Çok küçük pozitif bir sayı, $0 < \varepsilon \leq 1/(2*nt+1)$ **γ**

Bir iterasyon sayacı

 Wjk İstasyon (j, k) 'ya atanabilecek görevler kümesi **$\|W(j,k)\|$** Wjk 'daki görev sayısı **$W_{\max}$** Bir istasyona atanabilecek en büyük görev sayısı; $W_{\max} = \text{enbüyük}_{(j,k)} \{ \|W(j,k)\| \}$ **$NT(j,k)$** (j, k) istasyonunda görev operasyon sırası kümesi;

$$NT(j,k) = \{1, 2, \dots, s, \dots, \|W(j,k)\|\} \quad \forall j \in J, k = 1,2$$

 CZ Pozitif bölgeleme için görev çiftleri kümesi; $CZ = \{(i, h), \dots, (p, r)\}$ **IZ** Negatif bölgeleme için görev çiftleri kümesi; $IZ = \{(i, h), \dots, (p, r)\}$ **x_{ijk}** 1, görev i istasyon (j, k) 'ya atanmış ise; 0, aksi halde **t_i^f** görev i 'nin bitiş zamanı **F_j** 1, eş istasyon j 'nin her iki tarafı kullanılıyor ise; 0, aksi halde **G_j** 1, eş istasyon j 'nin tek tarafı kullanılıyor ise; 0, aksi halde

Simgeler	Açıklama
U_{jk}	1, istasyon (j, k) açılmış ise; 0, aksi halde
z_{ip}	1, görev i aynı istasyonda görev p 'den önce yapılıyorsa; 0, aksi halde
w_{ijk}	1, eğer i görevi (j, k) istasyonundaki operasyon sırasının en son sırasında ise; 0, aksi halde
IST	Çift istasyon sayısı için alt tolerans limiti
C	Çevrim zamanı için alt tolerans limiti
TSK	İstasyon başına görev sayısı için alt tolerans limiti
u_1	Çift istasyon sayısı için üst tolerans limiti
u_2	Çevrim zamanı için üst tolerans limiti
u_3	İstasyon başına görev sayısı için üst tolerans limiti
w_1	Bulanık çift istasyon sayısı amacının ağırlığı
w_2	Bulanık çevrim zamanı amacının ağırlığı
w_3	Bulanık görev yükü amacının ağırlığı
μ_{Z_1}	Bulanık çift istasyon sayısı amacının başarı derecesi
μ_{Z_2}	Bulanık çevrim zamanı amacının başarı derecesi
μ_{Z_3}	Bulanık görev yükü amacının başarı derecesi
d_1^-	IST 'in negatif sapması
d_1^+	IST 'in pozitif sapması
d_{2i}^-	i görevi için C 'nin negatif sapması
d_{2i}^+	i görevi için C 'nin pozitif sapması
d_{3jk}^-	(j, k) istasyonu için TSK 'nin negatif sapması
d_{3jk}^+	(j, k) istasyonu için TSK 'nin pozitif sapması
$LTotal$	L-tipi görevlerin toplam görev süreleri
$RTotal$	R-tipi görevlerin toplam görev süreleri
$ETotal$	E-tipi görevlerin toplam görev süreleri

Simgeler	Açıklama
SU_{γ}^L	L-tipi ve E-tipi görevler için en düşük γ adet hazırlık süresi toplamı
SU_{γ}^R	R-tipi ve E-tipi görevler için en düşük γ adet hazırlık süresi toplamı
SU_{γ}^E	E-tipi görevler için en düşük γ adet hazırlık süresi toplamı
SU_{γ}	İterasyon γ 'de toplam hazırlık süresi
ML	L-tipi ve E-tipi görevleri arasındaki en düşük γ adet hazırlık süresi kümesi $\forall i \in A_L, i \in A_E; ML = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{\eta}, \dots, \tau_{\gamma}\}$.
MR	R-tipi ve E-tipi görevleri arasındaki en düşük γ adet hazırlık süresi kümesi $\forall i \in A_R, i \in A_E; MR = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{\eta}, \dots, \tau_{\gamma}\}$.
ME	E-tipi görevleri arasındaki en düşük γ adet hazırlık süresi kümesi $\forall i \in A_E; ME = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{\eta}, \dots, \tau_{\gamma}\}$.

Kısaltmalar	Açıklama
MHD	Montaj hattı dengeleme
ÇMHD	Çift taraflı montaj hattı dengeleme
TZÜ	Tam zamanında üretim
TAA	Tabu araması algoritması
d	Geleneksel (düz) montaj hatları
p	Paralel montaj hatları
u	U-tipi montaj hatları
u^n	Çoklu U-tipi montaj hatları

Kısaltmalar	Açıklama
<i>tm</i>	Tek modellenli üretim
<i>mm</i>	Karışık/çok modellenli üretim
<i>det</i>	Deterministik görev zamanlı
<i>din</i>	Dinamik görev zamanlı
<i>sto</i>	Stokastik görev zamanlı
<i>fuz</i>	Bulanık görev zamanlı
$\min^m$	İstasyon sayısı minimizasyonu
$\min^c$	Çevrim zamanı minimizasyonu
$\max^E$	Hat etkinliğinin maksimizasyonu
$\min^{di}$	Düzgün işyükü dağılımı
$\min^{co}$	Maliyet minimizasyonu
$\max^{pr}$	Kar maksimizasyonu
opt^n	Birden fazla çelişen amacın optimizasyonu
par^{ist}	Paralel istasyonlar
$\text{par}^{gör}$	Paralel görevler
par^2	Çift taraflı montaj hatları
H	Sezgisel
B&B	Dal-sınır algoritması
GA	Genetik algoritmalar
M	Matematiksel model
SA	Tavlama benzetimi
ANT	Karınca kolonileri
DP	Dinamik programlama

1. GİRİŞ

Son yıllarda, montaj hatları üretim sistemlerinin etkinliğini arttırmak için kullanılan başlıca mekanizmalardan biri haline gelmiştir. Montaj hatları ilk olarak 1915 yılında Henry Ford'un, Taylor'un bilimsel yönetim ilkelerini uygulayarak Ford Model T arabalarının üretilmesinde kullanmasıyla ortaya çıkmıştır. Ford, otomobil üretiminde yapılması gereken bütün operasyonları çalışanlara bölüştürerek, her çalışanın sürekli aynı işlemleri yapmasını sağlamıştır. Bu ise çalışanların yaptıkları işlerde uzmanlaşmasını getirmiştir. Sonuç olarak çok sayıda aynı tip otomobili çok daha düşük maliyetlerde ve çok daha düşük sürelerde üretmek mümkün olmuştur. Bu üretim tarzı daha sonra seri üretim olarak adlandırılmıştır. Seri üretimin temelini oluşturan geleneksel düz montaj hatları zamanla müşteri beklentileri, rekabet faktörleri ve teknolojik ilerlemelere bağlı olarak tasarım açısından değişik şekillerde kullanılmıştır. Bunlar arasında; Toyota üretim sisteminin başarıya ulaşmasında önemli bir yeri olan U-tipi montaj hatları, benzer üretim karakteristikleri gösteren birden fazla ürün modelinin aynı montaj hattında üretilbildiği karışık modelli montaj hatları, birbirine paralel birden fazla montaj hattının birlikte kullanılmasına imkan tanıyan paralel montaj hatları ve büyük boyutlu otomobil, otobüs, kamyon vb. ürünlerin montaj işlemlerinin montaj hattının her iki tarafından yapılabilmesine olanak tanıyan çift taraflı montaj hatları yer almaktadır.

Montaj hatlarının etkin olarak kullanılmasının ve tasarlanmasının önemi ekonomik ve rekabet faktörlerine dayalı olarak artmıştır. Üreticiler, müşteri istek ve gereksinimlerine kaliteli ve düşük fiyatlı ürünlerle hızlı cevap verebilmek için bir çok üretim maliyetini dikkate almaktadırlar. Bunun yanı sıra beklenen taleplerin karşılanması ve giderek pazar payının arttırılabilmesi için montaj hattının etkin kullanılması gerekmektedir. Montaj hattının etkin kullanımı ise montaj hattının dikkate alınan amaçlar ve kısıtlar doğrultusunda en iyi şekilde dengelenmesi ile mümkün olabilmektedir.

Montaj hatları akış tipi üretim sistemlerindendir. Tesis içi yerleşim operasyonların teknolojik kısıtları dikkate alınarak yapılır. Bu süreç tabanlı seri yerleşim şekli, seri

üretim için elverişli bir ortam oluşturmaktadır. Bir montaj hattı birbirine malzeme taşıma sistemleri ile bağlanmış bir seri istasyondan oluşur. Her bir istasyonda iş parçalarına çevrim zamanı denilen sınırlı bir zaman dilimi içerisinde bir veya daha fazla montaj işlemi yapılır. Böylece sabit bir üretim hızı elde edilir. Bir montaj sürecinde iş parçaları üzerinde yapılan her bir montaj işlemine görev adı verilir. Bir görevin yerine getirilmesi için gerekli süreye ise görev süresi denir. Görevler öncelik ilişkileri dikkate alınarak sırasıyla yerine getirilirler. Görevler arasındaki öncelik ilişkileri ve görev zamanları genel olarak bir öncelik şeması kullanılarak ifade edilir. Öncelik şemasında görevleri temsil eden düğümler, görev zamanları ve öncelik ilişkisini belirten oklar yer alır. Her çevrim zamanından sonra iş parçaları bir istasyondan diğerine hareket eder ve son istasyonda ürün tamamlanır ve montaj hattından ayrılır. Bazı kısıtlar altında bir veya daha fazla amaç gözetilerek görevlerin istasyonlara paylaştırılması problemine montaj hattı dengeleme (MHD) problemi denir. Genel olarak MHD problemine ilişkin temel kısıtlar şöyle sıralanabilir: (i) bir görev sadece bir istasyona atanabilir (atama kısıtı), (ii) bir görevin bir istasyona atanabilmesi için o görevin bütün öncelik ilişkilerinin sağlanması gerekir (öncelik ilişkileri kısıtı), (iii) herhangi bir istasyonda yer alan görevlerin görev zamanlarının toplamı çevrim zamanını aşamaz (çevrim zamanı kısıtı).

MHD problemi ilk olarak Helgeson (1954) tarafından çalışılmıştır ve ilk defa Salveson (1955) tarafından matematiksel olarak formüle edilmiştir. Bu çalışmalardan sonra günümüze kadar MHD problemi ile ilgili çok sayıda matematiksel modeli, alt ve üst sınır hesaplamalarını, çözüm prosedürlerini, değişik amaç fonksiyonlarını, sezgisel ve meta-sezgisel algoritmaları içeren çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda MHD probleminde genel olarak dört problem tipi üzerinde durulmuştur:

Tip 1: Belirli çevrim zamanı için istasyon sayısı en küçükleme, **Tip 2:** Belirli istasyon sayısı için çevrim zamanı en küçükleme, **Tip E:** Hattın etkinliğinin en büyükleme ile istasyon sayısı ve çevrim zamanının eş zamanlı en küçükleme, **Tip F:** Belirli istasyon sayısı ve çevrim zamanı için makul bir çözümün bulunması.

MHD problemi kombinatoriyal optimizasyon problemlerinin NP-Zor sınıfına girmektedir [Ajenblit ve Wainwright, 1998]. MHD probleminin kombinatoriyal

yapısı problem boyutu büyüdükçe en iyi sonuçların elde edilmesini güçleştirmektedir. Görevler arasındaki öncelik ilişkileri dikkate alınmadığında N görev için $N!$ adet farklı sıra elde edilmektedir. Eğer N görev arasında R adet öncelik ilişkisi dikkate alınırsa $N!/2^R$ adet farklı sıra bulunur. Sonuç olarak problem boyutu arttıkça elde edilen çözüm alternatifleri de artacağından makul zamanda en iyi çözümlere ulaşmak mümkün olamamaktadır.

Montaj hatlarında genellikle hattın tek bir tarafından montaj işlemlerinin yapıldığı varsayılır. Özellikle kamyon, traktör, otomobil gibi büyük boyutlu ürünlerin montaj işlemlerinin sadece hattın tek tarafından yapılması mümkün olamamaktadır. Bu durumda hattın her iki tarafı (sağ ve sol tarafları) kullanılarak montaj işlemleri yapılır. Çift taraflı montaj hatları, hattın sağında ve solunda eş zamanlı montaj işlemlerinin yapılmasına olanak sağlamaktadır. Çift taraflı montaj hattı dengeleme (ÇMHD) problemi diğer MHD problemleri gibi NP-Zor problemler sınıfındadır. ÇMHD problemi ilk olarak 1993 yılında tanımlanmasına rağmen, literatürde konu ile ilgili çok az sayıda çalışmaya rastlanmaktadır. Bununla birlikte henüz tam olarak çözümlenemeyen bazı konular bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında eksik kalan konulara yeni çözüm önerileri sunulmuştur.

Bir problemin matematiksel olarak modellenmesi, problemin anlaşılması ve en iyi çözümlere ulaşılabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Literatür incelendiğinde, ÇMHD ile ilgili çevrim zamanı en küçüklemesini dikkate alan sadece bir matematiksel modelin geliştirildiği görülmektedir [Kim ve ark., 2009]. Halbuki, MHD’de temel amaçlardan birisi olan operatör sayısı en küçüklemesi ve bununla birlikte hattın uzunluğunun en küçüklemesi ile ilgili bir matematiksel model ÇMHD’de dikkate alınmamıştır.

MHD problemi için önerilen birçok çalışmada genellikle istasyon sayısı en küçüklemesi, çevrim zamanı en küçüklemesi gibi sadece bir amaç dikkate alınmaktadır. Bununla birlikte gerçek hayat uygulamalarında birden fazla amacın eş zamanlı en iyilenmesi durumu sıklıkla ortaya çıkabilmektedir. Bazı durumlarda, dikkate alınan amaçların hedef değerleri karar vericiler tarafından kesin olarak

belirlenebilirken, diğer taraftan karar vericilerin amaçların hedef değerlerini kesin olarak belirlemesi bazen oldukça güçtür. Çünkü hedef değerleri belirsiz, kesin olmayan değerler alabilir. ÇMHD’de çok kriterli karar verme yaklaşımları ile ilgili bir çalışmaya literatürde rastlanılamamıştır.

Gerçek hayat uygulamalarında, aynı istasyonda yapılan görev dizisi içerisinde, bir görev tamamlandıktan sonra kendisinden hemen sonra gelen görevin işlem zamanını hazırlık gerektirebileceğinden dolayı etkileyebilir. Montaj hattının dengelenmesi esnasında bu hazırlık zamanı, sonra yapılan görevin bitiş zamanına eklenmelidir. Bununla birlikte, operasyonlar çevrimsel olarak sürekli yapıldığından dolayı en son yapılan görev ilk yapılan görev için yine hazırlık gerektirebilir. ÇMHD’de sıraya bağlı görev zamanları dikkate alınmasına rağmen sıraya bağlı hazırlık zamanları henüz dikkate alınmamıştır.

Bu tezin amacı; yukarıda verilen bilgiler doğrultusunda ÇMHD problemlerine yeni çözüm önerileri sunmaktır. Bu nedenle, bu tezde, ÇMHD problemi için çift istasyon sayısını (montaj hattının uzunluğunu) ve istasyon sayısını (operatör sayısını) en küçüklemeyi amaçlayan yeni bir karma tamsayılı matematiksel model önerilmiştir. Ayrıca, özellikle büyük boyutlu problemler için tabu araması algoritmasına dayalı bir sezgisel yaklaşım önerilmiştir. Bununla birlikte, çift taraflı montaj hatlarında, kesin ve belirli amaçlar için bir karma tamsayılı amaç programlama modeli ve kesin olmayan ve belirsiz amaçlar için bir karma tamsayılı bulanık amaç programlama modeli önerilmiştir. Çok kriterli karar verme modellerinde literatürde sıklıkla kullanılan üç amaç dikkate alınmıştır. Bunlar; çift taraflı montaj hatlarına özgü çift istasyon sayısı, çevrim zamanı ve istasyon başına düşen görev sayısı amaçlarıdır. Ayrıca, çift taraflı montaj hatlarında sıraya bağlı hazırlık zamanları dikkate alınarak, bu problem için bir karma tamsayılı matematiksel programlama modeli ve bir sezgisel çözüm prosedürü önerilmiştir. Bu tezde ele alınan problemler gerçek hayatta büyük boyutlu ürünlerin üretildiği birçok sektörde sıklıkla karşılaşılan problemler olup çözümleriyle ekonomik katkı elde edilecektir. Özellikle, otomotiv sektöründe stratejik seviyede karşılaşılan bu problemlerin çözümünde yapılacak küçük iyileştirmelerle bile işletmeye oldukça yüksek kazanımlar sağlanabilecektir.

Tezin devamı şöyle organize edilmiştir. İkinci bölümde en sık kullanılan montaj hattı tasarımları ele alınmış ve hem tasarım hem de kullanım açısından çift taraflı montaj hatlarından farklılıkları belirtilmiştir. Bununla birlikte çift taraflı montaj hatları ile ilgili temel kavram ve tanımlamaları verilmiştir. Daha sonra çift taraflı montaj hatları detaylı olarak ele alınmış ve ÇMHD problemi tanımlanmıştır.

Üçüncü bölümde, ÇMHD ile ilgili günümüze kadar yapılan çalışmalar incelenmiştir. Ayrıca MHD problemi ile ilgili kapsamlı bir literatür araştırması verilmiştir.

Dördüncü bölümde, ÇMHD problemi için, Kim ve ark. (2009)'nın önerdiği matematiksel model temel alınarak bir karma tamsayılı matematiksel programlama modeli önerilmiştir. Önerilen model verilen bir çevrim zamanı için çift istasyon sayısını birincil amaç olarak ve istasyon sayısını ikincil amaç olarak en küçüklemektedir. Özellikle büyük boyutlu problemler için bir tabu araması algoritması önerilmiştir. Önerilen yaklaşım, literatürde yer alan test problemleri kullanılarak karşılaştırmalı olarak test edilmiştir.

Beşinci bölümde, çift taraflı montaj hatlarında çok kriterli karar verme yaklaşımları ele alınmıştır. Karar verici tarafından kesin olarak belirlenebilen amaçlar için yeni bir karma tamsayılı amaç programlama modeli önerilmiştir. Bununla birlikte, kesin olarak belirlenemeyen amaçlar için yeni bir karma tamsayılı bulanık amaç programlama modeli önerilmiştir. Önerilen çok kriterli karar verme yaklaşımları örnek problemler üzerinde test edilmiştir.

Altıncı bölümde, çift taraflı montaj hatlarında sıraya bağlı hazırlık zamanları ele alınmıştır. Problemin çözümü için yeni bir karma tamsayılı matematiksel programlama modeli ile bir sezgisel yaklaşım önerilmiştir. Önerilen matematiksel model ve sezgisel yaklaşımın performansları test problemleri kullanılarak tartışılmıştır.

Yedinci bölümde, bu tez çalışmasından sonra ileride yapılabilecek çalışma konuları ele alınmıştır. Bu çalışma konularına teorik olarak giriş yapılmış ve konular ile ilgili yön belirleyici bazı önerilerde bulunulmuştur.

Son bölümde ise sonuç ve değerlendirmeler yer almaktadır.

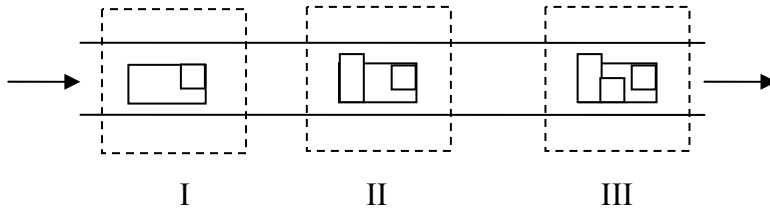
2. ÇİFT TARAFLI MONTAJ HATLARI

Günümüzde montaj hatları birçok üretim endüstrisinde kullanılan üretim teknolojilerinden birisidir. Günlük yaşantımızın hemen hemen her alanına girmiş çok sayıda ürün, otomobiller, bilgisayarlar, bazı çocuk oyuncakları, çamaşır makinesi, buzdolabı, televizyon gibi elektronik eşyalar, montaj hatları kullanılarak üretilmektedir. Montaj hatları ilk tasarlandığı 1915 yılından bu yana müşteri istek ve gereksinimlerindeki değişimler, teknolojik ilerlemeler ve işletmelerin etkili rekabet avantajı sağlama çabaları sonucunda değişik biçimlerde kullanılmıştır. Her bir montaj hattı tasarımının kendine has özellikleri, diğerlerinden üstün ve zayıf yönleri bulunmaktadır.

Ürün yapısına, ürün çeşitliliğine, müşteri taleplerine, işletmenin sahip olduğu teknolojik alt yapıya ve işletmenin stratejik hedeflerine bağlı olarak her işletme kendine özgü bir montaj hattı tasarlayabilir. Bu bölümde, en sık kullanılan montaj hattı tasarımları ele alınmıştır ve hem tasarım hem de kullanım açısından çift taraflı montaj hatlarından farklılıkları belirtilmiştir. Ayrıca çift taraflı montaj hatları ile ilgili temel kavram ve tanımlamalar verildikten sonra çift taraflı montaj hatları detaylı olarak ele alınmıştır ve ÇMHD problemi tanımlanmıştır.

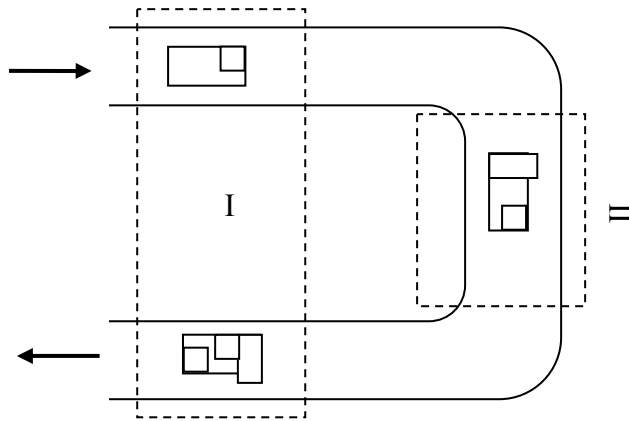
2.1. Montaj Hatları

Montaj hatları akış tipi üretim sistemlerindendir. Birbirlerine malzeme taşıma sistemleri ile bağlanmış sıralı istasyonlardan oluşur. İş parçaları bir istasyondan diğerine hareket ederek belirli montaj işlemleri görürler. Son istasyonda ise bitmiş ürün elde edilir. Şekil 2.1 bir montaj hattını göstermektedir. Montaj hatları ilk olarak 1915 yılında Ford Motor Şirketi tarafından Ford Model T otomobillerinin üretiminde kullanılmaya başlanmıştır. Bu sayede çok sayıda ürün çok düşük maliyetlerle elde edilebilmiştir.



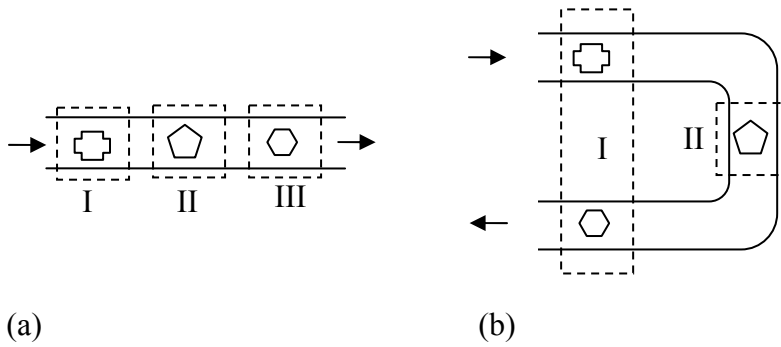
Şekil 2.1. Geleneksel düz montaj hattı

Seri üretimin temelini oluşturan geleneksel düz montaj hatları zamanla müşteri beklentileri, rekabet faktörleri ve teknolojik ilerlemelere bağlı olarak değişik şekillerde kullanılmıştır. Geleneksel düz montaj hatlarının esnekliğini ve etkinliğini arttırmak amacıyla U-tipi montaj hatları kullanılmaya başlanmıştır. Geleneksel düz montaj hatları ile U-tipi montaj hatlarının arasındaki temel farklılık montaj hattının tasarımıdır. Geleneksel düz montaj hatlarında istasyonlar düz bir hat boyunca yerleştirilirken, U-tipi montaj hatları hattın giriş ve çıkış yönleri aynı tarafta olacak biçimde ‘U’ şeklinde tasarlanmıştır. Çok sayıda üretici, Tam Zamanında Üretim (TZÜ) sistemi prensiplerinin üretim ortamına adaptasyonunun bir sonucu olarak, U-tipi montaj hatlarını TZÜ sisteminin önemli bir bileşeni olarak kullanmaktadır. U-tipi montaj hatları müşteri taleplerinde oluşan ani değişimlere daha hızlı cevap verebilmekte, çalışanlar arasında yardımlaşmayı ve ortaya çıkan problemlerin daha hızlı çözülebilmesine olanak sağlamaktadır. Şekil 2.2’de örnek bir U-tipi montaj hattı verilmiştir.



Şekil 2.2. U-tipi montaj hattı

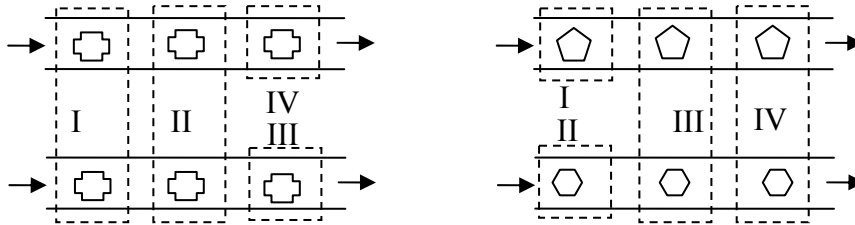
Üreticiler, farklılık gösteren müşteri taleplerini karşılamak amacıyla montaj hatlarını birden fazla ürün üretmek için de kullanmışlardır. Sadece tek bir ürün çeşidinin üretildiği montaj hatlarına tek modelli montaj hatları denir. Çok yüksek miktarda aynı üründen üretilen bu montaj hatlarında değişkenlik ve farklılık isteyen müşteri taleplerine cevap vermek mümkün olamamaktadır. Birbirlerine benzer üretim karakteristikleri gösteren iki veya daha fazla ürünün üretiminin yapıldığı montaj hatlarına ise karışık modelli montaj hatları adı verilir. Karışık modelli montaj hatları talep değişimlerine hızlı cevap verebilmeye ve farklı özelliklerde ürün isteyen müşteri gereksinimlerini tatmin etmeye olanak sağlamaktadır. Karışık modelli montaj hatları TZÜ sisteminin önemli bir parçası olarak görülmektedir [Hwang ve Katayama, 2008]. Şekil 2.3 örnek karışık modelli montaj hatlarını göstermektedir.



Şekil 2.3. (a) Karışık modelli geleneksel düz montaj hattı ve (b) karışık modelli U-tipi montaj hattı

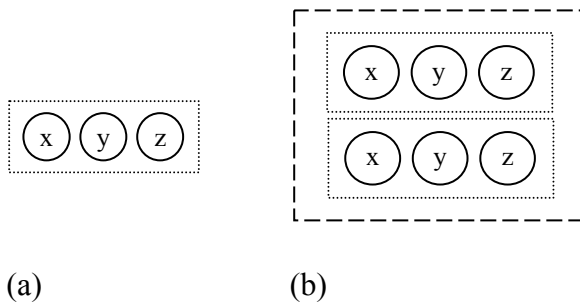
Birçok üretim işletmesinde birden fazla montaj hattı kullanılmaktadır. Montaj hatlarında kapasiteyi arttırması ve maliyetleri düşürmesi nedeniyle üretkenliğin arttırılması çok önemlidir. Montaj hatlarında kapasitenin arttırılmasının bir yolu da iki veya daha fazla montaj hattının birbirlerine paralel olarak yerleştirilip operatörlerin komşu montaj hatlarında çalışmalarını sağlamaktır. Bu tür montaj hatlarına paralel montaj hatları denir. Paralel montaj hatları montaj hattı uzunluğunu kısaltır, ihtiyaç duyulan operatör sayısını azaltır ve montaj hatlarından birinde problem ortaya çıktığında diğer montaj hatlarının kesintisiz çalışmalarına ve problemin kısa zamanda çözülebilmesine olanak sağlar. Paralel montaj hatlarında aynı veya farklı ürünler üretilbildiği gibi her bir montaj hattının çevrim zamanı da

aynı veya farklı olabilir. Ayrıca paralel montaj hatlarında karışık modellenli üretim de yapılabilir. Bu özelliklerinden dolayı üreticilere rekabet avantajı sağlamaktadır. Şekil 2.4’de örnek paralel montaj hatları verilmiştir.



Şekil 2.4. Paralel montaj hatları

Paralel montaj hatlarının getirdiği bazı avantajlar tek bir montaj hattında paralel istasyonlar kullanılarak da elde edilebilir. Montaj hattında yer alan bazı istasyonlarda iki veya daha fazla iş parçası aynı görevler yapılmak üzere operatörlere dağıtılır. Eğer bazı görevlerin işlem süreleri ihtiyaç duyulan çevrim zamanından büyükse paralel istasyonlar kullanılarak sistemin çevrim zamanında azaltma yapılabilir ve ihtiyaç duyulan çevrim zamanına erişilebilir. Şekil 2.5 örnek bir paralel istasyonu göstermektedir.



Şekil 2.5. Geleneksel düz montaj hatlarında paralel istasyonlar; (a) tek istasyon ve (b) iki paralel istasyon

Buraya kadar bahsedilen bütün montaj hattı tasarımlarında daima montaj hattının sadece tek bir tarafı, sağ tarafı veya sol tarafı, kullanılmaktadır. Küçük boyutlu ürünler veya aynı iş parçası üzerinde birden fazla operatörün çalışmasına imkan

olmayan ürünler için montaj hattının tek tarafından montaj işlemleri yapılır. Fakat büyük boyutlu ürünlerde montaj hattının her iki tarafının kullanılması dikkate değer bir çok avantajı beraberinde getirmektedir.

2.2. Çift Taraflı Montaj Hatları İle İlgili Temel Kavramlar

Montaj: Kullanıma hazır, tamamlanmış bir ürün elde etmek için çeşitli parçaların toplanması ve bir araya getirilmesi işlemidir. Henüz tamamlanmamış ürünlere iş parçası adı verilir.

Görev (operasyon): Montaj sürecinde yapılması gereken toplam işi oluşturan öğelerdir. Görevler genellikle daha küçük parçalara bölünemezler.

Görev (operasyon, işlem) zamanı: Bir görevin yerine getirilmesi için gereken süreye denir.

İstasyon: Çift taraflı montaj hattı üzerinde sağ ve sol taraflara konumlandırılmış belirli bir görev grubunun (bir veya daha fazla görevin) yerine getirildiği bölümlerdir. Her bir istasyonda sadece bir operatörün çalışabildiği varsayılır. İstasyon sayısı operatör sayısını temsil etmektedir.

Çift (eş) istasyon: Çift taraflı montaj hattı üzerine yerleştirilmiş karşılıklı istasyonlar çiftine denir. Çift istasyon sayısı montaj hattının uzunluğunu temsil etmektedir.

İş yükü: Bir istasyona atanan görevler kümesi.

İstasyon zamanı: Bir istasyona atanan görevlerin görev süreleri toplamı.

Çevrim zamanı: Bir istasyona atanan görevlerin yerine getirilmesi için tanınan süredir. Diğer bir deyişle, montaj hattından arka arkaya tamamlanarak ayrılan iki ürün arasında geçen zamandır. Çevrim zamanı en büyük görev süresinden daha küçük olamaz.

Operasyon tarafı: Çift taraflı montaj hatlarında bazı görevler hattın sadece tek bir tarafına yapılabilirler. Bu görevlere L-tipi (sol taraf) ve R-tipi (sağ taraf) görevleri denir. Bazı görevler ise hattın herhangi bir tarafında yapılabilirler. Bu görevlere ise E-tipi (her iki taraf) görevler adı verilir.

Öncelik şeması: Görevler arasındaki öncelik ilişkilerini, görev zamanlarını ve operasyon taraflarını göstermede kullanılan bir araçtır. Öncelik şemasında görevleri temsil eden düğümler, görev zamanları, görevlerin operasyon tarafları ve öncelik ilişkisini belirten oklar yer alır.

Operasyon sırası: Bir istasyona atanan görevlerin öncelik ilişkileri ve boş zamanlar dikkate alınarak oluşturulan yerine getirilme sırası.

Başlama zamanı: Bir görevin bütün öncülleri tamamlandıktan sonra operasyon sırasına bağlı olarak yerine getirilmeye başlandığı zaman.

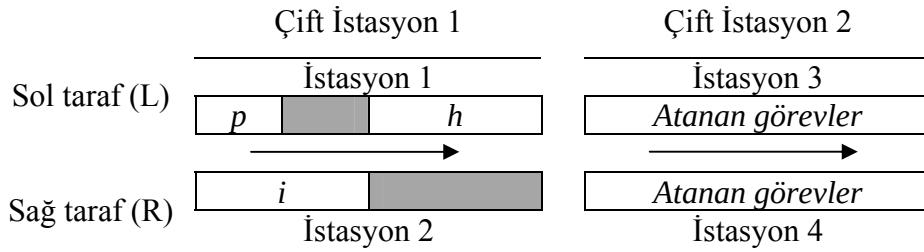
Bitiş zamanı: Bir görevin operasyon sırasına bağlı olarak tamamlandığı zaman. Diğer bir deyişle başlama zamanı ile görev süresi toplamı. Bir görevin bitiş zamanı çevrim zamanından büyük olamaz.

Boş zaman: Çevrim zamanı ile istasyon zamanı arasındaki fark. Çift taraflı montaj hatlarında boş zamanlar iki ardışık görev arasında, bir istasyondaki ilk görevden önce veya bir istasyondaki son görevden sonra ortaya çıkar.

2.3. Çift Taraflı Montaj Hatları

Özellikle otomobil, otobüs, kamyon, traktör gibi büyük boyutlu ürünlerin montaj işlemlerinin sadece hattın tek tarafından yapılması mümkün olamamaktadır. Bu durumda hattın her iki tarafı (sağ ve sol) kullanılarak montaj işlemleri yapılır. Bu tür montaj hatlarına çift taraflı montaj hatları denir. Böyle bir üretim hattında, montaj hattının sağ ve sol tarafı paralel olarak kullanılır. Montaj hattının karşılıklı alanlarında yer alan operatörler, eş zamanlı olarak aynı ürün üzerinde montaj

görevlerini yerine getirebilirler. Çift taraflı montaj hatlarında bazı görevler hattın sadece tek bir tarafında yapılabilirler. Bu görevlere L-tipi (sol taraf) ve R-tipi (sağ taraf) görevleri denir. Bazı görevler ise hattın herhangi bir tarafında yapılabilirler. Bu görevlere ise E-tipi (her iki taraf) görevler adı verilir. Örneğin bir otomobilin benzin tankının ve hava filtrelerinin montaj işlemi otomobilin sol tarafından daha rahat yapılabilirken, hava tankları ve egzozların montaj işlemi otomobilin sağ tarafından daha rahat yapılabilir. Pervane millerinin ve radyatörün montajı ise her iki taraftan da yapılabilir. Şekil 2.6 tipik bir çift taraflı montaj hattı konfigürasyonunu göstermektedir.



Şekil 2.6. Çift taraflı montaj hattı konfigürasyonu

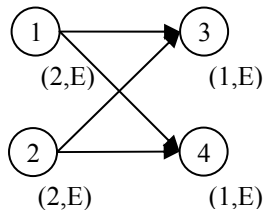
Şekil 2.6'da görev numaraları kutular içerisinde görevlerin ilgili pozisyonlarında yer almaktadır. p ve h görevleri İstasyon 1'e, i görevi İstasyon 2'ye atanmıştır. i ve p görevleri h görevinin öncülleridir. Taralı kısımlar boş zamanları göstermektedir. Karşılıklı iki istasyon bir çift istasyonu (İstasyon 1 ve İstasyon 2) oluşturur, bunların her birine ise diğeri için eş istasyon adı verilir. Çift taraflı montaj hatlarında aynı istasyonda arka arkaya yapılan montaj görevleri arasında bazen boş zamanlar ortaya çıkabilir. Şekil 2.6'da i ve p görevleri h görevinin öncülleri olduğu için bu görevler tamamlanmadan h görevi başlayamaz. Bu yüzden çift taraflı montaj hatlarında görevlerin sıraya bağlı bitiş zamanları dikkate alınır.

Çift taraflı montaj hatlarının pratikte tek taraflı montaj hatlarına nazaran bir çok avantajı vardır. Bunlar [Bartholdi, 1993];

- Montaj hattı uzunluğu kısadır,

- Malzeme taşıma maliyetleri, operatör hareketleri, hazırlık zamanları ve bir ürünün toplam üretim zamanı daha düşüktür,
- Ayrıca, montaj araç ve aletleri maliyetlerini de azaltmaktadır.

Aynı ürün ve aynı çevrim zamanı için bir çift taraflı montaj hattında ihtiyaç duyulan istasyon sayısı daima tek taraflı montaj hattı dengesi için gerekli istasyon sayısına eşit veya daha küçüktür [Bartholdi, 1993]. Tek taraflı montaj hatlarında boş zamanlar genellikle çevrim zamanı sonuna doğru ortaya çıkmaktadır. Çift taraflı montaj hatlarında ise görevlerin operasyon sırasına ve karşılıklı istasyonlardaki görevlerin öncelik ilişkilerine dolayısı ile başlama ve bitiş zamanlarına bağlı olarak ardışık iki görev arasında, çevrim zamanı başlangıcında ve çevrim zamanı sonunda ortaya çıkmaktadır. Aynı iş parçasının iki operatör tarafından eş zamanlı montaj operasyonlarının yapılması ortaya çıkan boş zamanları azaltmakta ve dolayısıyla istasyon sayısının düşmesine neden olmaktadır. Şekil 2.7’de verilen öncelik şemasında dört görev bulunmaktadır ve bütün görevler E-tipi görevlerdir. Çevrim zamanı üç zaman birimi olarak alındığında, tek taraflı montaj hattı dengesi için gerekli istasyon sayısının üç; çift taraflı montaj hattı dengesi için gerekli istasyon sayısının iki olduğu görülür.



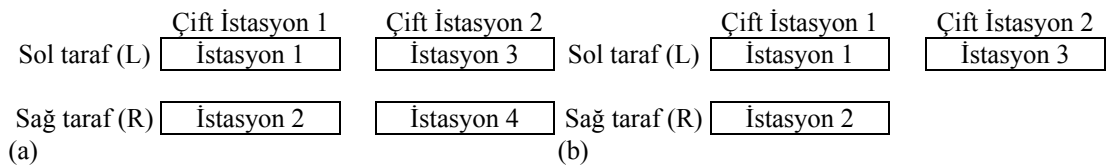
Şekil 2.7. Bir öncelik şeması

2.4. Çift Taraflı Montaj Hattı Dengeleme Problemi

Genel olarak bir çift taraflı montaj hattında, iş parçaları birbiri ardına montaj hattına girerler ve bir çift istasyondan diğer ardışık çift istasyona hareket ederler. Son çift istasyona geldiklerinde montaj işlemleri tamamlanır ve hattan ayrılırlar. İş parçaları her bir çift istasyonda belirli bir süre kadar beklerler ve karşılıklı istasyonlarda

bulunan operatörler bu süre içerisinde montaj işlemlerini eş zamanlı olarak yerine getirirler. Bu bekleme süresine çevrim zamanı denir. Görevler istasyonlara öncelik ilişkileri dikkate alınarak atanır. Her bir operatör ÇMHD’de çok önemli bir faktör olan görevlerin operasyon sırasına bağlı olarak kendi görevlerini yaparlar. Bir görevin yerine getirilebilmesi için teknik olarak yapılabilir olması gerekir. Diğer bir deyişle, o görevin bütün öncül görevlerinin tamamlanmış olması gerekir. Bazı görevler montaj hattının sağ veya sol tarafından yapılabilirken, bazı görevler herhangi bir taraftan yerine getirilmeye uygundur. Görevlerin bazı özel kısıtlar altında bir veya daha fazla amacı en iyileyecek şekilde istasyonlara atanması problemine ÇMHD problemi denir.

ÇMHD problemleri şöyle sınıflandırılabilir [Lee ve ark., 2001; Wu ve ark., 2008]. ÇMHDP-I: verilen bir çevrim zamanı için çift istasyon sayısını (hattın uzunluğunu) en küçükmek. ÇMHDP-II: verilen bir çift istasyon sayısı için çevrim zamanını en küçükmek. Bununla beraber, ÇMHDP-I’de, varsayalım ki aynı çift istasyon sayısında iki farklı çözüm olsun. Bu çözümlerden daha az istasyon sayısına sahip olan çözüm diğerinden daha iyi dengelenmiştir. Çünkü daha az operatöre ihtiyaç duymaktadır. Bu yüzden ÇMHDP-I’de istasyon sayısı, çift istasyon sayısının yanı sıra dikkate alınmalıdır. Şekil 2.8’de örnek bir gösterim yapılmıştır.



Şekil 2.8. İki farklı çözüm: (a) dört istasyona ihtiyaç var (b) üç istasyona ihtiyaç var

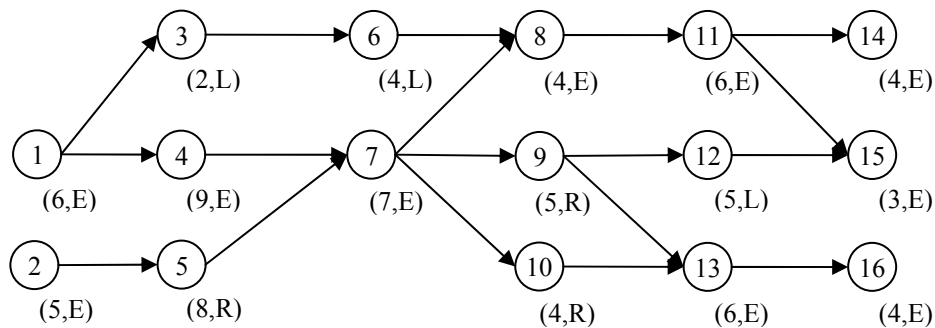
Bartholdi (1993) çift taraflı montaj hatlarının tek taraflı montaj hatlarından daha alan etkin olduğunu belirtmiştir. Çünkü çift taraflı montaj hattının uzunluğu daima eşit uzunlukta veya daha kısadır. Bartholdi (1993) ayrıca kısa hat uzunluğunun düşük malzeme taşıma maliyetleri, düşük montaj araç ve alet maliyetleri gibi bir çok avantajı da beraberinde getirdiğini belirtmektedir. Çift taraflı montaj hatlarının özel yapısından dolayı hattın uzunluğu, operatör sayısından daha fazla öneme sahiptir. Bu

yüzden, ÇMHDP-I’de çift istasyon sayısını en küçükleme birincil amaç, istasyon sayısını en küçükleme ise ikincil amaç olarak dikkate alınmalıdır. Wu ve ark. (2008) bu problem tipine işaret etmişlerdir. Görevlerin istasyonlara uygun bir ataması aşağıdaki kısıtları sağlamalıdır:

- Bir görev operasyon yönüne bağlı olarak sadece bir istasyona atanabilir.
- Bütün öncelik ilişkileri sağlanmalıdır.
- Herhangi bir görevin bitiş zamanı çevrim süresini aşamaz.

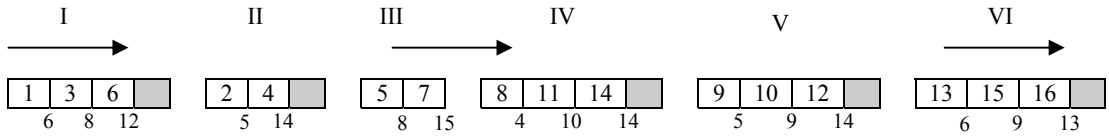
Çift taraflı montaj hatlarında aynı istasyona atanan görevlerin operasyon sırasını ve bu operasyon sırasına göre görevlerin bitiş zamanlarını belirlemek gerekir. Bu yapılırken eş istasyonda bulunan görevler de dikkate alınmalıdır. Şekil 2.6’ya bakıldığında h görevinin bitiş zamanı hesaplanırken hem aynı istasyonda bulunan p görevinin hem de eş istasyonda bulunan i görevinin bitiş zamanları hesaba katılmaktadır. Bir görevin bitiş zamanı kendi görev zamanını, kendinden önceki boş zamanları ve kendinden önce yerine getirilen görevlerin toplam görev zamanlarını içerir. Bu durumda en son yerine getirilen görevin istasyon zamanını verdiği söylenebilir.

ÇMHD kavramını daha açık tanımlayabilmek için Lee ve ark. (2001)’de verilen örnek bir problem kullanılmıştır. Örnek problemin öncelik ilişkileri, görev zamanları ve görevlerin operasyon tarafları Şekil 2.9’da verilmiştir. Görev sayısı 16’dır.

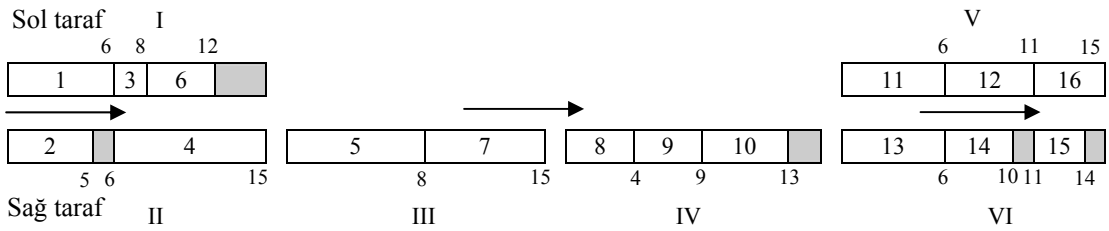


Şekil 2.9. 16 görevli örnek problemin öncelik ilişkileri şeması, görev zamanları ve görevlerin operasyon tarafları

Şekil 2.9’da düğümler içerisindeki rakamlar görevleri, düğümlerin altındaki (t_i , d_i) etiketi i görevinin görev zamanını ve operasyon tarafını (L: sol taraf, R: sağ taraf, E: herhangi bir taraf) göstermektedir. İki düğüm arasındaki yönlü ok öncelik ilişkisini ifade etmektedir. Şekil 2.10 çevrim zamanı 15 birim zaman için bir tek taraflı montaj hattı dengesini ve bir çift taraflı montaj hattı dengesini göstermektedir. Tek taraflı montaj hattı dengesinde bütün görevlerin R-tipi görevler olduğu varsayılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 2.10. Çevrim zamanı 15 için istasyonlara görev atamaları (a) tek taraflı montaj hattı (b) çift taraflı montaj hattı

Her bir görevin başlama ve bitiş zamanları kutuların yanında verilmiştir. Şekil 2.10 (a)’da verilen tek taraflı montaj hattı dengesinde altı istasyon bulunmaktadır. operatörler görevlerini herhangi bir kesintiye uğramaksızın yerine getirebilirler, çünkü boş zamanlar çevrim zamanının sonuna doğru ortaya çıkmaktadır. Şekil 2.10 (b)’de verilen çift taraflı montaj hattı dengesi de altı istasyona sahiptir. Bununla birlikte hattın uzunluğu dört istasyondur ve tek taraflı montaj hattı dengesinkinden daha kısadır. Fakat operatörler görevlerini yaparlarken karşı tarafta yapılan bazı görevlerin bitmesini beklemektedirler. Örneğin, 4. görevin yapılabilmesi için 1. görevin tamamlanması gerekmektedir. Bu nedenle 2. görev ve 4. görev arasında bir birim boş zaman ortaya çıkmıştır. Şekil 2.10’da verilen örnek çift taraflı montaj hattı dengesinde birincil amaç olarak çift istasyon sayısının (hattın uzunluğunun) en

küçüklenmesi ikincil amaç olarak istasyon sayısının (operatör sayısının) en küçüklenmesi dikkate alınmıştır.

Tek taraflı MHD problemi, kombinatorial optimizasyon problemlerinin NP-zor sınıfında yer almaktadır [Gutjahr ve Nemhauser, 1964]. Problemin kombinatorial yapısı problem boyutu büyüdükçe en iyi çözümün bulunmasını zorlaştırmaktadır. ÇMHD problemi de NP-zor sınıfındadır. Tek taraflı montaj hatlarının matematiksel karmaşıklığının yanı sıra çift taraflı montaj hatları bu matematiksel karmaşıklığa ek olarak görevlerin operasyon taraflarının getirdiği kısıtları da bünyesinde taşımaktadır [Bartholdi, 1993].

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

MHD problemi ilk olarak Helgeson (1954) tarafından çalışılmıştır ve ilk defa Salveson (1955) tarafından matematiksel olarak formüle edilmiştir. Bu çalışmalardan sonra günümüze kadar MHD problemi ile ilgili bir çok matematiksel modeli, alt ve üst sınır hesaplamalarını, çözüm prosedürlerini, değişik amaç fonksiyonlarını, sezgisel ve meta-sezgisel algoritmaları içeren çok sayıda çalışma yapılmıştır [Buxey ve ark., 1973; Baybars, 1986; Shtub ve Dar-El, 1989; Ghosh ve Gagnon, 1989; Erel ve Sarin, 1998; Rekiek ve ark., 2002; Scholl ve Becker, 2006; Becker ve Scholl, 2006; Boysen ve ark., 2007]. MHD problemi ile ilgili yerleşim şekline, ürün çeşitliliğine, görev zamanına, dikkate alınan amaca ve özel kullanım şekillerine göre detaylı literatür araştırması EK-1’de tablo halinde verilmiştir.

Literatürde, diğer MHD problemleri üzerine çok sayıda çalışma yapılmasına rağmen, çift taraflı montaj hatları az sayıda araştırmacı tarafından incelenmiştir. Yapılan çalışmaların hemen hepsi deterministik tek modelli düz ÇMHD problemi üzerine yapılmıştır.

ÇMHD problemi, ilk olarak Bartholdi (1993) tarafından ortaya atılmıştır. Bartholdi (1993), montaj hattı yöneticisine yardımcı olacak bir interaktif program ile bir görev atama kuralı geliştirmiş ve çalışmasında bir gerçek hayat problemine yer vermiştir.

Kim ve ark. (2000), verilen bir çevrim zamanı için istasyon sayısını en küçüklemeyi amaçlayan bir genetik algoritma tabanlı sezgisel yöntem sunmuşlardır. Ayrıca çalışmada belirli bir görevin belirli bir istasyona atanması esasına dayanan pozisyon kısıtlarını da dikkate almışlardır.

Lee ve ark. (2001), ÇMHDP-I ve ÇMHDP-II için bir grup atama prosedürü geliştirmişlerdir.

Lapierre ve Ruiz (2004), ÇMHD probleminde montaj işlemlerinin farklı yüksekliklerde yapıldığı durumu incelemiş ve bir öncelik tabanlı sezgisel sunmuşlardır.

Baykasoglu ve Dereli (2008), bölgeleme kısıtlarını da dikkate alarak karınca kolonisi optimizasyon tekniğine dayalı bir sezgisel geliştirmişlerdir.

Hu ve ark. (2008) bir iteratif algoritma geliştirmişlerdir. Bununla birlikte ÇMHDP-I'de istasyon sayısı için ilk defa bir alt-sınır hesaplaması sunmuşlardır.

Kim ve ark. (2009) ilk defa ÇMHD problemi için verilen bir çift istasyon sayısında çevrim zamanını en küçükleyen bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Ayrıca problemi genetik algoritma tabanlı bir sezgisel ile çözmüşlerdir.

Wu ve ark. (2008), ÇMHD problemi için bir dal-sınır algoritması geliştirmişlerdir.

Simaria ve Vilarinho (2009), karışık modelli ÇMHD problemi için bir matematiksel model geliştirmişlerdir, fakat bu model yüksek karmaşıklığa sahip olduğu için herhangi bir test problemini bu modeli kullanarak çözememişlerdir. Aynı çalışmalarında karınca kolonisi optimizasyonu tekniğine dayalı bir sezgisel yaklaşım sunmuşlardır.

Becker ve Scholl (2009) çift taraflı montaj hatlarını da kapsayan esnek paralel iş alanlarını tanımlamışlardır. Bir tamsayılı matematiksel model ile bir dal sınır algoritması geliştirmişlerdir.

Özcan ve Toklu (2009a) karışık modelli ÇMHD problemi için yeni bir matematiksel model ve bir tavlama benzetimi algoritması önermişlerdir.

Özcan ve ark. (2009) iki veya daha fazla çift taraflı montaj hattının eş zamanlı dengelenmesi esasına dayanan paralel ÇMHD problemi için bir tabu araması algoritması sunmuşlardır.

Çizelge 3.1’de konu ile ilgili yapılan çalışmaların özeti verilmiştir.

Çizelge 3.1. Çift taraflı montaj hattı dengeleme üzerine yapılan çalışmalar

Yazar(lar)	Yöntem	Problem tipi
Bartholdi (1993)	Kullanıcı etkileşimli program ve bir atama kuralı	ÇMHDP -I
Kim ve ark. (2000)	Genetik algoritmalar	ÇMHDP -I (pozisyon kısıtlı)
Lee ve ark. (2001)	Grup atama prosedürü	ÇMHDP -I, ÇMHDP -II
Baykasoglu ve Dereli (2008)	Karınca kolonisi optimizasyonu algoritması	ÇMHDP -I (bölgeleme kısıtlı)
Hu ve ark. (2008)	Sezgisel yöntem	ÇMHDP -I
Wu ve ark. (2008)	Dal-sınır algoritması	ÇMHDP -I
Simaria ve Vilarinho (2009)	Matematiksel model, Karınca kolonisi optimizasyonu algoritması	ÇMHDP -I (karışık modellenli üretim)
Kim ve ark. (2009)	Matematiksel model, Genetik algoritmalar	ÇMHDP -II
Becker ve Scholl (2009)	Matematiksel model, Dal-sınır algoritması	ÇMHDP -I
Özcan ve Toklu (2009a)	Matematiksel model, Tavlama benzetimi	ÇMHDP -I (karışık modellenli üretim)
Özcan ve ark. (2009)	Tabu araması algoritması	ÇMHDP -I (paralel çift taraflı montaj hatları)

Çizelge 3.1 incelendiğinde ÇMHDP ile ilgili çok az sayıda çalışma yapıldığı ve özellikle gerçek hayat uygulamalarında ortaya çıkan bazı problemlere henüz yanıt bulunamadığı görülmektedir. Bunlar arasında çok kriterli karar verme ve sıraya bağlı hazırlık zamanları yer almaktadır. Yine ÇMHD’de çok önemli bir problem olan tek modellenli ÇMHDP-I için önerilen bir matematiksel model henüz literatürde yer almamaktadır.

4. ÇİFT TARAFLI MONTAJ HATTI DENGELEME

Bu bölümde, deterministik görev zamanlı tek modellenli ÇMDHP-I için yeni bir karma tamsayılı matematiksel programlama modeli ve bir tabu araması algoritması önerilmiştir. Önerilen matematiksel model, ÇMHDP-II için Kim ve ark. (2009) tarafından geliştirilen matematiksel modele dayanmaktadır. Bu bölümde dikkate alınan ÇMHDP-I problemi aşağıdaki varsayımları içermektedir:

- Çift taraflı montaj hattında tek modellenli üretim yapılmaktadır.
- Montaj hattının her iki tarafında bulunan operatörler eş zamanlı çalışabilirler.
- Görevlerin operasyon yönleri bilinmektedir.
- Öncelik şeması bilinmektedir.
- Görev zamanları deterministik ve istasyon atamalarından bağımsızdır.
- Operatör yürüme zamanları yok sayılmıştır.
- Paralel görevlere ve paralel istasyonlara izin verilmemiştir.
- Ara stoklara müsaade edilmemiştir.

4.1. Matematiksel Model

Kim ve ark. (2009) ÇMHDP-II için bir matematiksel model sunmuşlardır. Bu model, literatürde çift taraflı montaj hatları için önerilen ilk matematiksel modeldir. Amacı verilen bir çift istasyon sayısı için çevrim zamanını en küçükleme. ÇMHDP-II için sunulan matematiksel model aşağıdaki gibidir [Kim ve ark., 2009]:

Amaç fonksiyonu:

$$\text{EnKüçük } ct \quad (4.1)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K(i)} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in I \quad (4.2)$$

$$\sum_{g \in J} \sum_{k \in K(h)} g \cdot x_{hgk} - \sum_{j \in J} \sum_{k \in K(i)} j \cdot x_{ijk} \leq 0 \quad \forall i \in I - P_0, h \in P(i) \quad (4.3)$$

$$t_i^f \leq ct \quad \forall i \in I \quad (4.4)$$

$$t_i^f - t_h^f + \psi \cdot \left(1 - \sum_{k \in K(h)} x_{hjk}\right) + \psi \cdot \left(1 - \sum_{k \in K(i)} x_{ijk}\right) \geq t_i \quad (4.5)$$

$$\forall i \in I - P_0, h \in P(i), j \in J$$

$$t_p^f - t_i^f + \psi \cdot (1 - x_{pj}) + \psi \cdot (1 - x_{ij}) + \psi \cdot (1 - z_{ip}) \geq t_p \quad \forall i \in I, \quad (4.6)$$

$$p \in \{r \mid r \in I - (P_a(i) \cup S_a(i) \cup C(i)) \text{ and } i < r\}, j \in J, k \in K(i) \cap K(p)$$

$$t_i^f - t_p^f + \psi \cdot (1 - x_{pj}) + \psi \cdot (1 - x_{ij}) + \psi \cdot z_{ip} \geq t_i \quad \forall i \in I, \quad (4.7)$$

$$p \in \{r \mid r \in I - (P_a(i) \cup S_a(i) \cup C(i)) \text{ and } i < r\}, j \in J, k \in K(i) \cap K(p)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K(i) \quad (4.8)$$

$$z_{ip} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, p \in \{r \mid r \in I - (P_a(i) \cup S_a(i) \cup C(i)) \text{ and } i < r\} \quad (4.9)$$

$$t_i^f \geq t_i \quad \forall i \in I \quad (4.10)$$

Matematiksel modelde Eş. 4.1 çevrim zamanı en küçüklemesidir. Eş. 4.2 atama kısıtıdır, her bir görevin sadece bir istasyona atanmasını sağlar. Eş. 4.3 öncelik ilişkileri kısıtıdır, görevler arasındaki bütün öncelik ilişkilerinin sağlanmasını garanti eder. Eş. 4.4 çevrim zamanı kısıtıdır, her bir görevin bitiş zamanının çevrim zamanını aşmamasını sağlar. Eş. 4.5, Eş. 4.6 ve Eş. 4.7 görevlerin sıraya bağlı bitiş zamanlarını kontrol eder. Her i ve h görev çifti için, eğer h görevi i görevinin öncülü ise ve bu görevler aynı çift istasyona atanmış ise Eş. 4.5 aktif hale gelir, $t_i^f - t_h^f \geq t_i$. Eğer herhangi i ve p görev çifti arasında öncelik ilişkisi yok ise ve bu görevler aynı (j, k) istasyonuna atanmış ise, Eş. 4.6 ve Eş. 4.7 aktif hale gelir. Eğer i görevi h görevinden önce atandı ise Eş. 4.6 $t_p^f - t_i^f \geq t_p$ halini alır. Aksi halde, Eş. 4.7 $t_i^f - t_p^f \geq t_i$ haline gelir. Eş. 4.8 ve Eş. 4.9 işaret kısıtları olup x ve z değişkenlerinin ‘0’ veya ‘1’ değer almasını sağlamaktadır. Eş. 4.10 bir görevin bitiş zamanının o görevin operasyon zamanına eşit veya büyük olmasını sağlar.

ÇMHDP-I için önerilen matematiksel modelin amacı; verilen bir çevrim zamanı için çift istasyon sayısını (hattın uzunluğunu) en küçüklemeektir. Daha önce bahsedildiği

gibi, aynı çift istasyon sayısına sahip farklı çözümler arasında istasyon sayısı (operatör sayısı) en düşük olan çözüm daha iyi dengelenmiştir. Bu yüzden bir taraftan hattın uzunluğu en küçüklenirken diğer taraftan operatör sayısı da en küçüklenmelidir. Wu ve ark. (2008) bu probleme işaret etmişler ve operatör sayısının ikincil amaç olarak en küçüklenebileceğini göstermişlerdir. Çalışmalarında problemin sadece biçimsel modelini vermişlerdir. Bu çalışmada ÇMHDP-I için önerilen karma tamsayılı matematiksel programlama modeli aşağıdaki gibidir:

Amaç fonksiyonu:

$$\text{EnKüçük } \sum_{j \in J} (F_j + G_j) + \varepsilon \cdot \sum_{j \in J} \sum_{k=1,2} U_{jk} \quad (4.11)$$

Kısıtlar:

Eş. 4.2 – Eş. 4.10 ve

$$\sum_{i \in I} x_{ijk} - \|W_{jk}\| \cdot U_{jk} \leq 0 \quad \forall j \in J, k \in K(i) \quad (4.12)$$

$$\sum_{k=1,2} U_{jk} - 2 \cdot F_j - G_j = 0 \quad \forall j \in J \quad (4.13)$$

$$U_{jk} \in \{0,1\} \quad \forall j \in J, k = 1,2 \quad (4.14)$$

$$F_j, G_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (4.15)$$

Eş. 4.11 birincil amaç olarak çift istasyon sayısını (hattın uzunluğunu), ikincil amaç olarak istasyon sayısını (operatör sayısını) en küçüklemetedir. Eş. 4.12 istasyon kısıtıdır. İstasyon (j, k) açılmış ise U_{jk} bir değerini aksi halde sıfır değerini alacaktır. Eş. 4.13 ile hattın uzunluğu bulunmaktadır. Eğer bir eş istasyonun her iki tarafı kullanılıyorsa F_j bir değerini G_j sıfır değerini alır, sadece tek tarafı kullanılıyor ise F_j sıfır değerini G_j bir değerini alır. Toplam hat uzunluğu F_j ve G_j toplamına eşittir. Eş. 4.14 ve Eş. 4.15 işaret kısıtlarıdır.

4.2. Tabu Araması Algoritması

4.2.1. Tabu araması algoritmasına giriş

Tabu araması algoritması (TAA) temel yerel arama stratejilerini kullanarak kombinatoriyal optimizasyon problemlerini çözmek için tasarlanmış bir meta sezgiseldir. Glover (1989a, 1989b) tarafından yerel optimum noktalardan uzaklaşmak için geliştirilmiştir. TAA yapısını hareket, komşuluk, başlangıç çözümü, arama stratejisi, hafıza yapısı, aspirasyon kriteri ve durdurma kriteri oluşturur. Genel olarak TAA en küçükleme problemlerinde en iyi veya en iyiye yakın sonuçları bulmakta oldukça kullanışlıdır [Taillard, 1990]. Tabu araması ile ilgili daha fazla bilgi için Glover ve Laguna (1993, 1997) ve Gendreau (2003)'ün çalışmalarına, MHD probleminde tabu araması çalışmaları için ise Scholl ve Voß (1996), Chiang (1999), Lapierre ve ark. (2006)'nın çalışmalarına bakılabilir.

TAA, belirli sayıdaki iterasyonlar boyunca kullanılan komşuluk yapısına bağlı olarak uygun çözümler üretir. Bu çalışmada önerilen TAA özel bir yapıya sahiptir. Kullanılan amaç fonksiyonunda, önceki bölümde önemi üzerine vurgu yapılan hattın uzunluğunun en küçüklemesi doğrudan yer almamasına rağmen, bu amaç birincil amaç olarak algoritmanın ana gövdesinde bulunmaktadır. Önerilen TAA'nın probleme özgü sağladığı bu avantaj ile daha gerçekçi sonuçlar elde edilmiştir. Bununla birlikte çok basit bir yapıya sahip olmasına rağmen literatürdeki çok daha karmaşık yaklaşımlardan daha etkili sonuçlar vermiştir.

4.2.2. Tabu araması algoritmasının geliştirilmesi

Önerilen TAA bir başlangıç çözümü ile başlar (x_0) ve bu çözümü mevcut çözüm (x_k) ve en iyi çözüm olarak (x^*) alır. Başlangıç çözümün amaç fonksiyonu değeri ($f(x_0)$), mevcut çözümün amaç fonksiyonu ($f(x_k)$) ve en iyi çözümün amaç fonksiyonu ($f(x^*)$) değeri haline gelir. x_k 'nin komşuluk çözümleri bir hareket (m) kullanılarak geliştirilir. Bunlar aday çözümlerdir. Bu aday çözümler arasından tabu listesinde olmayan en iyi

amaç fonksiyonuna sahip veya aspirasyon kriterini sağlayan aday çözüm (x'_k) yeni çözüm x_k olarak seçilir. Bu seçim bir hareket olarak adlandırılır ve tabu listesine (TL) eklenir ve TL güncellenir. Eğer yeni x_k , x^* 'dan daha iyi ise bu çözüm yeni x^* olur. Aksi halde, x^* aynı kalır. Bu arama süreci iterasyon sayacı (k) verilen bir iterasyon sayısına (K) ulaşınca kadar devam eder.

Başlangıç çözümü

Başlangıç çözümü bir öncelik listesi (PL) gibi tasarlanmıştır. Görevler istasyonlara görevin öncelik değerine bağlı olarak sırayla atanırlar. Görevlerin istasyonlara sıralı atanması, sıraya bağlı bitiş zamanlarının ve görev operasyonlarının bir istasyon içerisinde sırasının bilinmesini sağlar. PL 'deki bir pozisyon bir görev i 'yi ve bu pozisyonun değeri o görevin öncelik değerini (PR_i) ifade eder. PL 'nin uzunluğu görev sayısı kadardır ve her bir öncelik değeri 0 ile 1 arasında değer alır. Başlangıç çözümünde bu değerler rasgele verilir. Uygun bir çözüm elde etmek için görevler istasyonlara şöyle atanırlar; en yüksek öncelik değerine sahip atanabilir ilk görev, operasyon tarafına bağlı olarak ilk çift istasyona atanır. Atanabilir görevler kümesi güncellenir ve bu süreç bütün görevler atanıncaya kadar devam eder. Bir çift istasyon mümkün olduğunca yüklenmeden yeni bir çift istasyon açılmaz. Görev öncelikleri en büyük pozisyon ağırlığı, en büyük görev zamanı, en küçük görev numarası gibi öncelik kuralları da kullanılarak belirlenebilir. Öncelik kuralları ile ilgili daha fazla bilgi için Boctor (1995), Ponnambalam ve ark. (2000), Baykasoğlu (2006) ve Scholl ve Becker (2006)'in çalışmaları incelenebilir.

Komşuluk geliştirme

Mevcut çözüm x_k 'dan bir hareket ile elde edilen yeni çözüme komşu çözüm ($m(x_k)$) denir. Bu çalışmada komşu çözümler üretmek için swap operatörü kullanılmıştır. x_k 'nın bütün permütasyonları x'_k , rasgele seçilen bir a pozisyonu ile diğer b pozisyonlarının öncelik değerlerinin swap hareketi kullanılarak değiştirilmesi ile elde edilir. Toplam komşuluk sayısı $(n-1)'$ dir.

$$\begin{aligned}
x_k &= (PR_1, \dots, PR_a, \dots, PR_b, \dots, PR_{nt}) \\
m(x_k) &= (PR_1, \dots, PR_b, \dots, PR_a, \dots, PR_{nt}) \\
x'_k &= (PR_1, \dots, PR_b, \dots, PR_a, \dots, PR_{nt}) ; \forall b \in \{1, \dots, nt\}, a \neq b.
\end{aligned}$$

Tabu listesi ve aspirasyon kriteri

Bu çalışmada, tabu listesi iki boyutlu bir dizi şeklinde tasarlanmıştır. Eğer bir görev çifti yasaklı ise $TL[a][b]$ iterasyon sayacı değeri ile tabu listesi boyutunun toplam değerine eşit olur. $TL[a][b]$ boş ise a ve b pozisyonlarında swap hareketi yapılabilir. Aksi halde bu pozisyonlar tabu listesinden çıkıncaya kadar yasaklanır. Bu çalışmada, tabu listesi boyutu $\sqrt{n}$ olarak alınmıştır.

Eğer bir hareket ile elde edilen bir komşu çözüm mevcut en iyi amaç fonksiyonu değerinden daha iyi ise, bu çözüm tabu listesinde olsa bile kabul edilir. Buna aspirasyon kriteri denir.

Durdurma kuralı

Bu çalışmada iterasyon sayısı durdurma kriteri olarak alınmış ve görev sayısına eşit kabul edilmiştir.

Performans kriterleri ve amaç fonksiyonu

İki performans kriteri dikkate alınmıştır. Bunlar hattın etkinliği (HE) ve düzgünlük indeksidir (DI). HE 'nin en büyüklenmesi ile istasyon sayısı azaltılabilir. Bununla beraber DI 'nin en küçüklenmesi ile istasyonlar arasındaki iş yükü mümkün olduğunda eşit dağıtılır. $f_1(HE)$ ve $f_2(DI)$ kullanılan performans kriterleri olmak üzere verilen bir çözüm için aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$f_1(HE) = \frac{LB}{m_R + m_L} \times 100 \quad (4.16)$$

$$f_2(DI) = \sqrt{\frac{\sum_{w=1}^{m_R} (S_{\max} - S_w)^2 + \sum_{q=1}^{m_L} (S_{\max} - S_q)^2}{m_R + m_L}} \quad (4.17)$$

m_R sağ tarafta açılan istasyon sayısı, m_L sol tarafta açılan istasyon sayısıdır. $S_{\max}$ en büyük istasyon zamanı, S_w ve S_q ise sırasıyla bir sağ taraf istasyonu w ve bir sol taraf istasyonu q 'nın istasyon zamanıdır. LB ise istasyon sayısı için bir alt sınırı ifade etmektedir. ÇMHDP-I'de istasyon sayısı için alt sınır hesaplaması Hu ve ark. (2008) tarafından geliştirilmiştir ve aşağıdaki gibidir.

$$Max = \text{enbuyuk} \left\{ \left\lfloor \frac{LTotal}{ct} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{RTotal}{ct} \right\rfloor \right\} \quad (4.18)$$

$$LB = 2 \times Max + \text{enbuyuk} \left\{ 0, \left\lfloor \frac{ETotal - (Max \times ct - LTotal) - (Max \times ct - RTotal)}{ct} \right\rfloor \right\} \quad (4.19)$$

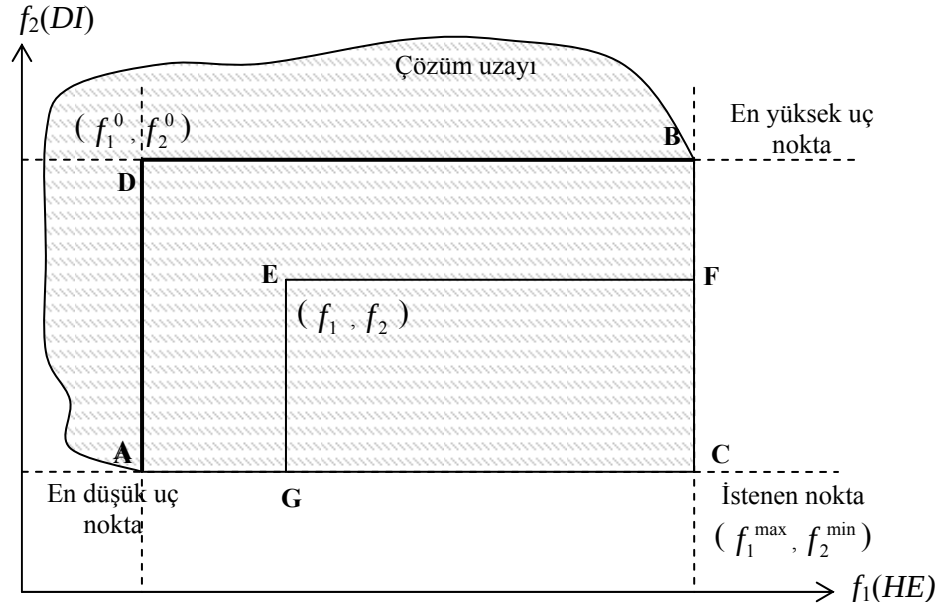
$LTotal$, $RTotal$ ve $ETotal$ sırasıyla L-tipi, R-tipi ve E-tipi görevlerin toplam görev zamanlarını göstermektedir.

Eş. 4.16 ve Eş. 4.17'de verilen performans kriterleri tek bir amaç fonksiyonu haline dönüştürülebilir. Bunun için en düşük sapma metodu (ESM) kullanılmıştır. ESM amaç fonksiyonları hakkında kısıtlı bilgi sahibi olunması durumunda uygulanabilir. Amaç fonksiyonlarının sapmaları toplamının en küçüklenmesi ile uzlaşık bir çözüm elde edilir [Tabucanon, 1988]. $f_1^0(HE)$ ve $f_2^0(DI)$ başlangıç çözümünden elde edilen amaç fonksiyonu değerleri olmak üzere önerilen yaklaşımın amaç fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$\text{EnKüçük } f = \frac{f_1^{\max}(HE) - f_1(HE)}{f_1^{\max}(HE) - f_1^0(HE)} + \frac{f_2^{\min}(DI) - f_2(DI)}{f_2^{\min}(DI) - f_2^0(DI)} \quad (4.20)$$

$f_1^{\max}(HE)$ hattın etkinliği için hedef değeri, $f_2^{\min}(DI)$ ise düzgünlük indeksi için hedef değeri göstermektedir. $f_2^{\min}(DI)$ sıfır ve $f_1^{\max}(HE)$ 100'dür. Çünkü kusursuz bir hat dengesi sıfır düzgünlük indeksini ve en yüksek seviyede hat etkinliğini gerektirir. Önerilen yaklaşımda kullanılan amaç fonksiyonu yapısı geometrik olarak Şekil 4.1'de verilmiştir.

A ve B noktaları sırasıyla $f_2(DI)$ ve $f_1(HE)$ 'nin hedef noktalarıdır. $f_1^{\max}(HE) - f_1^0(HE)$ ve $f_2^{\min}(DI) - f_2^0(DI)$ sırasıyla $|BD|$ ve $|AD|$ doğrularının uzunluğunu verir. E noktası çözüm uzayında herhangi bir nokta ve aday bir çözüm olsun. $|EF|$ ve $|EG|$ doğrularının uzunluğu sırasıyla $f_1^{\max}(HE) - f_1(HE)$ ve $f_2^{\min}(DI) - f_2(DI)$ ile bulunur. Bu durumda Eş. 4.20'de verilen amaç fonksiyonu şöyle ifade edilebilir; $|EF|/|BD| + |EG|/|AD|$. Bu ifadenin en küçüklenmesi ile $f_1(HE)$ en büyüklenecek ve $f_2(DI)$ en küçüklenecektir.



Şekil 4.1. ESM'nin geometrik gösterimi

Uygun bir çözümün oluşturulması

Çözüm sürecinin herhangi bir iterasyonunda aşağıdaki adımlar izlenerek daima uygun bir çözüm elde edilir. Burada P_i i görevinin öncüller kümesini, SAT atanabilir görevler kümesini, ST_i i görevinin başlama zamanını ve FT_i i görevinin bitiş zamanını göstermektedir.

Adım 1. $w = 1$, $q=1$, $S_w = 0$ ve $S_q = 0$.

Adım 2. SAT 'ni belirle. ($SAT = \{i \mid \text{bütün } p \in P_i \text{ daha önce atanmış}\}$). Eğer $SAT = \emptyset$ ise Adım 5'e git.

Adım 3. SAT kümesinde yer alan görevleri PR_i değerlerine göre azalan şekilde sırala.

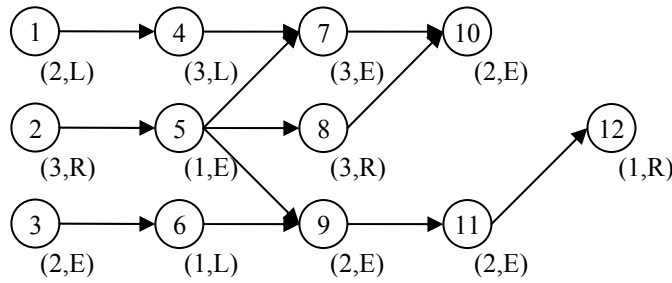
Adım 4. SAT 'da yer alan ve aşağıdakileri sağlayan ilk h görevini ata;

- a. Eğer $d_h=R$, $t_h + S_w \leq ct$ ve $t_h + FT_a \leq ct$ ($FT_a = \text{enbüyük}\{FT_p \mid p \in P_h \text{ karşı istasyona atanmış}\}$) ise h görevini w istasyonuna ata. $ST_h = \text{enbüyük}\{[S_w], [FT_a]\}$, $FT_h = t_h + ST_h$, $S_w = FT_h$ ve Adım 2'ye git. Eğer SAT kümesinde böyle bir görev yoksa $w = w + 1$, $S_w = 0$ ve Adım 2'ye git.
- b. Eğer $d_h=L$, $t_h + S_q \leq ct$ ve $t_h + FT_a \leq ct$ ($FT_a = \text{enbüyük}\{FT_p \mid p \in P_h \text{ karşı istasyona atanmış}\}$) ise h görevini q istasyonuna ata. $ST_h = \text{enbüyük}\{[S_q], [FT_a]\}$, $FT_h = t_h + ST_h$, $S_q = FT_h$ ve Adım 2'ye git. Eğer SAT kümesinde böyle bir görev yoksa $q = q + 1$, $S_q = 0$ ve Adım 2'ye git.
- c. Eğer $d_h=E$ ise 0 ile 1 arasında rasgele bir sayı üret, rn . Eğer $rn < 0.5$ ise Adım a'ya git. Aksi halde Adım b'ye git.

Adım 5. f^* 'i hesapla.

4.2.3. Örnek problem çözümü

Bu bölümde, önerilen yaklaşım Kim ve ark. (2000)'dan alınan 12 görevli örnek bir problem ile açıklanmıştır. Öncelik ilişkileri şeması, görev zamanları ve görevlerin operasyon tarafları Şekil 4.2'de verilmiştir. Çevrim zamanı sekiz olarak kabul edilmiş ve önerilen yaklaşımın parametreleri iterasyon sayısı 12 ve tabu listesi boyutu 4 olarak alınmıştır. Her bir iterasyonda elde edilen komşuluk sayısı 11'dir.

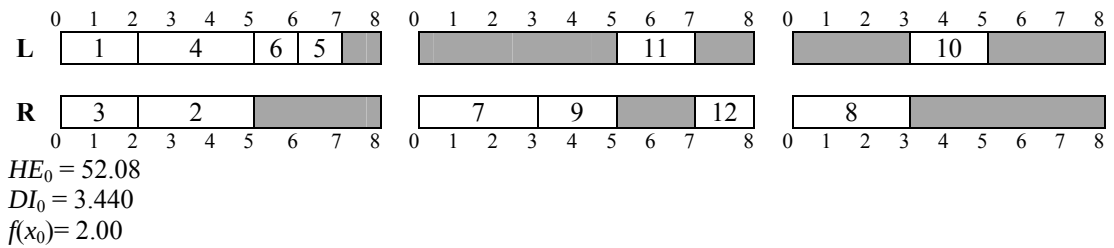


Şekil 4.2. 12 görevli örnek problem verileri

Şekil 4.3'te verilen başlangıç çözümü (x_0) çözüm sürecinin en başında rasgele geliştirilmiştir ($k=0$). Şekil 4.4'de çift taraflı montaj hattı dengesi bu başlangıç çözümü kullanılarak elde edilmiştir.

i	1	2	3	4	5	6
PR_i	0.8265	0.2913	0.4446	0.6122	0.5466	0.9330
i	7	8	9	10	11	12
PR_i	0.3949	0.0509	0.3127	0.5183	0.3346	0.3503

Şekil 4.3. Başlangıç çözümü (x_0)



Şekil 4.4. Başlangıç çift taraflı montaj hattı dengesi

Swap operatörü kullanılarak x_1 'in bütün komşulukları üretilir ve amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır ($f(m(x_1))$). Bunun için rasgele bir görev seçilir ve bütün komşulukları elde edilir. İlk iterasyonda rasgele seçilen görev 9. görev olsun. 9. görevin öncelik değeri 0.3127'dir. Bütün aday çözümler ve amaç fonksiyonu değerleri Şekil 4.5'te verilmiştir.

$m(x_1)$	$HE(m(x_1))$	$DI(m(x_1))$	$f(m(x_1))$	
9	1	62.50	3.715	1.862
	2	52.08	3.440	2.000
	3	78.12	3.041	1.340*
	4	62.50	3.924	1.923
	5	62.50	3.768	1.877
	6	62.50	3.924	1.923
	7	62.50	3.924	1.923
	8	62.50	3.660	1.846
	10	62.50	2.607	1.540
	11	62.50	3.714	1.862
	12	52.08	4.537	2.318

Şekil 4.5. İlk iterasyondaki aday çözümler

Şekil 4.5'te verilen aday çözümler arasında en iyi amaç fonksiyonu değerine sahip çözüm 9. ve 3. pozisyonların hareketi ile elde edilmiştir. Bu çözüm en iyi çözüm olarak alınır ve 9-3 hareketi tabu listesine kaydedilir. Bu hareket dört iterasyon boyunca tabu listesinde kalacaktır. Yeni öncelik değerleri, yeni çift taraflı montaj hattı dengesi ve tabu listesi sırasıyla Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de verilmiştir.

i	1	2	3	4	5	6
PR_i	0.8265	0.2913	0.3127	0.6122	0.5466	0.9330
i	7	8	9	10	11	12
PR_i	0.3949	0.0509	0.4446	0.5183	0.3346	0.3503

Şekil 4.6. İlk iterasyondaki en iyi aday çözüm (ikinci iterasyon için başlangıç çözümü)

L	0	1	2	3	4	5	6	7	8
		1		4		3		6	
R	0	1	2	3	4	5	6	7	8
		2		5		7			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
		9		8		11		12	

$HE_1 = 78.12, DI_1 = 3.041, f(x_1) = 1.34$

Şekil 4.7. İlk iterasyondaki çift taraflı montaj hattı dengesi

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1											
	2										
		3						5			
			4								
				5							
					6						
						7					
							8				
								9			
									10		
										11	

Şekil 4.8. Tabu listesi

12 iterasyon sonunda çözüm süreci tamamlanır. Elde edilen en iyi çözümün performans kriterleri değerleri $HE^* = 78.12$ ve $DI^* = 0.866$ 'dır. Şekil 4.9'da önerilen yaklaşım ile bulunan en iyi çözüm verilmiştir.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
L		1		5		4			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
			6		7			10	
R		2				8			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
		3				9		11	12

Şekil 4.9. Önerilen yaklaşım ile elde edilen çift taraflı montaj hattı dengesi

4.3. Test Sonuçları ve Değerlendirme

ÇMHDP-I için önerilen karma tamsayı matematiksel model küçük boyutlu bir problem seti (P9, P12, P16 ve P24) üzerinde test edilmiştir. P9, P12 ve P24 problemleri Kim ve ark. (2000)'den ve P16 problemi Lee ve ark. (2001)'den alınmıştır. Problem isimlerindeki rakamlar görev sayılarını temsil etmektedir. Önerilen matematiksel model GAMS (General Algebraic Modeling System) matematiksel programlama paketi kullanılarak Pentium IV 3.0 GHz PC ve 512 MB RAM üzerinde çalıştırılmıştır. Çözüm zamanı 7200 saniye ile sınırlandırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1'de NM çift istasyon sayısını, NS istasyon sayısını, LB teorik en küçük istasyon sayısını ve CPU(s) saniye cinsinden çözüm süresini belirtmektedir.

Çizelge 4.1. Matematiksel modelin test sonuçları

Problem	Çevrim zamanı	LB	NM	NS	CPU (s)
P9	3	6	3	6	0.093
	4	5	3	5	0.296
	5	4	2	4	0.140
	6	3	2	3	0.109
P12	5	5	3	6	22.609
	6	5	3	5	12.042
	7	4	2	4	0.203
	8	4	2	4	1.125
P16	15	6	4	6	132.859
	16	6	3	6	2.031
	18	5	3	6	153.328
	19	5	3	5	18.125
	20	5	3	5	156.609
	21	4	3	5	399.640
	22	4	2	4	0.671
P24	18	8	4	8	>7200
	20	7	4	8	>7200
	24	6	3	6	1621.437
	25	6	3	6	>7200
	30	5	3	5	>7200
	35	4	2	4	259.671
	40	4	2	4	>7200

Çizelge 4.1'e bakıldığında problem boyutu büyüdükçe matematiksel modelin performansının düştüğü görülmektedir. Deneyler 7200 saniye ile sınırlandırıldığı için bu deneylerden elde edilen sonuçların doğrudan en iyi sonuçlar olduğu söylemek mümkün değildir. Fakat *LB* değerleri bu sonuçlarla karşılaştırıldığında biri hariç diğerlerinin *LB* değerine eşit olduğu görülmektedir.

Önerilen tabu araması algoritması farklı çevrim zamanları ile yedi problem üzerinde test edilmiştir (P9, P12, P16, P24, P65, P148 ve P205). P65 ve P205 Lee ve ark. (2001)'dan alınmıştır. P148, Bartholdi (1993)'ye aittir fakat daha sonra Lee ve ark. (2001) tarafından yeniden düzenlenmiştir. Önerilen yaklaşım Visual Basic 6.0 programlama dili kullanılarak kodlanmıştır ve bütün test problemleri Pentium IV 3.0 GHz PC ve 512 MB RAM ile çözülmüştür. Önerilen yaklaşımın parametreleri; $K = nt$ ve tabu listesi boyutu $= \sqrt{nt}$ olarak alınmıştır. Her bir test problemi beş defa çözülmüştür. Çizelge 4.2'de elde edilen en iyi ve ortalama sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 4.2, önerilen yaklaşımın sonuçları ile birlikte Kim ve ark. (2000) tarafından geliştirilen genetik algoritmanın (GA), Lee ve ark. (2001)'nin sunduğu grup atama prosedürünün (GAPR), Baykasoglu ve Dereli (2008) tarafından sunulan karınca kolonileri optimizasyonu tabanlı sezgisel yaklaşımın (ACO) ve Hu ve ark. (2008)'nin sunduğu birerleme algoritmasının (EA) sonuçlarını göstermektedir. Önerilen tabu araması algoritması ile beş deneme sonunda elde edilen *NS*, *NM* ve *HE* değerleri aynı olduğu için sadece ortalama sonuçları verilmiştir. Önerilen yaklaşımın sonuçları istasyon sayısı bakımından GA, GAPR, ACO ve EA ile karşılaştırılmıştır. Çünkü bu çalışmalarda sadece istasyon sayıları rapor edilmiştir.

Çizelge 4.2'de görüldüğü gibi önerilen yaklaşım bu test problemleri üzerinde başarılı sonuçlar vermiştir. Kalın yazılar en iyi *NS* değerlerini göstermektedir. P205 problemi dışındaki problemlerde önerilen yaklaşım daima en iyi sonuçlara ulaşabilmiştir. Önerilen matematiksel modelin sonuçları ile karşılaştırma yapıldığında ise önerilen yaklaşımın matematiksel modelin sonuçlarına rahatlıkla çok kısa işlem sürelerinde ulaşabildiği görülmektedir. P205 probleminde ise 10 test probleminden sadece beş test probleminin en iyi sonuçları elde edilebilmiştir. Önerilen yaklaşım 41 test problemi arasından 24 test probleminin *LB* değerlerine ulaşmıştır. Bu sonuçların en iyi sonuçlar olduğu söylenebilir. Buna ek olarak, önerilen yaklaşım ile beş test problemi için bilinen en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Önerilen yaklaşımın hesaplama zamanı 0.06 s ve 2100 s aralığında bulunmuştur. Mevcut yaklaşımların kodlanma teknikleri, bilgisayarların teknik donanımları ve programlama dilleri farklı farklı olduğu için mevcut yaklaşımlar ile hesaplama zamanı karşılaştırmasının yapılması anlamlı sonuçlar vermeyecektir. Buna karşın önerilen yaklaşımın mevcut yöntemlere nazaran daha fazla hesaplama zamanına ihtiyaç duyduğu söylenebilir.

Çizelge 4.2. Karşılaştırma sonuçları

Problem	Çevrim zamanı	GA	GAPR	ACO	EA	LB	TAA				
							NS	NM	HE	DI	
										En iyi	Ortalama
P9	3	6	-	6	-	6	6	3	94.44	0.408	0.408
	4	5	-	5	5	5	5	3	85.00	1.000	1.137
	5	4	-	4	4	4	4	2	85.00	0.866	0.916
	6	3	-	3	-	3	3	2	94.44	0.577	0.577
P12	5	6	-	6	-	5	6	3	83.33	1.080	1.080
	6	5	-	5	5	5	5	3	83.33	1.183	1.183
	7	4	-	4	4	4	4	2	89.29	0.866	0.866
	8	-	-	-	4	4	4	2	78.12	0.866	1.068
P16	16	-	-	-	6	6	6	3	85.42	2.944	3.043
	19	-	-	-	6	5	5*	3	86.32	3.873	3.995
	21	-	-	-	5	4	5	3	78.10	3.194	4.667
	22	-	4	-	4	4	4	2	93.18	1.871	1.871
P24	18	-	-	-	8	8	8	4	97.22	0.707	0.771
	20	8	-	8	8	7	8	4	87.50	0.707	1.541
	24	-	-	-	7	6	6*	3	97.22	1.000	1.031
	25	6	-	6	6	6	6	3	93.33	1.000	1.903
	30	5	-	5	-	5	5	3	93.33	1.183	1.338
	35	5	-	5	-	4	4*	2	100.00	0.000	0.000
	40	4	-	4	-	4	4	2	87.50	0.000	0.773
P65	326	-	17	17	-	16	17	9	92.01	29.007	31.735
	381	-	15	15	-	14	15	8	89.22	45.569	45.796
	435	-	13	13	-	12	13	7	90.17	43.439	47.309
	490	-	12	12	-	11	11*	6	94.60	46.166	48.199
	544	-	10	10	-	10	10	5	93.73	43.906	44.591
	204	-	27	26	-	26	26	13	96.61	9.405	9.778
	255	-	21	21	-	21	21	11	95.69	13.806	14.039
P148	306	-	18	18	-	17	18	9	93.03	31.369	31.880
	357	-	15	15	-	15	15	8	95.69	21.715	23.323
	408	-	14	14	-	13	13*	7	96.61	23.345	24.731
	459	-	13	12	-	12	12	6	93.03	50.575	53.934
	510	-	11	11	-	11	11	6	91.34	93.264	93.528
	1133	-	23	24	-	21	24	12	85.85	210.338	221.202
	1322	-	20	22	-	18	21	11	84.09	249.664	291.708
P205	1510	-	20	18	-	16	18	9	85.89	268.042	279.671
	1699	-	16	18	-	14	17	9	80.83	343.080	386.174
	1888	-	16	15	-	13	16	8	77.28	343.912	408.756
	2077	-	14	14	-	12	14	7	80.28	435.579	460.256
	2266	-	13	12	-	11	13	7	79.25	521.011	591.248
	2454	-	12	12	-	10	12	6	79.28	532.544	562.019
	2643	-	12	11	-	9	11	6	80.30	538.893	594.536
	2832	-	10	10	-	9	10	5	82.43	519.756	548.040

5. ÇİFT TARAFLI MONTAJ HATTI Dengelemede Çok Kriterli Karar Verme

MHD problemleri için önerilen birçok çalışmada genellikle istasyon sayısı en küçükleme, çevrim zamanı en küçükleme gibi sadece bir amaç dikkate alınmaktadır. Bununla birlikte gerçek hayat uygulamalarında birden fazla amacın eş zamanlı en iyilenmesi durumu sıklıkla ortaya çıkabilmektedir. Dikkate alınan amaçların hedef değerleri karar vericiler tarafından kesin olarak belirlenebiliyorsa ilk defa Charnes and Cooper (1961) tarafından kullanılan amaç programlama oldukça etkin sonuçlar verebilmektedir. MHD literatüründe amaç programlama yaklaşımları sıklıkla kullanılmaktadır [Gunther ve ark., 1983; Deckro, 1989; Malakooti, 1990; Deckro ve Rangachari, 1990; Malakooti, 1994; Gökçen ve Erel, 1997; Gökçen ve Ağpak, 2006]. Diğer taraftan, karar vericilerin amaçların hedef değerlerini kesin olarak belirlemesi bazen oldukça güçtür. Çünkü hedef değerleri belirsiz, kesin olmayan değerler alabilir. Bulanık küme teorisi belirsizliğin üstesinden gelmek için kullanılan araçlardan birisidir [Zadeh, 1965]. Bulanık küme teorisine göre, belirsiz veya kesin olmayan amaçlar veya kısıtlar üçgensel, yamuk veya doğrusal üyelik fonksiyonları ile gösterilebilir [Bellman ve Zadeh, 1970]. MHD literatüründe bulanık amaç programlamayla ilgili çok az çalışma yapılmıştır [Toklu ve Özcan, 2008; Kara ve ark., 2009]. Bununla birlikte bütün çalışmalarda düz ve U-tipi montaj hatları dikkate alınmıştır.

ÇMHD’de çok kriterli karar verme yaklaşımları henüz kullanılmamıştır. Bu nedenle bu bölümde çift taraflı montaj hatlarında, kesin ve belirli amaçlar için bir karma tamsayı amaç programlama modeli ve kesin olmayan ve belirsiz amaçlar için bir karma tamsayı bulanık amaç programlama modeli önerilmiştir. Çok kriterli karar verme modellerinde literatürde sıklıkla kullanılan üç amaç dikkate alınmıştır. Bunlar; çift taraflı montaj hatlarına özgü çift istasyon sayısı, çevrim zamanı ve istasyon başına düşen görev sayısı amaçlarıdır.

5.1. Amaç Programlama Modeli

5.1.1. Amaç programlama

Amaç programlama çok kriterli karar vermenin belki de en eski dalıdır. Çok sayıda problemin çözümünde kullanılmıştır. İlk olarak Charnes and Cooper (1961) tarafından sunulmuştur. Amaç programlama ile ilgili yapılan çalışmalar Tamiz ve ark. (1998) tarafından incelenmiştir. Amaç programlamanın genel gayesi; değerleri kesin olarak belirlenen iki veya daha fazla çelişen amacın, hedef değerlerinden sapmalarını en küçüklemeektir. Orijinal amaçlar hedef değerleri ve iki yardımcı değişkeni içeren doğrusal eşitliklerle ifade edilir. Bu yardımcı değişkenler hedef değerlerden negatif sapmayı (d^-) ve pozitif sapmayı (d^+) gösterir. Hedef değerlerden istenmeyen sapmalar hiyerarşik olarak en küçüklendir. Bu yüzden, öncelikli amaç ilk olarak tatmin edilir, daha sonra diğer amaçlara geçilir. Amaç programlamanın bu biçimi leksikografik amaç programlama, non-Archimedian veya öncelikli amaç programlama olarak bilinir. Bir diğer biçimi ise ağırlıklı amaç programlamadır. Archimedian amaç programlama olarak da bilinen ağırlıklı amaç programlama MHD problemlerine uygun değildir, çünkü amaçlar farklı parametre değerlerine sahiptir ve bunların ağırlıklarını belirlemek oldukça zordur. Bu nedenle bu çalışmada öncelikli amaç programlama kullanılmıştır. Öncelikli amaç programlamanın genel yapısı aşağıdaki gibidir [Romero, 2004]:

$$\text{LEXMIN } a = \left[\begin{array}{c} \sum_{q \in pr_1} (\alpha_q \cdot d_q^- + \beta_q \cdot d_q^+), \dots, \sum_{q \in pr_r} (\alpha_q \cdot d_q^- + \beta_q \cdot d_q^+), \dots, \\ \sum_{q \in pr_Q} (\alpha_q \cdot d_q^- + \beta_q \cdot d_q^+) \end{array} \right] \quad (5.1)$$

$$f_s(x) =, \leq, \text{ veya } \geq b_s \quad s \in S \quad (5.2)$$

$$g_q(x) + d_q^- - d_q^+ = tv_q \quad q \in pr_r, \quad r \in Q \quad (5.3)$$

$$d_q^-, d_q^+ \geq 0 \quad q \in pr_r \quad (5.4)$$

pr_r r . öncelik düzeyindeki amacı ifade eder, α_q ve β_q sırasıyla d_q^- ve d_q^+ 'nin ağırlık faktörleridir. $f_s(x)$ sistem kısıtı ve $g_k(x)$ amaç kısıtıdır. tv_q ise q amacının hedef değeridir.

5.1.2. Önerilen amaç programlama modeli

Önerilen modelin amacı çift istasyon sayısını, çevrim zamanını ve istasyon başına düşen en yüksek görev sayısını hiyerarşik olarak en küçükmektir. Bu amaçlar MHD literatüründe sıklıkla kullanılmıştır [Gökçen ve Erel, 1997; Gökçen ve Ağpak, 2006; Toklu ve Özcan, 2008; Kara ve ark., 2009]. Bunlara ek olarak çok sayıda amaç ele alınabilir [Gunther ve ark., 1983].

Amaç 1: Çift taraflı montaj hattında kullanılan çift istasyon sayısı IST değerini geçmemeli.

Eğer çift istasyon sayısı karar verici tarafından belirtilirse aşağıdaki kısıt yazılabilir:

$$\sum_{j \in J} (F_j + G_j) \leq IST \quad (5.5)$$

Amaç kısıtı ise aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\sum_{j \in J} (F_j + G_j) + d_1^- - d_1^+ = IST \quad (5.6)$$

d_1^+ 'nin sıfıra en küçüklenmesi ile toplam çift istasyon sayısı IST değerine eşit veya daha az olacaktır.

Amaç 2: Bir görevin bitiş zamanı C değerini aşmamalı.

Amaç kısıtı aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$t_i^f + d_{2i}^- - d_{2i}^+ = C \quad \forall i \in I \quad (5.7)$$

d_{2i}^+ 'nin toplamının sıfıra en küçüklenmesi ile çevrim zamanı C değerine eşit veya daha düşük olacaktır.

Amaç 3: İstasyon başına düşen en yüksek görev sayısı TSK değerini aşmamalıdır.

Bazı fiziksel veya teknolojik sebeplerden dolayı istasyon başına düşen en yüksek görev sayısının en küçüklenmesi istenebilir. Bu durumda aşağıdaki kısıt yazılabilir:

$$\sum_{i \in I} x_{ijk} \leq TSK \quad \forall j \in J, k \in K(i) \quad (5.8)$$

Amaç kısıtı aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\sum_{i \in I} x_{ijk} + d_{3jk}^- - d_{3jk}^+ = TSK \quad \forall j \in J, k \in K(i) \quad (5.9)$$

Toplam d_{3jk}^+ 'nin sıfıra en küçüklenmesi görev sayısının TSK değerine eşit veya daha düşük olmasını sağlayacaktır.

Amaç programlama modelinde, karar vericinin hedef değerleri kesin olarak belirleyebildiği varsayılmıştır.

Çift taraflı montaj hatlarında istasyon sayısı çift istasyon sayısına bağlıdır. Bununla beraber verilen bir çift istasyon sayısı için istasyon sayısı kesin olarak belirlenemez. Görevlerin operasyon tarafları ve öncelik ilişkileri nedeniyle bazen görevler hattın sadece tek bir tarafına atanabilir. Bu yüzden istasyon sayısına $2 \times \text{çift istasyon sayısısı}$ veya $2 \times \text{çift istasyon sayısısı} - 1$ 'dir diyemeyiz. Genel olarak, istasyon sayısı; $1 \leq \text{istasyon sayısısı} \leq 2 \times \text{çift istasyon sayısısı}$ olarak ifade edilebilir. Bu durum çevrim zamanı sabit olduğunda doğrudur. Bunun aksine amaç programlama modelinde çevrim zamanı en küçüklenmesi de bir amaç olarak dikkate alınmıştır. Gökçen ve

Ağpak (2006) ve Toklu ve Özcan (2008) istasyon sayısının ve çevrim zamanının birbirleriyle çelişen amaçlar olduğunu rapor etmişlerdir. Eğer bir çözümde çevrim zamanı yeteri kadar düşürülürse istasyon sayısı artacaktır. Bununla birlikte istasyon sayısı bakımından hattın en yüksek kapasitesi kullanılacaktır. Sonuçta istasyon sayısının bir amaç olarak dikkate alınmasına gerek yoktur, zaten çift istasyon sayısı bir amaç olarak dikkate alınmaktadır.

Önerilen amaç programlama modeli aşağıdaki gibidir:

Amaç fonksiyonu:

$$\text{LEXMIN} \left\{ d_1^+, \sum_{i \in I} d_{2i}^+, \sum_{j \in J} \sum_{k=1,2} d_{3jk}^+ \right\} \quad (5.10)$$

Kısıtlar:

Amaç kısıtları: Eş. 5.6, Eş. 5.7 ve Eş. 5.9,

Sistem kısıtları: Eş. 4.2, Eş. 4.3, Eş. 4.5 – Eş. 4.10, Eş. 4.12 – Eş. 4.15 ve

$$d_1^-, d_1^+ \geq 0 \quad (5.11)$$

$$d_{2i}^-, d_{2i}^+ \geq 0 \quad i \in I \quad (5.12)$$

$$d_{3jk}^-, d_{3jk}^+ \geq 0 \quad \forall j \in J, k = 1,2 \quad (5.13)$$

5.2. Bulanık Amaç Programlama Modeli

5.2.1. Bulanık amaç programlama

Üyelik fonksiyonları kullanılarak oluşturulan ilk bulanık amaç programlama modeli Narasimhan (1980) tarafından tanımlanmıştır ve günümüze kadar bir çok çalışmada kullanılmıştır. Chanas ve Kuchta (2002) bulanık amaç programlama modellerinin

sınıflandırılması ve konu ile ilgili yapılan çalışmalar konusunda geniş çaplı bir araştırma yapmıştır.

Q adet bulanık amacı $(Z_q(x))$ içeren bir bulanık amaç programlama problemi aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\text{Enİyi } Z_q(x) \succ g_q \text{ (veya } Z_q(x) \prec g_q) \quad q \in Q \quad (5.14)$$

$$Ax \leq b \quad (5.15)$$

$$x \geq 0 \quad (5.16)$$

$Z_q(x) \succ g_q$ (veya $Z_q(x) \prec g_q$) ifadesi q . amaç g_q 'dan yaklaşık olarak büyüktür veya eşittir (yaklaşık olarak küçüktür veya eşittir) anlamına gelmektedir. $Z_q(x) \succ g_q$ ifadesinde q . bulanık amaç için doğrusal üyelik fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanır [Zimmerman, 1978];

$$\mu_q = \begin{cases} 1 & \text{eger } Z_q(x) \geq g_q \\ \frac{Z_q(x) - l_q}{g_q - l_q} & \text{eger } l_q < Z_q(x) < g_q \\ 0 & \text{eger } Z_q \leq l_q \end{cases} \quad (5.17)$$

$Z_q(x) \prec g_q$ ifadesinde q . bulanık amaç için doğrusal üyelik fonksiyonu ise,

$$\mu_q = \begin{cases} 1 & \text{eger } Z_q(x) \leq g_q \\ \frac{u_q - Z_q(x)}{u_q - g_q} & \text{eger } g_q < Z_q(x) < u_q \\ 0 & \text{eger } Z_q \geq u_q \end{cases} \quad (5.18)$$

şeklinde tanımlanır. Burada l_q/u_q q . amacın alt/üst tolerans limitidir.

Tiwari ve ark. (1987) bulanık amaçların önceliklerinin kullanılmasında esneklik sağlayan bir model sunmuştur. Model aşağıdaki gibidir:

$$\text{EnBüyük } \sum_{q=1}^Q w_q \mu_q \quad (5.19)$$

$$\mu_q \leq \frac{Z_q(x) - l_q}{g_q - l_q} \text{ (veya } \mu_q \leq \frac{u_q - Z_q(x)}{u_q - g_q} \text{)} \quad q \in Q \quad (5.20)$$

$$Ax \leq b \quad (5.21)$$

$$x, \mu_q \geq 0 \quad q \in Q \quad (5.22)$$

$$\mu_q \leq 1 \quad q \in Q \quad (5.23)$$

$\sum_{q=1}^Q w_q = 1$ $q \in Q$ olmak üzere w_q q . bulanık amacın ağırlığı ve μ_q q . bulanık amacın başarı derecesidir.

5.2.2. Önerilen bulanık amaç programlama modeli

İlk bulanık amaç; çift istasyon sayısı yaklaşık olarak IST değerinden küçük veya eşittir:

$$Z_1 = \sum_{j \in J} (F_j + G_j) \prec IST \quad (5.24)$$

İkinci bulanık amaç; bir görevin bitiş zamanı yaklaşık olarak C değerinden küçük veya eşittir:

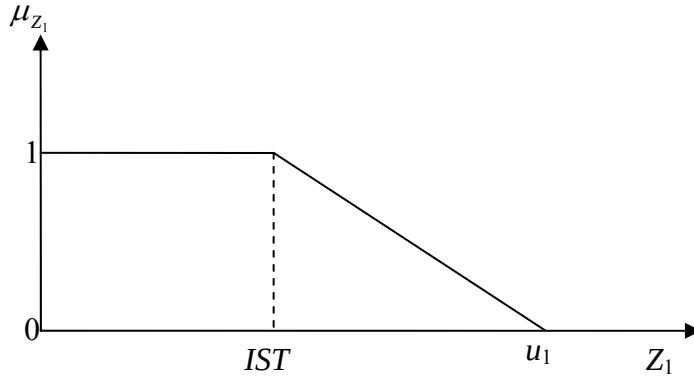
$$Z_2 = t_i^f \prec C \quad \forall i \in I \quad (5.25)$$

Üçüncü bulanık amaç; istasyon başına düşen görev sayısı yaklaşık olarak TSK değerinden düşük veya eşittir:

$$Z_3 = \sum_{i \in I} x_{ijk} \prec TSK \quad \forall j \in J, k \in K(i) \quad (5.26)$$

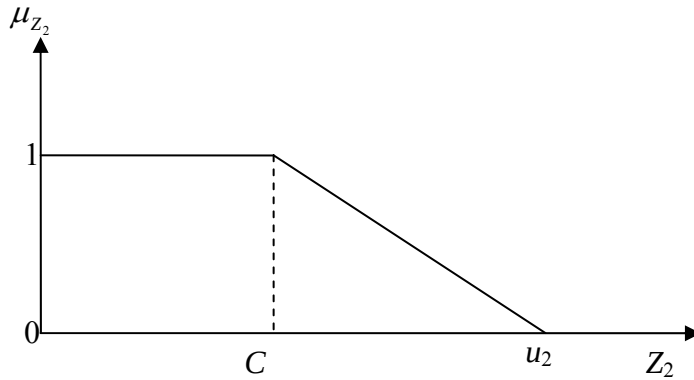
u_1, u_2 ve u_3 sırasıyla Z_1, Z_2 ve Z_3 bulanık amaçları için üst tolerans limitleri, IST, C ve TSK sırasıyla Z_1, Z_2 ve Z_3 bulanık amaçları için alt tolerans limitleri olsun. q . amaç için doğrusal üyelik fonksiyonu μ_{Z_q} şöyle tanımlanır:

$$\mu_q = \begin{cases} 1 & \text{eger } Z_1 \leq IST \\ (u_1 - Z_1)/(u_1 - IST) & \text{eger } IST < Z_1 < u_1 \\ 0 & \text{eger } Z_1 \geq u_1 \end{cases} \quad (5.27)$$



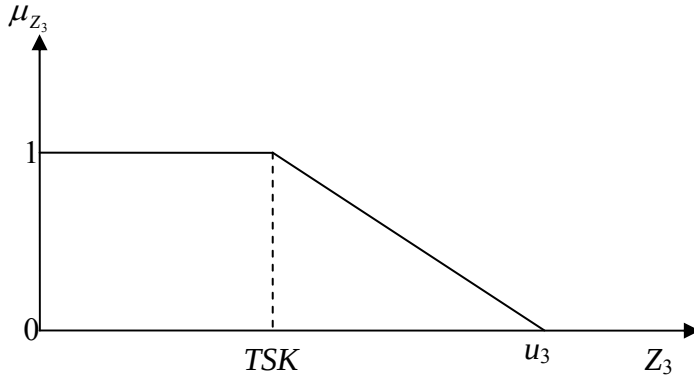
Şekil 5.1. Çift istasyon sayısını ifade eden bulanık amacın üyelik fonksiyonu

$$\mu_q = \begin{cases} 1 & \text{eger } Z_2 \leq C \\ (u_2 - Z_2)/(u_2 - C) & \text{eger } C < Z_2 < u_2 \\ 0 & \text{eger } Z_2 \geq u_2 \end{cases} \quad (5.28)$$



Şekil 5.2. Çevrim zamanını ifade eden bulanık amacın üyelik fonksiyonu

$$\mu_q = \begin{cases} 1 & \text{eger } Z_3 \leq TSK \\ (u_3 - Z_3)/(u_3 - TSK) & \text{eger } TSK < Z_3 < u_3 \\ 0 & \text{eger } Z_3 \geq u_3 \end{cases} \quad (5.29)$$



Şekil 5.3. İstasyon başına düşen görev sayısını ifade eden bulanık amacın üyelik fonksiyonu

Bulanık amaçlar aşağıdaki ifadelerle dönüştürülebilir:

$$\mu_{Z_1} \leq (u_1 - Z_1)/(u_1 - IST) \quad (5.30)$$

$$\mu_{Z_2} \leq (u_2 - Z_2)/(u_2 - C) \quad (5.31)$$

$$\mu_{Z_3} \leq (u_3 - Z_3)/(u_3 - TSK) \quad (5.32)$$

$$0 \leq \mu_{Z_1}, \mu_{Z_2}, \mu_{Z_3} \leq 1 \quad (5.33)$$

Son olarak önerilen bulanık amaç programlama modeli aşağıdaki gibi yazılabilir:

Amaç fonksiyonu:

$$\text{EnBüyük } f(\mu) = w_1 \cdot \mu_{Z_1} + w_2 \cdot \mu_{Z_2} + w_3 \cdot \mu_{Z_3} \quad (5.34)$$

Kısıtlar:

Bulanık amaç kısıtları:

$$(u_1 - IST) \cdot \mu_{Z_1} + \sum_{j \in J} (F_j + G_j) - u_1 \leq 0 \quad (5.35)$$

$$(u_2 - C) \cdot \mu_{Z_2} + t_i^f - u_2 \leq 0 \quad \forall i \in I \quad (5.36)$$

$$(u_3 - TSK) \cdot \mu_{Z_3} + \sum_{i \in I} x_{ijk} - u_3 \leq 0 \quad \forall j \in J, k \in K(i) \quad (5.37)$$

Sistem kısıtları: Eş. 4.2, Eş. 4.3, Eş. 4.5 – Eş. 4.10, Eş. 4.12 – Eş. 4.15 ve Eş. 5.33.

Eş. 5.34 bulanık amaçların ağırlıklı başarı derecelerinin toplamını en büyüklemektedir. Önerilen bulanık amaç programlama modelinde, bulanık amaçların başarı dereceleri için en düşük tatmin dereceleri tanımlanabilir, $\mu_{Z_q} \geq \delta_q$, burada δ_q ($0 \leq \delta_q \leq 1$) q . bulanık amacın başarı derecesi için en düşük tatmin derecesidir. Başarı derecelerinin en düşük tatmin derecelerini belirlemek oldukça zordur, fakat literatürde bazı kullanışlı metotlar yer almaktadır [Chen ve Tsai, 2001].

Bulanık amaçlar için verilen üst tolerans limitleri u_1 , u_2 ve u_3 genel olarak karar verici tarafından belirlenmektedir. Bununla birlikte verilen bu değerlerin alabileceği üst limitler vardır. Bunlar u_1 , u_2 ve u_3 için sırasıyla; görev sayısı, görevlerin görev zamanları toplamı ve yine görev sayısıdır.

5.3. Örnek problem çözümü

Önerilen amaç programlama ve bulanık amaç programlama modelleri ile Şekil 3.3'te verilen örnek problem çözülmüştür. Z_1 , Z_2 ve Z_3 bulanık amaçlarının alt tolerans limitleri (IST , C ve TSK) ve üst tolerans limitleri (u_1 , u_2 ve u_3) sırasıyla 4, 10, 2 ve 6, 15, 4 olsun. Örnek problem GAMS matematiksel programlama paketi kullanılarak şu amaç öncelik sırasına göre çözülmüştür: çift istasyon sayısı amacı (P_1) >> çevrim zamanı amacı (P_2) >> istasyon başına düşen görev sayısı amacı (P_3). Bu yüzden, amaç programlama modelinde ilk olarak d_1^+ , ikinci olarak d_{2i}^+ $i \in I$ ve üçüncü olarak d_{3jk}^+ $j \in J, k = 1, 2$ sapma değişkenleri en küçüklenmiştir. Bulanık amaç programlama modelinde ise bulanık amaçların ağırlıkları; $w_1 = 100/111$, $w_2 = 10/111$ ve $w_3 = 1/111$ şeklinde verilmiştir. Amaç programlama modelinde sadece alt tolerans limitleri kullanılmıştır. Modellerin çözüm süresi 7200 saniye ile sınırlandırılmıştır.

Önerilen çok kriterli karar verme modellerinin sonuçları Çizelge 5.1’de özetlenmiştir. MIGP amaç programlama modeli, FMIGP bulanık amaç programlama modeli sonuçlarını temsil etmektedir.

Çizelge 5.1. $P_1 \gg P_2 \gg P_3$ için elde edilen sonuçlar

Çift istasyon	MIGP		FMIGP	
	Atanan görev [bitiş zamanı]		Atanan görev [bitiş zamanı]	
	Sol taraf	Sağ taraf	Sol taraf	Sağ taraf
I	1[6], 4[15]	2[5], 5[13]	2[5], 4[15]	1[6], 5[14]
II	3[2], 6[6]	7[7], 8[11]	3[2], 6[6]	7[7], 10[11]
III	11[6], 14[10]	9[5], 10[9]	11[10], 14[14]	8[4], 9[9]
IV	12[5], 16[10]	13[6], 15[9]	12[5], 16[10]	13[6], 15[9]

Çizelge 5.1’de önerilen amaç programlama modeli sonuçlarına göre çevrim zamanı amacı tatmin edilememiş fakat çift istasyon sayısı amacı ve istasyon başına düşen görev sayısı amacı tatmin edilmiştir. Buna göre d_1^+ ve d_{3jk}^+ $j \in J, k = 1,2$ sıfıra eşittir. 4., 5. ve 8. görevler için d_{2i}^+ değerleri sırasıyla 5, 3 ve 1 diğer görevlerinki ise sıfırdır. Bulanık amaç programlama modeli de benzer sonuçlar bulmuştur. Z_1 , Z_2 ve Z_3 bulanık amaçlarının başarı dereceleri sırasıyla 1, 0 ve 1’dir.

Literatürde, bulanık amaçların ilişkisel önemini dikkate alan bir çok yaklaşım geliştirilmiştir [Narasimhan, 1980; Hannan, 1981; Tiwari ve ark., 1987; Wang ve Fu, 1997; Chen ve Tsai, 2001]. Bu çalışmada, Tiwari ve ark. (1987) tarafından sunulan yaklaşım kullanılmıştır. Bu modelin temel yapısı karar vericinin önceliklerinin belirlenmesinde tek bir doğrusal ağırlıklı fonksiyonu kullanmasıdır. Amaçların ilişkisel önem dereceleri daha sonra karar verici tarafından belirlenmektedir. Bu modelde yüksek ağırlık değerleri daha fazla öneme sahip amaçlara verilir. Birbirine yakın verilen ağırlıklar yanıltıcı sonuçların alınmasına neden olabilir. Örneğin, örnek problemde ağırlık değerleri $w_1 = 0.5$, $w_2 = 0.4$ ve $w_3 = 0.1$ olarak belirlenmiş olsaydı, Z_1 , Z_2 ve Z_3 bulanık amaçlarının başarı dereceleri sırasıyla 0.5, 0.8 ve 1 değerlerini alacaklardı. Bu durumda çift istasyon sayısı amacı tümüyle tatmin edilememiş olacaktı. Halbuki Z_1 en büyük öneme sahip bulanık amaç olarak alınmıştı. Bu çalışmada kullanılan ağırlık değerleri yüksek öncelikten düşük

önceliğe doğru 100/111, 10/111 ve 1/111 şeklinde alınmıştır. Literatürde, bulanık amaçların ağırlık değerlerini belirlemek için geliştirilmiş yaklaşımlar bulunmaktadır [Hwang ve Yoon, 1987]. Eğer bulanık amaçlar arasında ilişkisel öncelik belirlenemiyorsa Aköz ve Petrovic (2007) tarafından sunulan bulanık amaç programlama modeli kullanılabilir.

5.4. Test sonuçları ve değerlendirme

Bu bölümde Kim ve ark. (2000)'dan alınan P24 problemi önerilen amaç programlama ve bulanık amaç programlama modellerinin etkinliğini göstermek için kullanılmıştır. Problem verileri Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2. 24 görevli problemin verileri

Görev	Hemen öncüller	Görev zamanı	Operasyon tarafı	Görev	Hemen öncüller	Görev zamanı	Operasyon tarafı
1	-	3	L	13	9	3	E
2	-	7	L	14	9,10	9	R
3	-	7	R	15	4	5	R
4	-	5	R	16	11	9	L
5	2	4	L	17	12	2	E
6	2,3	3	E	18	13	7	E
7	3	4	R	19	13,14	9	E
8	5	3	E	20	15	9	R
9	6	6	E	21	16,17	8	L
10	7	4	E	22	18	8	E
11	1	4	L	23	19,20	9	R
12	8,9	3	L	24	20	9	E

Amaç programlama modelinde her bir amaç için hedef değerleri kesin olarak ifade edilir. Bunun aksine bulanık amaç programlamada hedefler alt ve üst tolerans limitleri ile ifade edilir. Her iki çok kriterli karar verme tekniğinde amaçların öncelikleri mutlaka bilinmelidir. Çizelge 5.3 amaçların alt ve üst tolerans limitlerini ve önem sıralarını göstermektedir. Amaç programlama modelinde sadece alt tolerans limitleri dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.3. Amaçların önem sıraları ve alt ve üst tolerans limitleri

Deney	Çift istasyon sayısı amacı			Çevrim zamanı amacı			Görev sayısı amacı		
	IST	u_1	Öncelik düzeyi	C	u_2	Öncelik düzeyi	TSK	u_3	Öncelik düzeyi
1	3	5	P_1	20	25	P_2	4	7	P_3
2	3	5	P_2	20	25	P_3	4	7	P_1
3	3	5	P_3	20	25	P_1	4	7	P_2
4	4	6	P_1	15	20	P_3	2	5	P_2
5	4	6	P_2	15	20	P_1	2	5	P_3
6	4	6	P_3	15	20	P_2	2	5	P_1

Çizelge 5.4. Elde edilen sonuçlar

Deney	MIGP			FMIGP		
	Tatmin durumu			Bulanık amaçların başarı düzeyi		
	Amaç 1	Amaç 2	Amaç 3	μ_{z_1}	μ_{z_2}	μ_{z_3}
1	S	U	U	1.000	0.200	0.667
2	U	S	S	0.500	1.000	1.000
3	U	S	S	0.500	1.000	1.000
4	S	U	U	1.000	0.000	0.667
5	U	S	S	0.000	1.000	1.000
6	U	S	S	0.000	1.000	1.000

S: Tatmin edildi

U: Tatmin edilemedi

Çizelge 5.4’te verilen sonuçlara bakıldığında, deney 1 ve deney 4’te çift istasyon sayısı amacı en fazla öneme sahip olduğu için bu amaç tümüyle tatmin edilmiştir. Diğer deneylerde ise çevrim zamanı amacı ve istasyon başına düşen görev sayısı amacı tümüyle tatmin edilebilmiştir. Bu sonuçlara göre çift istasyon sayısı amacı çevrim zamanı amacıyla ve istasyon başına düşen görev sayısı amacıyla çelişmektedir. Benzer sonuçlar Gökçen ve Ağpak (2006) ve Toklu ve Özcan (2008) tarafından da elde edilmiştir.

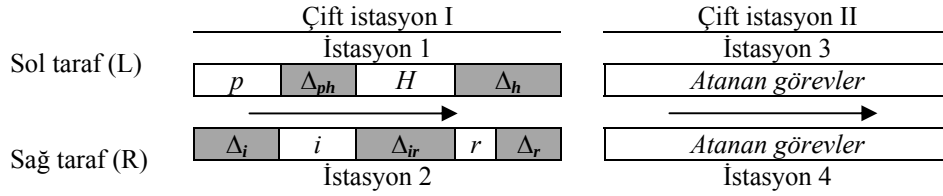
6. HAZIRLIK ZAMANLI ÇİFT TARAFLI MONTAJ HATTI DENGELEME

ÇMHD’de sıraya bağlı görev zamanları dikkate alınmasına rağmen sıraya bağlı hazırlık zamanları henüz dikkate alınmamıştır. Gerçek hayat uygulamalarında, aynı istasyonda yapılan görevler dizisi içerisinde bir görev tamamlandıktan sonra kendisinden hemen sonra gelen görevin işlem zamanını hazırlık gerektirebileceğinden dolayı etkileyebilir. Çift taraflı montaj hatlarında bu hazırlık zamanı sonra yapılan görevin bitiş zamanına eklenmelidir. Bununla birlikte, operasyonlar çevrimsel olarak sürekli yapıldığından dolayı en son yapılan görev ilk yapılan görev için yine hazırlık gerektirebilir. Montaj hatlarında sıraya bağlı hazırlık zamanlarını dikkate alan ilk çalışma Andrés ve ark. (2008)’na aittir. Bu problem hazırlık zamanlı genel montaj hattı dengeleme olarak adlandırılmıştır. Problemin tanımını Andrés ve ark. (2008) şöyle yapmaktadır: “Aynı istasyonda her defasında i görevinden sonra yapılan h görevi için bir hazırlık zamanı π_{ih} toplam operasyon zamanına eklenmelidir. Dahası, istasyonda en son yapılan bir p görevi ve ilk yapılan bir i görevi için yine bir hazırlık zamanı π_{pi} ortaya çıkar. Çünkü operasyonlar çevrimsel olarak yapılmaktadır”. Bu problemde hem MHD hem de görevlerin istasyonlar içerisinde sıralanması problemi eş zamanlı çözülmelidir. Andrés ve ark. (2008) bu problem için sekiz farklı sezgisel kural ve bir GRASP algoritması önermişlerdir. Bu çalışmanın hemen ardından Martino ve Pastor (2009) öncelik kurallarına bağlı sezgisel prosedürler geliştirmişlerdir.

Sıraya bağlı görev zamanı artışı ile ilgili benzer bir çalışma Scholl ve ark. (2008) tarafından yapılmıştır. Fakat içerik olarak yukarıda bahsedilen problemden oldukça farklı olan bu problemi Scholl ve ark. (2008) şöyle tanımlanmaktadır: “aynı istasyonda olsun veya olmasın, tamamlanan bir i görevi kendisinden sonra yapılan bir h görevinin işlem zamanını arttırır”. Bu çalışmada Andrés ve ark. (2008) tarafından ortaya atılan problem dikkate alınmıştır. Çift taraflı montaj hatlarında henüz dikkate alınmayan bu problem için bir karma tamsayılı matematiksel programlama modeli ve bir sezgisel çözüm prosedürü önerilmiştir.

6.1. Hazırlık Zamanlı Çift Taraflı Montaj Hatları

Aynı istasyon (j,k) 'da, bir i görevinden hemen sonra yapılan bir r görevi için hazırlık yapılır. Bunun için gerekli olan hazırlık zamanı π_{ir} , r görevinin bitiş zamanı hesaplamalarında dikkate alınır. Çift taraflı montaj hatları dengelenirken boş zamanlar (a) iki ardışık p ve h görevleri arasında Δ_{ph} , (b) bir istasyondaki ilk görevden önce Δ_i ve (c) bir istasyondaki son görevden sonra Δ_h ortaya çıkar. Şekil 6.1'de bir çift taraflı montaj hattında ortaya çıkabilecek boş zamanlar gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Bir çift taraflı montaj hattında boş zamanlar

Eğer iki ardışık görev arasındaki boş zaman Δ_{ph} hazırlık zamanı π_{ph} 'dan küçük ise, $\pi_{ph} - \Delta_{ph}$ değeri kadar birim zaman h görevinin bitiş zamanına eklenmelidir. Δ_{ph} , π_{ph} 'dan büyük veya eşit ise gerekli olan hazırlık Δ_{ph} süresi içerisinde yapılabileceği için h görevinin bitiş zamanında değişiklik olmaz. Benzer biçimde, eğer $\Delta_r + \Delta_i < \pi_{ri}$ ise $\pi_{ri} - \Delta_r - \Delta_i$ kadar birim zaman i görevinin bitiş zamanı hesaplamalarında kullanılmalıdır. Bu bölümde ele alınan problem için aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

- Görev zamanları ve hazırlık zamanları bilinmektedir.
- Öncelik ilişkileri bilinmektedir ve tek modellenli üretim söz konusudur.
- Verilen bir çevrim süresi içerisinde hattın her iki tarafında eşzamanlı montaj işlemleri yapılmaktadır.
- Bütün istasyonlar eşit donatılmıştır ve bir görev herhangi bir istasyona atanabilir.
- Seyahat zamanları dikkate alınmamıştır.
- Paralel görevlere, paralel istasyonlara ve ara stoklara izin verilmemiştir.

6.2. Matematiksel Model

Andrés ve ark. (2008)'nın önerdiği matematiksel model dikkate alınarak hazırlık zamanlı ÇMHD problemi için aşağıdaki matematiksel model önerilmiştir.

Amaç fonksiyonu:

$$\text{EnKüçük } \sum_{j \in J} (F_j + G_j) + \varepsilon \cdot \sum_{j \in J} \sum_{k=1,2} U_{jk} \quad (6.1)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K(i)} \sum_{s \in NT(j,k)} x_{ijks} = 1 \quad \forall i \in I \quad (6.2)$$

$$\sum_{i \in W(j,k)} x_{ijks} \leq 1 \quad \forall j \in J, k \in K(i), s \in NT(j,k) \quad (6.3)$$

$$\sum_{i \in W(j,k)} x_{ijk,s+1} - \sum_{i \in W(j,k)} x_{ijks} \leq 0 \quad \forall j \in J, k \in K(i), s \in NT(j,k) \wedge s < \|W(j,k)\| \quad (6.4)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{g \in J} \sum_{k \in K(h)} \sum_{s \in NT(g,k)} (W_{\max} \cdot (g-1) + s) \cdot x_{hgks} - \\ & \sum_{j \in J} \sum_{k \in K(i)} \sum_{s \in NT(j,k)} (W_{\max} \cdot (j-1) + s) \cdot x_{ijks} \leq 0 \end{aligned} \quad (6.5)$$

$\forall i \in I - P_0, h \in P(i)$

$$t_i^f \leq ct \quad \forall i \in I \quad (6.6)$$

$$t_i^f - t_h^f + \psi \cdot \left(1 - \sum_{k \in K(h)} \sum_{s \in NT(j,k)} x_{hjks} \right) + \psi \cdot \left(1 - \sum_{k \in K(i)} \sum_{s \in NT(j,k)} x_{ijks} \right) \geq t_i \quad (6.7)$$

$\forall i \in I - P_0, h \in P(i), j \in J$

$$\begin{aligned} & t_p^f - t_i^f + \psi \cdot \left(1 - \sum_{s \in NT(j,k) \wedge s > 1} x_{pjks} \right) + \psi \cdot \left(1 - \sum_{s \in NT(j,k) \wedge s < nt} x_{ijks} \right) + \\ & \psi \cdot (1 - z_{ipjk}) \geq t_p + \pi_{ip} \end{aligned} \quad (6.8)$$

$\forall (i,p) \mid i \neq p \wedge i, p \in W(j,k), j \in J, k \in K(i) \cap K(p)$

$$\begin{aligned} & t_p^f - t_i^f + ct + \psi \cdot (1 - x_{pjkl}) + \psi \cdot (1 - w_{ijk}) + \psi \cdot (1 - z_{ipjk}) \geq t_p + \pi_{ip} \\ & \forall (i,p) \mid i \neq p \wedge i, p \in W(j,k), j \in J, k \in K(i) \cap K(p) \end{aligned} \quad (6.9)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{s \in NT(j,k)} x_{ijks} - \|W(j,k)\| \cdot U_{jk} \leq 0 \quad \forall j \in J, k \in K(i) \quad (6.10)$$

$$\sum_{k=1,2} U_{jk} - 2 \cdot F_j - G_j = 0 \quad \forall j \in J \quad (6.11)$$

$$x_{ijks} + x_{hjk,s+1} \leq 1 + z_{ihjk} \\ \forall j \in J, k \in K(i) \cap K(h), s \in NT(j,k) \wedge s < \|W(j,k)\|, \\ (i,h) \mid i \neq h \wedge i, h \in W(j,k) \wedge h \notin P(i) \quad (6.12)$$

$$x_{ijks} - \sum_{\substack{\forall h \in W(j,k) \mid i \neq h \wedge h \notin P(i)}} x_{hjk,s+1} \leq w_{ijk} \\ \forall j \in J, k \in K(i) \cap K(h), i \in W(j,k), s \in NT(j,k) \wedge s < \|W(j,k)\| \quad (6.13)$$

$$w_{ijk} + x_{hjk1} \leq 1 + z_{ihjk} \\ \forall j \in J, k \in K(i) \cap K(h), (i,h) \mid i \neq h \wedge i, h \in W(j,k) \wedge i \notin P(h) \quad (6.14)$$

$$t_i^f \geq t_i \quad \forall i \in I \quad (6.15)$$

$$x_{ijks} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K(i), s \in NT(j,k) \quad (6.16)$$

$$U_{jk} \in \{0,1\} \quad \forall j \in J, k = 1,2 \quad (6.17)$$

$$F_j, G_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (6.18)$$

$$z_{ipjk} \in \{0,1\} \quad \forall (i,p) \mid i \neq p \wedge i, p \in W(j,k), j \in J, k \in K(i) \cap K(p) \quad (6.19)$$

$$w_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K(i) \quad (6.20)$$

Eş. 6.1 çift istasyon sayısını birincil amaç olarak, istasyon sayısını ise ikincil amaç olarak en küçüklemektedir. Eş. 6.2, atama kısıtı olup bir görevin sadece bir istasyona ve sadece bir pozisyona atanmasını sağlamaktadır. Eş. 6.3, herhangi bir istasyonda bir pozisyona sadece bir görevin atanmasını sağlamaktadır. Eş. 6.4, operasyon sıralarının artan sıralı olmasını sağlamaktadır. Eş. 6.5, öncelik ilişkileri kısıtıdır. Eş. 6.6 çevrim zamanı kısıtıdır. Eş. 6.7, Eş. 6.8 ve Eş. 6.9 görevlerin sıraya bağlı bitiş zamanlarını kontrol eder. Her i ve h görev çifti için, eğer h görevi i görevinin öncülü ise ve bu görevler aynı çift istasyona atanmış ise Eş. 6.7 aktif hale gelir, $t_i^f - t_h^f \geq t_i$. Eğer herhangi i ve p görev çifti arasında öncelik ilişkisi yok ise ve bu görevler aynı (j, k) istasyonuna atanmış ise, Eş. 6.8 ve Eş. 6.9 aktif hale gelir. Eğer i görevi h görevinden önce atandı ise Eş. 6.8 $t_p^f - t_i^f \geq t_p + \pi_{ip}$ halini alır. Aksi halde, Eş. 6.9 $t_p^f - t_i^f \geq t_p + \pi_{ip}$ haline gelir. Eş. 6.10 istasyon kısıtıdır. İstasyon (j, k) açılmış ise

U_{jk} bir değerini aksi halde sıfır değerini alacaktır. Eş. 6.11 ile hattın uzunluğu bulunmaktadır. Eğer bir eş istasyonun her iki tarafı kullanılıyorsa F_j bir değerini G_j sıfır değerini alır, sadece tek tarafı kullanılıyor ise F_j sıfır değerini G_j bir değerini alır. Toplam hat uzunluğu F_j ve G_j toplamına eşittir. Eş. 6.12 eğer aynı istasyon (j, k)'daki i ve h görevleri s ve $s+1$ pozisyonlarına atanmış ise z_{ihjk} bir değerini alacaktır. Eş. 6.13'te eğer i görevi istasyon (j, k)'daki operasyon sırasının en sonunda yer alıyorsa w_{ijk} bir değerini alacak, aksi halde sıfır değerini alacaktır. Eş. 6.14'te eğer istasyon (j, k)'da h görevi ilk sırada ve i görevi son sırada işlem görüyor ise z_{ihjk} bir değerini alacaktır. Eş. 6.15, i görevinin bitiş zamanının tamamlanma zamanından büyük veya eşit olmasını sağlamaktadır. Eş. 6.16 – Eş. 6.20 işaret kısıtlarıdır.

6.3. İstasyon Sayısı İçin Bir Alt Sınır Hesaplaması

Hazırlık zamanlı genel montaj hattı dengeleme probleminde istasyon sayısı için bir alt sınır hesaplaması Andrés ve ark. (2008) tarafından sunulmuştur. Bu alt sınır hesaplaması daha sonra Pastor ve ark. (2009) tarafından düzeltilmiştir. Bu bölümde hazırlık zamanlı genel montaj hattı dengeleme problemi için önerilen alt sınır hesaplamaları temel alınarak hazırlık zamanlı ÇMHD probleminde istasyon sayısı için bir alt sınır hesaplaması önerilmiştir. Önerilen alt sınır hesaplaması aşağıdaki gibidir:

Adım 1. Aşağıdaki gibi LB_0 'ı hesapla:

$$LTotal = \sum_{i \in A_L} t_i \quad (6.21)$$

$$RTotal = \sum_{i \in A_R} t_i \quad (6.22)$$

$$ETotal = \sum_{i \in A_E} t_i \quad (6.23)$$

$$Max = \text{enbuyuk} \left\{ \left\lceil \frac{LTotal}{ct} \right\rceil, \left\lceil \frac{RTotal}{ct} \right\rceil \right\} \quad (6.24)$$

$$LB_0 = \left\lceil 2 \cdot Max + \text{enbuyuk} \left\{ 0, \left\lceil \frac{ETotal - (Max \cdot ct - LTotal) - (Max \cdot ct - RTotal)}{ct} \right\rceil \right\} \right\rceil \quad (6.25)$$

Eğer $LB_0 = nt$ ise $LB = nt$ ve Adım 5'e git. $\gamma = 1$.

Adım 2. Aşağıdaki gibi LB_γ 'ı hesapla:

$$SU_\gamma^L = \begin{cases} \sum_{\tau_\eta \in ML} \tau_\eta & \text{eger } A_L \neq \{ \} \\ 0 & \text{aksihalde} \end{cases} \quad (6.26)$$

$$SU_\gamma^R = \begin{cases} \sum_{\tau_\eta \in MR} \tau_\eta & \text{eger } A_R \neq \{ \} \\ 0 & \text{aksihalde} \end{cases} \quad (6.27)$$

$$SU_\gamma^E = \begin{cases} \sum_{\tau_\eta \in ME} \tau_\eta & \text{eger } A_L = \{ \} \wedge A_R = \{ \} \\ 0 & \text{aksihalde} \end{cases} \quad (6.28)$$

$$SU_\gamma = SU_\gamma^L + SU_\gamma^R + SU_\gamma^E \quad (6.29)$$

$$LB_\gamma = \left\lceil 2 \cdot Max + \text{enbuyuk} \left\{ 0, \left\lceil \frac{ETotal + SU_\gamma - (Max \cdot ct - LTotal) - (Max \cdot ct - RTotal)}{ct} \right\rceil \right\} \right\rceil \quad (6.30)$$

$$q = \begin{cases} nt - LB_\gamma + 2 & \text{eger } A_L \neq \{ \} \wedge A_R \neq \{ \} \\ nt - LB_\gamma + 1 & \text{eger } A_L = \{ \} \vee A_R = \{ \} \end{cases} \quad (6.31)$$

Adım 3. Eğer $q \leq \gamma$ ise Adım 4'e git; aksi halde $\gamma = \gamma + 1$ ve Adım 2'e git.

Adım 4. $LB = LB_\gamma$.

Adım 5. Dur.

LB_0 , Hu ve ark. (2008) tarafından hazırlık zamanlarının dikkate alınmadığı ÇMHDP-I problemi için sunulan alt sınır hesaplamasını temsil etmektedir. Eş. 6.21 – Eş. 6.23 sırasıyla L tipi, R tipi ve E tipi görevlerin toplam işlem zamanlarını göstermektedir. Burada sıraya bağlı hazırlık zamanları dikkate alınmamaktadır. Eş. 6.24 ile teorik en küçük istasyon sayısı hesaplanmaktadır. E tipi görevler bu hesaplamada kullanılmamıştır, çünkü E tipi görevler diğer L tipi ve R tipi görevlerden kalan boş zamanlara atanacaktır. Eğer gerekli ise Eş. 6.25 ile E tipi görevler için yeni istasyonlar açılacaktır. Eş. 6.26 – Eş. 6.28 γ iterasyonundaki hazırlık zamanlarını hesaplamaktadır. E tipi görevler hem sağ taraftan hem sol taraftan atanabileceği için hazırlık zamanları ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Eş. 6.26 – Eş. 6.29 ile toplam hazırlık zamanı bulunmaktadır. Eş. 6.30’da hazırlık zamanları görev sürelerine eklenmektedir ve en düşük γ hazırlık zamanını içeren yeni teorik en küçük istasyon sayısı hesaplanmaktadır. Eş. 6.31 ile en küçük hazırlık sayısı hesaplanmaktadır. Eğer, sadece hattın tek tarafı kullanılırsa q , $nt - LB_\gamma + 1$ halini alır, aksi halde $nt - LB_\gamma + 2$ halini alır. Her iterasyonda, sadece en küçük γ hazırlık zamanı bir arttırılarak dikkate alınır. Eğer artış yapılamaz ise hesaplama sona erer.

6.4. Önerilen Çözüm Yaklaşımı

Bu bölümde, hazırlık zamanlı ÇMHD problemi için bir çözüm yaklaşımı olarak Arcus (1966) tarafından geliştirilen COMSOAL (*computer method of sequencing operations for assembly lines*) metodu kullanılmıştır. COMSOAL genellikle iyi çözümler bulan oldukça basit bir yaklaşımdır. Çok sayıda uygun çözüm üretir ve bunların arasından en iyi olanı seçer.

Her bir iterasyonda uygun çözüm elde edebilmek için şu prosedür izlenmektedir: önerilen yaklaşım ilk çift istasyon ile başlar. Mevcut sağ taraf ve sol taraf istasyonlarına atanabilecek görevlerin oluşturduğu bir atanabilir görevler listesi oluşturulur. Buradaki görevler istasyonlara rasgele seçilerek sırayla atanırlar. Eğer seçilen görev L tipi/R tipi görev ise sol/sağ tarafa atanır. Eğer E tipi görev ise her iki taraf dikkate alınır. Seçilen E tipi görevin en erken başlayabileceği taraf seçilir.

Eşitlik ortaya çıkarsa rasgele bir taraf seçilir. Her görev atamasından sonra atanabilir görevler kümesi güncellenir. Mevcut çift istasyon mümkün olduğunca yüklendikten sonra yeni bir çift istasyon açılır ve bütün görevlerin ataması yapılana kadar bu işlemler devam eder. Her iterasyon sonunda elde edilen amaç fonksiyonu değeri en iyi amaç fonksiyonu değeri ile karşılaştırılır ve en iyi sonuç rapor edilir. Önerilen yaklaşımın adım adım gösterimi aşağıdaki gibidir:

Adım 1. $iter = 1$

Adım 2. $NM = 1, NL = 0, NR = 0, s_L = 1, s_R = 1, SL_{NM}^L = 0, SL_{NM}^R = 0,$
 $SO_{NM}^L(s) = \{ \} \quad s=1,...,nt, SO_{NM}^R(s) = \{ \} \quad s=1,...,nt, TL_{NM}^L = \{ \}, TL_{NM}^R = \{ \}.$

Adım 3. Atanabilir görevler kümesini oluştur (AL) ($AL = \{i \mid (\text{all } p \in P(i) \text{ bir istasyona atanmış veya } P(i) = \{ \}) \text{ ve } i \text{ görevi henüz atanmamış}\}$).

Adım 4. Eğer $AL = \{ \}$ ise Adım 7'ye git.

Adım 5. AL 'den rasgele bir h görevi seç. Aşağıdakileri sağlayan ilk h görevini ata;

Adım 5.1. Eğer $h \in A_L$ ise,

Adım 5.1.1. Eğer $t_h + SL_{NM}^L + \pi_{SO_{NM}^L(s_L-1),h} > ct$ veya $t_h + t_r^f > ct \quad r \in P(h) \wedge r \in TL_{NM}^R$ ise Adım 6'ya git.

Adım 5.1.2. Eğer $SL_{NM}^L < t_h + t_r^f \left(t_r^f = \text{enbuyuk} \{ t_r^f \mid r \in P(h) \wedge r \in TL_{NM}^R \} \right)$ ve

$\pi_{SO_{NM}^L(s_L-1),h} \geq t_h + t_r^f \left(t_r^f = \text{enbuyuk} \{ t_r^f \mid r \in P(h) \wedge r \in TL_{NM}^R \} \right) - SL_{NM}^L$ ise

$t_h^f = t_h + SL_{NM}^L + \pi_{SO_{NM}^L(s_L-1),h}.$

Adım 5.1.3. Eğer $SL_{NM}^L < t_h + t_r^f \left(t_r^f = \text{enbuyuk} \{ t_r^f \mid r \in P(h) \wedge r \in TL_{NM}^R \} \right)$ ve $\pi_{SO_{NM}^L(s_L-1),h} < t_h + t_r^f \left(t_r^f = \text{enbuyuk} \{ t_r^f \mid r \in P(h) \wedge r \in TL_{NM}^R \} \right) - SL_{NM}^L$ ise $t_h^f = t_h + t_r^f \left(t_r^f = \text{enbuyuk} \{ t_r^f \mid r \in P(h) \wedge r \in TL_{NM}^R \} \right)$.

Adım 5.1.4. Eğer $SL_{NM}^L \geq t_h + t_r^f \left(t_r^f = \text{enbuyuk} \{ t_r^f \mid r \in P(h) \wedge r \in TL_{NM}^R \} \right)$ ise $t_h^f = t_h + SL_{NM}^L + \pi_{SO_{NM}^L(s_L-1),h}$.

Adım 5.1.5. Eğer $ct - t_h^f + t_{SO_{NM}^L(1)}^f - t_{SO_{NM}^L} - \pi_{h,SO_{NM}^L(1)} < 0$ ise Adım 6'ya git.

Adım 5.1.6. h görevini sol taraf istasyona ata; $TL_{NM}^L = TL_{NM}^L + \{h\}$, $SL_{NM}^L = t_h^f$, $SO_{NM}^L(s_L) = \{h\}$, $s_L = s_L + 1$ ve yeni atanabilir görevler kümesini oluşturmak için Adım 3'e git.

Adım 5.2. Eğer $h \in A_R$ ise,

Adım 5.2.1. Eğer $t_h + SL_{NM}^R + \pi_{SO_{NM}^R(s_R-1),h} > ct$ veya $t_h + t_r^f > ct$ $r \in P(h) \wedge r \in TL_{NM}^L$ ise Adım 6'ya git.

Adım 5.2.2. Eğer $SL_{NM}^R < t_h + t_r^f \left(t_r^f = \text{enbuyuk} \{ t_r^f \mid r \in P(h) \wedge r \in TL_{NM}^L \} \right)$ ve $\pi_{SO_{NM}^R(s_R-1),h} \geq t_h + t_r^f \left(t_r^f = \text{enbuyuk} \{ t_r^f \mid r \in P(h) \wedge r \in TL_{NM}^L \} \right) - SL_{NM}^R$ ise $t_h^f = t_h + SL_{NM}^R + \pi_{SO_{NM}^R(s_R-1),h}$.

Adım 5.2.3. Eğer $SL_{NM}^R < t_h + t_r^f \left(t_r^f = \text{enbuyuk} \{ t_r^f \mid r \in P(h) \wedge r \in TL_{NM}^L \} \right)$ ve $\pi_{SO_{NM}^R(s_R-1),h} < t_h + t_r^f \left(t_r^f = \text{enbuyuk} \{ t_r^f \mid r \in P(h) \wedge r \in TL_{NM}^L \} \right) - SL_{NM}^R$ ise $t_h^f = t_h + t_r^f \left(t_r^f = \text{enbuyuk} \{ t_r^f \mid r \in P(h) \wedge r \in TL_{NM}^L \} \right)$.

Adım 5.2.4. Eğer $SL_{NM}^R \geq t_h + t_r^f \left(t_r^f = \text{enbuyuk} \{ t_r^f \mid r \in P(h) \wedge r \in TL_{NM}^L \} \right)$ ise

$$t_h^f = t_h + SL_{NM}^R + \pi_{SO_{NM}^R(s_R-1),h}.$$

Adım 5.2.5. Eğer $ct - t_h^f + t_{SO_{NM}^R(1)}^f - t_{SO_{NM}^R} - \pi_{h,SO_{NM}^R(1)} < 0$ ise Adım 6'ya git.

Adım 5.2.6. h görevini sağ taraf istasyona ata; $TL_{NM}^R = TL_{NM}^R + \{h\}$, $SL_{NM}^R = t_h^f$, $SO_{NM}^R(s_R) = \{h\}$, $s_R = s_R + 1$ ve yeni atanabilir görevler kümesini oluşturmak için Adım 3'e git.

Adım 5.3. Eğer $h \in A_E$ ise,

Adım 5.3.1. h görevinin en erken başlayabileceği tarafı seç. Eğer başlama zamanları eşitse rasgele bir taraf seç. Eğer seçilen taraf sol ise Adım 5.1.1'e git, aksi halde Adım 5.2.1'e git.

Adım 6. Eğer atanabilir görevler listesinde sağ taraf veya sol taraf istasyonlardan birine atanamayacak görev varsa yeni bir çift istasyon aç. Eğer $TL_{NM}^L \neq \{\}$ ise $NL = NL + 1$. Eğer $TL_{NM}^R \neq \{\}$ ise $NR = NR + 1$. $NM = NM + 1$, $SL_{NM}^L = 0$, $SL_{NM}^R = 0$, $TL_{NM}^L = \{\}$, $TL_{NM}^R = \{\}$ ve Adım 3'e git.

Adım 7. Amaç fonksiyonunu hesapla: $NM + \varepsilon(NL + NR)$. Bir önceki iterasyonun amaç fonksiyonu ile karşılaştır ve en iyi çözümü güncelle.

Adım 8. Eğer $iter = iter_{max}$ ise Dur; aksi halde $iter = iter + 1$ ve Adım 2'ye git.

SL_{NM}^L ve SL_{NM}^R sırasıyla NM çift istasyonunun sol taraf ve sağ taraf istasyonlarının iş yüküdür. TL_{NM}^L ve TL_{NM}^R sırasıyla sol taraf ve sağ taraf istasyonlara atanan görevler kümesidir. $SO_{NM}^L(s)$ ve $SO_{NM}^R(s)$ sırasıyla sol taraf ve sağ taraf istasyonlara atanan görevlerin operasyon sırasıdır.

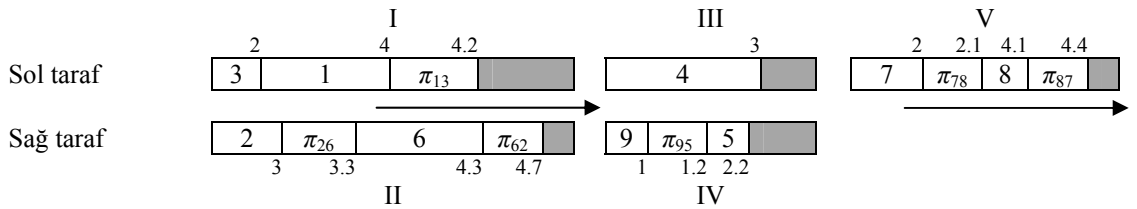
6.5. Örnek Problem Çözümü

Önerilen yaklaşımın çözüm sürecini açıklayabilmek için Kim ve ark. (2000)'den alınan küçük boyutlu bir örnek problem çözülmüştür. Sıraya bağlı hazırlık zamanları düzgün kesikli dağılıma uygun rasgele üretilmiştir $U[0, \lceil 0.5 \cdot \min_{i \in I} t_i \rceil]$. Çevrim zamanı beştir. Probleme ilişkin veriler Çizelge 6.1'de yer almaktadır. Önerilen yaklaşımın bir iterasyona ait çözüm süreci Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Örnek problem verileri

Görev	Hemen öncüller	Operasyon tarafı	Görev zamanları	Sıraya bağlı hazırlık zamanları								
				Görev								
				1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-	L	2	0	0.4	0.2	0.2	0	0.2	0.3	0.4	0.3
2	-	R	3	0.3	0	0.2	0.4	0.4	0.3	0.4	0.1	0.4
3	-	E	2	0	0.1	0	0.4	0.1	0.1	0.1	0.5	0.1
4	1	L	3	0.1	0.4	0.3	0	0.4	0.2	0.4	0.4	0.4
5	2	R	1	0.1	0.2	0.3	0.2	0	0.3	0.3	0.1	0
6	2,3	E	1	0.3	0.4	0.3	0.2	0.1	0	0.5	0.4	0.2
7	4,5	E	2	0.2	0.3	0.3	0	0.3	0.4	0	0.1	0.2
8	5	L	2	0.4	0.2	0.2	0.4	0.2	0.4	0.3	0	0.1
9	6	E	1	0	0.5	0.1	0.3	0.2	0.4	0.2	0.4	0

Çizelge 6.2'de görüldüğü gibi uygun bir çift taraflı montaj hattı dengesi üç çift istasyon ile elde edilmiştir. Görev atamaları şöyledir: $TL_1^L = \{1, 3\}$, $TL_1^R = \{2, 6\}$, $TL_2^L = \{4\}$, $TL_2^R = \{5, 9\}$ ve $TL_3^L = \{7, 8\}$. İstasyon sayısı beştir. Şekil 6.2'de çift taraflı montaj hattı dengesi gösterilmiştir.

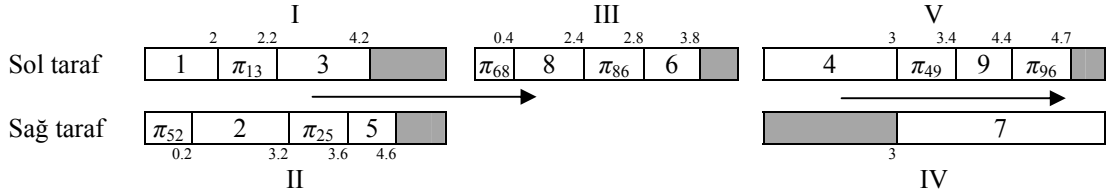


Şekil 6.2. Önerilen yaklaşımın bir iterasyonuna ait örnek çözümü

Çizelge 6.2. Önerilen yaklaşımın bir iterasyona ait çözüm süreci

AL	Seçilen görev	Görev atamaları
	Başla; $NM = 1$	
$\{1, 2, 3\}$	$2 \in A_R$	$3 < 5$ ise $TL_1^R = TL_1^R + \{2\}$ $t_2^f = 3, SL_1^R = 3, SO_1^R(1) = \{2\}$ AL 'yi güncelle
$\{1, 3, 5\}$	$3 \in A_E \rightarrow$ Sol taraf istasyonu seç. 3 görevi en erken başlayabilir.	$2 < 5$ ise $TL_1^L = TL_1^L + \{3\}$ $t_3^f = 2, SL_1^L = 2, SO_1^L(1) = \{3\}$ AL 'yi güncelle
$\{1, 5, 6\}$	$1 \in A_L$	$2 + 2 + 0 = 4 < 5$ ve $2 + (2 + 0) + 0.2 = 4.2 < 5$ ise $TL_1^L = TL_1^L + \{1\}$ $t_1^f = 4, SL_1^L = 4, SO_1^L(2) = \{1\}$ AL 'yi güncelle
$\{4, 5, 6\}$	$6 \in A_E \rightarrow$ Sağ taraf istasyonu seç. 6 en erken başlayabilir.	$1 + 3 + 0.3 = 4.3 < 5$ ve $1 + (3 + 0.3) + 0.4 = 4.7 < 5$ ise $TL_1^R = TL_1^R + \{6\}$ $t_6^f = 4.3, SL_1^R = 4.3, SO_1^R(2) = \{6\}$ AL 'yi güncelle
$\{4, 5, 9\}$	Hiçbir görev seçilemiyor. Yeni bir çift istasyon aç; $NM = 2$	
$\{4, 5, 9\}$	$4 \in A_L$	$3 < 5$ ise $TL_2^L = TL_2^L + \{4\}$ $t_4^f = 3, SL_2^L = 3, SO_2^L(1) = \{4\}$ AL 'yi güncelle
$\{5, 9\}$	$9 \in A_E \rightarrow$ Sağ taraf istasyonu seç. 9 en erken başlayabilir.	$1 < 5$ ise $TL_2^R = TL_2^R + \{9\}$ $t_9^f = 1, SL_2^R = 1, SO_2^R(1) = \{9\}$ AL 'yi güncelle
$\{5\}$	$5 \in A_R$	$1 + 1 + 0.2 = 2.2 < 5$ ve $1 + (1 + 0.2) + 0 = 2.2 < 5$ ise $TL_2^R = TL_2^R + \{5\}$ $t_5^f = 2.2, SO_2^R = 2.2, SO_2^R(2) = \{5\}$ AL 'yi güncelle
$\{7, 8\}$	Hiçbir görev seçilemiyor. Yeni bir çift istasyon aç; $NM = 3$	
$\{7, 8\}$	$7 \in A_E \rightarrow$ Sol taraf istasyonu seç.	$2 < 5$ ise $TL_3^L = TL_3^L + \{7\}$ $t_7^f = 2, SL_3^L = 2, SO_3^L(1) = \{7\}$ AL 'yi güncelle
$\{8\}$	$8 \in A_L$	$2 + 2 + 0.1 = 4.1 < 5$ ve $2 + (2 + 0.1) + 0.3 = 4.4 < 5$ ise $TL_3^L = TL_3^L + \{8\}$ $t_8^f = 4.1, SL_3^L = 4.1, SO_3^L(2) = \{8\}$ AL 'yi güncelle
$\{\}$ Dur		

Durdurma kriteri sağlanıncaya kadar önerilen yaklaşım yukarıdaki gibi işlemleri tekrarlar. Örnek problem ayrıca matematiksel model ile çözülmüştür. Elde edilen sonuç Şekil 6.3'te verilmiştir.



Şekil 6.3. Önerilen matematiksel modelin sonucu

6.6. Test Sonuçları ve Değerlendirme

Önerilen yaklaşımın ve önerilen matematiksel modelin etkinliğini test etmek amacıyla yine P9, P12, P16, P24, P65, P148 ve P205 test problemleri çözülmüştür. Problemlere ait orijinal veriler değiştirilmemiştir. İki farklı seviyede düzgün kesikli dağılıma uygun hazırlık zamanı üretilmiştir: düşük hazırlık zamanı değişkenliği için $U[0, \lceil 0.25 \cdot \min_{i \in I} t_i \rceil]$ ve yüksek hazırlık zamanı değişkenliği için $U[0, \lceil 0.75 \cdot \min_{i \in I} t_i \rceil]$. İterasyon limiti görev sayısı*10 olarak alınmıştır. Önerilen yaklaşım Visual Basic 6.0 programlama dili kullanılarak kodlanmıştır ve bütün test problemleri Pentium IV 3.0 GHz PC ve 512 MB RAM ile çözülmüştür. Her problem üç defa çözülmüş ve en iyi sonuçlar ile ortalama hesaplama süreleri rapor edilmiştir.

Önerilen matematiksel model GAMS matematiksel programlama paketi ile çözülmüştür. Hesaplama süresi 10000 saniye ile sınırlandırılmıştır. Problemin karmaşıklığından dolayı sadece P9 problemine çözüm bulunabilmiştir. Andrés ve ark. (2008) benzer bulgular rapor etmişlerdir. Çizelge 6.3, P9 test problemi için elde edilen sonuçları göstermektedir. Hazırlık zamansız sonuçlar Bölüm 4'ten alınmış ve hazırlık zamanlarının etkisini göstermek için kullanılmıştır.

Çizelge 6.3. P9 problemi sonuçları

Problem	Çevrim zamanı	MIP (Hazırlık zamansız)	Hazırlık zamanı değişkenlik düzeyi	LB	MIP		2-COMSOAL/S	
					NM[NS]	CPU time (s)	NM[NS]	CPU (s)
P9	5	4	Düşük	4	3[5]	2901.70	3[5]	0.02
			Yüksek	4	3[5]	<10000	3[5]	
	6	3	Düşük	3	2[4]	323.11	2[4]	0.02
			Yüksek	4	2[4]	520.83	2[4]	

Çizelge 6.3'te görüldüğü gibi hazırlık zamanları istasyon sayısını arttırmıştır. Önerilen yaklaşım çok daha kısa sürede matematiksel modelin sonuçlarına ulaşabilmiştir. Önerilen yaklaşım ayrıca diğer test problemleri ile test edilmiştir. Matematiksel model ile bu problemlerin sonuçlarına ulaşamamıştır. Bu yüzden önerilen yaklaşım *LB* ve problemlerin literatürden alınan hazırlık zamansız sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 6.4'te test sonuçları verilmiştir.

Çizelge 6.4'de verilen sonuçlara göre önerilen yaklaşım oldukça başarılı sonuçlar elde etmiştir. Önerilen yaklaşım ile BWS ((2-COMSOAL/S - BWS) / 2-COMSOAL/S) ve önerilen yaklaşım ile *LB* ((2-COMSOAL/S - *LB*) / 2-COMSOAL/S) istasyon sayısı bakımından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Düşük hazırlık zamanı değişkenliği sonuçlarına bakıldığında önerilen yaklaşım ile BWS arasında ortalama %8.67 farklılık bulunmaktadır. *LB* ile ise ortalama %11.24'tür. Yüksek hazırlık zamanı değişkenliğinde ise BWS ile %12.69 ve *LB* ile %14.35'dir. Elde edilen bu sonuçlar önerilen yaklaşımın performansının yeterli olduğunu göstermektedir. BWS, çözülen problemlerin hazırlık zamanı dikkate alınmadan elde edilen sonuçlarının literatürdeki en iyi değerlerini temsil etmektedir. Önerilen yaklaşım ile elde edilen istasyon sayılarının BWS değerine çok yakın değerler aldığı görülmektedir. Hazırlık zamanının dikkate alınması ile istasyon sayısı artacağından elde edilen sonuçlar oldukça anlamlıdır. Martino ve Pastor (2009) hazırlık zamanlı geleneksel düz montaj hattı dengeleme problemi için elde ettiği sonuçlar ile en iyi sonuçlar arasında ortalama %14.96 farklılık olduğunu rapor etmiştir. Ayrıca çalışmasında elde edilen sonuçların Andrés ve ark. (2008) tarafından elde edilen sonuçlardan başarılı olduğunu vurgulamışlardır. ÇMHD problemlerinin geleneksel düz montaj hattı dengeleme problemlerinden daha zor bir yapıya sahip

olduğu göz önüne alındığında bu çalışmada elde edilen sonuçların başarılı olduğu söylenebilir. Önerilen yaklaşımın hesaplama süresi 0.05-1112.99 aralığında bulunmuştur.

Çizelge 6.4. Test sonuçları

Problem	ct	BWS	Hazırlık zamanı değişkenlik düzeyi							
			Düşük				Yüksek			
			LB	NM[NS]	BWS'den %Fark	LB'den %Fark	LB	NM[NS]	BWS'den %Fark	LB'den %Fark
P12	5	6	5	4[7]	14.29	28.57	6	4[8]	25.00	25.00
	6	5	5	3[6]	16.67	16.67	5	3[6]	16.67	16.67
	7	4	4	3[5]	20.00	20.00	4	3[5]	20.00	20.00
	8	4	4	2[4]	0.00	0.00	4	3[5]	20.00	20.00
P16	16	6	6	4[6]	0.00	0.00	6	4[7]	14.29	14.29
	19	5	5	3[6]	16.67	16.67	5	3[6]	16.67	16.67
	22	4	4	3[5]	20.00	20.00	4	3[5]	20.00	20.00
P24	20	8	7	4[8]	0.00	12.50	8	5[9]	11.11	11.11
	25	6	6	4[7]	14.29	14.29	6	4[7]	14.29	14.29
	30	5	5	3[6]	16.67	16.67	5	3[6]	16.67	16.67
	35	4	5	3[5]	20.00	0.00	5	3[5]	20.00	0.00
P65	40	4	4	2[4]	0.00	0.00	4	3[5]	20.00	20.00
	326	16	16	9[18]	11.11	11.11	16	9[18]	11.11	11.11
	381	14	14	8[15]	6.67	6.67	14	8[16]	12.50	12.50
	435	12	12	7[13]	7.69	7.69	12	7[14]	14.29	14.29
	490	11	11	6[12]	8.33	8.33	11	6[12]	8.33	8.33
P148	544	10	10	6[11]	9.09	9.09	10	6[11]	9.09	9.09
	255	21	21	11[22]	4.55	4.55	21	11[22]	4.55	4.55
	306	17	17	10[19]	10.53	10.53	17	10[19]	10.53	10.53
	357	15	15	8[16]	6.25	6.25	15	8[16]	6.25	6.25
	408	13	13	7[14]	7.14	7.14	13	7[14]	7.14	7.14
	459	12	12	7[13]	7.69	7.69	12	7[14]	14.29	14.29
P205	510	11	11	6[12]	8.33	8.33	11	6[12]	8.33	8.33
	1133	21	21	12[24]	12.50	12.50	21	12[24]	12.50	12.50
	1322	18	18	11[21]	14.29	14.29	18	11[22]	18.18	18.18
	1510	17	16	9[18]	5.56	11.11	16	10[19]	10.53	15.79
	1699	15	14	8[16]	6.25	12.50	14	9[17]	11.76	17.65
	1888	14	13	8[15]	6.67	13.33	13	8[16]	12.50	18.75
	2077	13	12	7[14]	7.14	14.29	12	7[14]	7.14	14.29
	2266	12	11	7[13]	7.69	15.38	11	7[13]	7.69	15.38
	2454	12	10	6[12]	0.00	16.67	10	6[12]	0.00	16.67
	2643	11	9	6[11]	0.00	18.18	9	6[12]	8.33	25.00
	2832	10	9	5[10]	0.00	10.00	9	6[11]	9.09	18.18

7. SONUÇ

Çift taraflı montaj hatları, montaj hattının her iki tarafından montaj işlemlerinin yapılabildiği özellikle büyük boyutlu ürünlerin üretilmesinde kullanılmaktadır. Literatürde çift taraflı montaj hattı dengeleme üzerine çok az sayıda çalışma yapılmıştır. Bu tez çalışmasında, çift taraflı montaj hattı dengeleme problemi için bir karma tamsayılı matematiksel programlama modeli önerilmiştir. Önerilen matematiksel model verilen bir çevrim zamanı için çift istasyon sayısını öncelikli amaç olarak, istasyon sayısını ikincil amaç olarak en küçüklemektedir. Literatürde, bu konu ile ilgili, matematiksel model olarak, verilen eş istasyon sayısı için çevrim zamanını en küçükleme amacını taşıyan bir çalışma yapılmasına rağmen bu tezde dikkate alınan amaçlar ile ilgili bir çalışma yapılmamıştır. Ayrıca özellikle büyük boyutlu problemler için bir tabu araması algoritması önerilmiştir. Önerilen yaklaşım eş zamanlı olarak hattın etkinliğini en büyükmekte ve düzgünlük indeksini en küçüklemektedir. Önerilen matematiksel model ve tabu araması yaklaşımı test problemleri kullanılarak performansları literatürdeki diğer yaklaşımlarla karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Test sonuçlarına göre önerilen tabu araması algoritması etkili sonuçlar vermektedir. Matematiksel model ile sadece küçük boyutlu problem seti çözülebilmektedir.

Birçok gerçek hayat probleminde etkili sonuçlar alabilmek için iki veya daha fazla çelişen amacın birlikte düşünülmesi gerekmektedir. Bazı amaçlar karar vericiler tarafından kesin ve belirli değerlerle rahatlıkla tanımlanabilirken, bazı amaçlar kesin ve belirli değerlerle tanımlanamazlar. Bu tez çalışmasında çift taraflı montaj hattı dengelemede çok kriterli karar verme ele alınmıştır. Karar vericiler tarafından kesin olarak belirlenebilen amaçlar için bir karma tamsayılı amaç programlama modeli ve karar vericiler tarafından kesin olarak belirlenemeyen amaçlar için bir bulanık karma tamsayılı amaç programlama modeli önerilmiştir. Önerilen çok kriterli karar verme yaklaşımlarında üç amaç dikkate alınmıştır: çift istasyon sayısı, çevrim zamanı ve istasyon başına düşen görev sayısı. Amaç programlama modelleri örnek bir problem üzerinde test edilmiş, geçerlilikleri kanıtlanmıştır. Test sonuçlarına göre önerilen

amaç programlama modelleri karar vericilere karşılaşılabilecek çeşitli durumlar için esneklik sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasında ayrıca hazırlık zamanlı çift taraflı montaj hatları ele alınmış ve problemin tanımı yapılmıştır. Gerçek hayat uygulamalarında, aynı istasyonda yapılan görevler dizisi içerisinde bir görev tamamlandıktan sonra kendisinden hemen sonra gelen görevin işlem zamanını hazırlık gerektirebileceğinden dolayı etkileyebilir. Problem için bir karma tamsayılı matematiksel programlama modeli ve sezgisel bir algoritma önerilmiştir. Test problemleri kullanılarak önerilen matematiksel model ve sezgisel yaklaşım test edilmiştir. Test sonuçlarına göre önerilen çözüm yaklaşımları etkili sonuçlar vermiştir.

Bu tez kapsamında ele alınan problemler gerçek hayatta büyük boyutlu ürünlerin üretildiği birçok sektörde sıklıkla karşılaşılan problemler olup çözümleriyle ekonomik katkı elde edilecektir. Özellikle, otomotiv sektöründe stratejik seviyede karşılaşılan bu problemlerin çözümünde yapılacak küçük iyileştirmelerle bile işletmeye oldukça yüksek kazanımlar sağlanabilecektir. Dolayısıyla çalışmanın ülke ekonomisine de katkısı olacaktır. Bu tez kapsamında ilk defa;

- ÇMHDP-I için bir matematiksel model,
- ÇMHDP-I için bir tabu araması algoritması,
- ÇMHD’de amaç programlama modeli,
- ÇMHD’de bulanık amaç programlama modeli,
- Hazırlık zamanlı ÇMHD problemi için bir matematiksel model ve sezgisel çözüm yaklaşımı önerilmiştir.

Gelecekte yapılabilecek bazı çalışmalar bir sonraki bölümde detaylı olarak ele alınmıştır.

8. İLERİ ÇALIŞMA ÖNERİLERİ

Bu tezde çift taraflı montaj hatları ele alınmış ve gerek pratik açıdan gerekse teorik açıdan henüz çözüm bulunamamış bazı problemlere çözüm yaklaşımları önerilmiştir. Bununla birlikte halen çok sayıda açıklık getirilmesi gereken problem bulunmaktadır. Bu bölümde, ÇMHD ile ilgili gelecekte yapılabilecek bazı çalışmalara yer verilmiştir. Bu çalışma konuları ile ilgili ön çalışmalar yapılmıştır. Önerilen matematiksel modellerin etkinliğinin artırılması amacıyla, çift istasyon sayısı için alt sınır ve üst sınır hesaplamaları önerilmiştir. Bununla birlikte ÇMHD problemi düğüm paketleme ve sırt çantası problemlerine gevşetilerek, bu problemler için literatürde önerilen mümkün eşitsizlikler ÇMHD problemi için kullanılmıştır. Önerilen matematiksel modellerin değişken ve kısıt tanımlamaları tekrar düzenlenerek bazı MHD problemlerine çözüm aranmıştır. Gelecekte burada belirtilen öneriler doğrultusunda çok daha karmaşık problemlerin çözülebileceği düşünülmektedir.

8.1. Çift İstasyon Sayısı

8.1.1. Çift istasyonlara en erken atama ve en geç atama

Görevlerin çift istasyonlara en erken ve en geç atama hesaplamaları için aşağıdaki eşitlikler önerilmiştir.

$$es_i^L = \sum_{h \in Pa(i) \wedge h \in A_L} t_h \quad \forall i \in I \quad (8.1)$$

$$es_i^R = \sum_{h \in Pa(i) \wedge h \in A_R} t_h \quad \forall i \in I \quad (8.2)$$

$$es_i^E = \sum_{h \in Pa(i) \wedge h \in A_E} t_h \quad \forall i \in I \quad (8.3)$$

$$es_i^{\max} = \text{enbuyuk} \left\{ \frac{es_i^L}{ct}, \frac{es_i^R}{ct} \right\} \quad \forall i \in I \quad (8.4)$$

$$ES(i) = \left\lceil \frac{t_i + es_i^{\max} \cdot ct + \text{enbuyuk}\{0, (es_i^E - \lceil es_i^{\max} \rceil ct - es_i^L) - (\lceil es_i^{\max} \rceil ct - es_i^R)\}}{ct} \right\rceil \forall i \in I \quad (8.5)$$

$$ls_i^L = \sum_{h \in Sa(i) \wedge h \in A_L} t_h \quad \forall i \in I \quad (8.6)$$

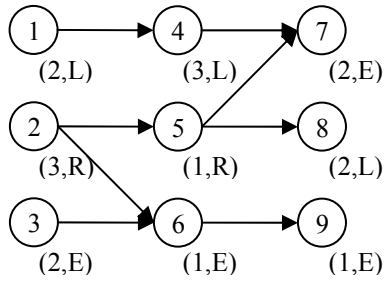
$$ls_i^R = \sum_{h \in Sa(i) \wedge h \in A_R} t_h \quad \forall i \in I \quad (8.7)$$

$$ls_i^E = \sum_{h \in Sa(i) \wedge h \in A_E} t_h \quad \forall i \in I \quad (8.8)$$

$$ls_i^{\max} = \text{enbuyuk} \left\{ \frac{ls_i^L}{ct}, \frac{ls_i^R}{ct} \right\} \quad \forall i \in I \quad (8.9)$$

$$LS(i) = nms + 1 - \left\lceil \frac{t_i + ls_i^{\max} \cdot ct + \text{enbuyuk}\{0, (ls_i^E - \lceil ls_i^{\max} \rceil \cdot ct - ls_i^L) - (\lceil ls_i^{\max} \rceil \cdot ct - ls_i^R)\}}{ct} \right\rceil \quad (8.10)$$

Örnek hesaplama için aşağıdaki 9 görevli problemi ele alalım [Kim ve ark., 2000]. Çevrim zamanı ve nms üç olsun. Eş. 8.1-8.10'da verilen hesaplamalar ile Çizelge 8.1 elde edilir.



Şekil 8.1. Dokuz görevli örnek bir problem

Çizelge 8.1. Örnek problemde görevlerin atanabileceği çift istasyonlar

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$ES(i)$	1	1	1	2	2	2	3	2	2
$LS(i)$	2	2	2	2	3	3	3	3	3

Çizelge 8.1'de verilen sonuçlar ile ilgili örnek hesaplama için 9. görevi ele alalım. Hesaplamalar aşağıdaki gibi yapılır:

$$es_9^L = 0; es_9^R = 3; es_9^E = 3; es_9^{\max} = 1 \text{ ve}$$

$$ES(9) = \left\lceil \frac{1 + 1 \cdot 3 + \text{enbuyuk}\{0, (3 - (1 \cdot 3 - 0)) - (1 \cdot 3 - 3)\}}{3} \right\rceil = 2$$

$$ls_9^L = 0; ls_9^R = 0; ls_9^E = 0; ls_9^{\max} = 0$$

$$LS(9) = 3 + 1 - \left\lceil \frac{1 + 0 \cdot 3 + \text{enbuyuk}\{0, (0 - (0 \cdot 3 - 0)) - (0 \cdot 3 - 0)\}}{3} \right\rceil = 3$$

Elde edilen sonuçlar kullanılarak her bir görev için aşağıdaki çift istasyon aralıkları belirlenebilir.

$$IS(i) = [ES(i), LS(i)] \quad \forall i \in I \quad (8.11)$$

Böylece Bölüm 4'te verilen karma tamsayılı matematiksel programlama modeli aşağıdaki gibi yazılabilir.

Amaç fonksiyonu:

Eş. 4.11

Kısıtlar:

Eş. 4.4 – Eş. 4.10, Eş. 4.12 – Eş. 4.15 ve

$$\sum_{j \in IS(i)} \sum_{k \in K(i)} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in I \quad (8.12)$$

$$\sum_{g \in IS(h)} \sum_{k \in K(h)} g \cdot x_{hgk} - \sum_{j \in IS(i)} \sum_{k \in K(i)} j \cdot x_{ijk} \leq 0 \quad \forall i \in I - P_0, h \in P(i), LS(h) \geq ES(i) \quad (8.13)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in IS(i), k \in K(i) \quad (8.14)$$

Matematiksel modelde çift istasyon aralıklarının kullanılması ile yukarıda verilen dokuz görevli örnek problem için; Bölüm 4, Eş. 4.2'de 9 kısıt ve Eş. 4.8'de 39

değişken yer alırken, Eş. 8.12’de dokuz kısıt ve Eş. 8.14’te 23 değişken yer almaktadır. Bununla birlikte Eş. 4.3’te sekiz kısıt bulunurken Eş. 8.13’te yedi kısıt bulunmaktadır.

8.1.2. Çift istasyon sayısı için bir alt sınır hesaplaması

Görevlerin en erken ve en geç atanacakları çift istasyon aralığı hesaplamaları kullanılarak çift istasyon sayısı için etkili bir alt sınır hesaplaması yapılabilir. Bunun için başlangıç bir çift istasyon sayısı ile $ES(i)$ ve $LS(i)$ hesaplanır. Çift istasyon sayısı 1 azaltılarak $LS(i)$ hesaplanır. Eğer herhangi bir görev için $ES(i) > LS(i)$ ise bir önceki çift istasyon sayısı alt sınır olarak alınır. Bütün görevler için $ES(i) \leq LS(i)$ ise çift istasyon sayısı 1 azaltılarak yine $L(i)$ hesaplanır. Örnek hesaplama için yukarıda verilen dokuz görevli problemi ele alalım. Başlangıç çift istasyon sayısı üç olarak alınmış ve $E(i)$ ve $L(i)$ hesaplamaları Çizelge 8.1’de verilmiştir. Çift istasyon sayısı 1 birim azaltılarak 2 çift istasyon sayısı için Çizelge 8.2’de verilen sonuçlar elde edilir.

Çizelge 8.2. Yeni çift istasyon aralıkları

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$ES(i)$	1	1	1	2	2	2	3	2	2
$LS(i)$	1	1	1	1	2	2	2	2	2

Çizelge 8.2’de görüldüğü gibi $ES(4) > LS(4)$ ve $ES(7) > LS(7)$ olduğu için hesaplama sonlandırılır. Bu problemde çift istasyon sayısı alt sınırı üç’tür.

8.2. Mümkün Eşitsizlikler

8.2.1. Düğüm paketleme problemine gevşetme

Yönlendirilmemiş bir $G = (V, E)$ grafiindeki düğüm paketi, bitişik çiftleri içermeyen en büyük eleman sayısının düğüm kümesidir. Burada V düğüm kümesini, E kenar kümesini ifade eder. Düğüm paketle probleminin (DPP) matematiksel formülasyonu aşağıdaki gibidir.

Amaç fonksiyonu:

$$\text{EnBüyük } \sum_{v \in V} x_v \quad (8.15)$$

Kısıtlar:

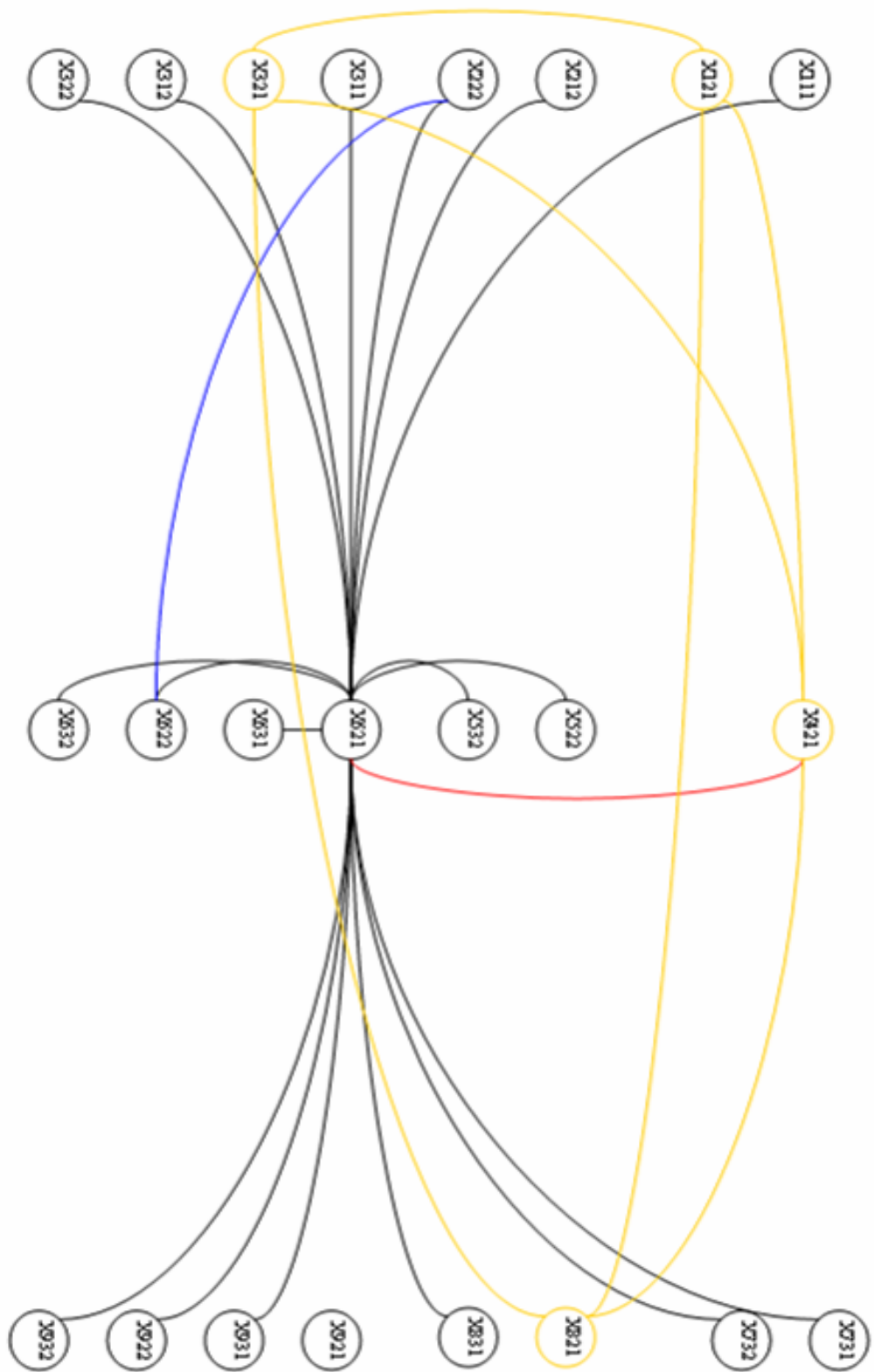
$$x_u + x_v \leq 1 \quad \forall \{u, v\} \in E \quad (8.16)$$

$$x_v \in \{0,1\} \quad \forall v \in V \quad (8.17)$$

Eş. 8.15 ortak bir kenarı kullanan iki düğümün aynı anda seçilmemesini sağlar. V 'deki her bir düğümü bir karar değişkeni x_{ijk} olarak kabul edelim. Bu durumda V 'deki düğüm sayısı karar değişkeni sayısı (D) kadar olur. En erken atama ve en geç atama hesaplamalarını kullanarak karar değişkenleri-düğümmler arasında çizgiler çizerek düğümmleri birleştirelim. Her bir çizgi aynı anda aynı istasyona (sağ veya sol) atanamayacak görevlerin karar değişkenleri arasında olur. Diğer bir deyişle aynı anda 1 olmaması gereken-aynı pakette olmaması gereken karar değişkenleri arasında çizgiler çizilir. Bu durumda görev atamaları düğüm paketleme problemi haline gelir. Buradan probleme bir gevşetme sağlanmış olur. 9 görevli problemde 6. görevin solu için Şekil 8.2'deki graf oluşturulur. Bu her bir görev için yapılır.

Düğümmler birleştirilirken atama kısıtlarına, çevrim zamanı kısıtına, öncelik ilişkileri kısıtına ve operasyon yönü kısıtına dikkat edilmelidir. Öncelik ilişkileri kısıtı için aşağıdaki eşitsizlik kullanılabilir. $i \in P_a(p)$, $h \in P_a(p)$ ve $h \in S_a(p)$ olmak üzere;

$$\gamma_{ip}^L = \left\{ \frac{\sum_{h \in P_a(p) \wedge h \in S_a(i) \wedge h \in A_L} t_h}{ct} \right\} \quad (8.18)$$



Şekil 8.2. Altıncı görevin solu için oluşturulan graf

$$\gamma_{ip}^R = \left\{ \frac{\sum_{h \in P_a(p) \wedge h \in S_a(i) \wedge h \in A_R} t_h}{ct} \right\} \quad (8.19)$$

$$\gamma_{ip}^E = \left\{ \frac{\sum_{h \in P_a(p) \wedge h \in S_a(i) \wedge h \in A_E} t_h}{ct} \right\} \quad (8.20)$$

$$\gamma_{ip}^{\max} = \{\gamma_{ip}^L, \gamma_{ip}^R\} \quad (8.21)$$

$$\gamma_{ip} \geq \left\lceil \frac{t_i + t_p + \gamma_{ip}^{\max} \cdot ct + \text{enbuyuk}\{0, (\gamma_{ip}^E - \lceil \gamma_{ip}^{\max} \rceil \cdot ct - \gamma_{ip}^L) - (\lceil \gamma_{ip}^{\max} \rceil \cdot ct - \gamma_{ip}^R)\}}{ct} \right\rceil - 1 \quad (8.22)$$

yani i ve p görevleri arasındaki çift istasyon sayısı farkı en az γ_{ip} kadar olur.

$\gamma_{26} = \lceil (3 + 1 + 0 + 0)/3 \rceil - 1 = 1$ olduğu için 6. görev 2. görev ile aynı pakette yer alamaz. Çevrim zamanı kısıtı 4. görev ile ihlal edildiği için 4. görev ile aynı pakette yer alamaz.

D kadar karar değişkeni için ÇMHD probleminin konveks çözüm uzayında bütün mümkün çözümleri için politopu aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$P = \text{conv}\{x \in \mathfrak{R}^D : \text{Es. 4.4} - \text{Es. 4.7, Es. 4.9, Es. 4.10, Es. 4.12} - \text{Es. 4.15, Es. 8.12} - \text{Es. 8.14}\} \quad (8.23)$$

Yukarıda verilen DPP probleminin politopu ise aşağıdaki gibidir:

$$PP = \text{conv}\{x \in \mathfrak{R}^D : x_u + x_v \leq 1, \forall (u, v) \in E, x_v \in \{0, 1\}, \forall v \in V\} \quad (8.24)$$

Daha önce ÇMHD probleminin her bir karar değişkenini DPP’de bir düğüme karşılık geldiğini belirtmiştik yani $x_u = x_{ijk}$ ’dir. Bu durumda PP ’de ÇMHD problemi için mümkün-kısıtları sağlayan çözümler için düğüm paketleri, kısıtları sağlamayan çözümler için düğüm paketleri ve boş düğüm paketleri vardır. Bu yüzden $P \subset PP$ ’dir.

Bir $G = (V, E)$ grafindaki her biri birbirleriyle bağlantılı her bir düğüm kümesine klik (CL) denir. E 'deki her bir düğüm çifti bir klik oluşturmakla beraber bu iki düğüm ile bağlı başka bir düğüm var ise bu düğüm kliğin üçüncü elemanı olarak kümenin içindedir. Bütün düğümlerin her biri diğeriyle bağlantılı ise buna tam klik denir (n düğümün her birinde $(n-1)$ bağlantı var ise). Buna göre DPP problemi için klik eşitsizliği aşağıdaki gibidir:

$$\sum_{v \in K_c} x_v \leq 1 \quad \forall c \in CL \quad (8.25)$$

c ; klik indeksi, K_c ; V 'de klik oluşturan düğüm seti.

Eş. 8.25 PP 'nin bir kesitini belirtir. Bu eşitsizlikten yola çıkılarak aynı çift istasyonun aynı operasyon yönüne atanabilecek (j,k) fakat öncelik ilişkisi ve çevrim zamanı kısıtından dolayı en fazla bir görevin atanabileceği ve bu yüzden aralarında klik oluşturan düğümler için aşağıdaki istasyon kliği yazılabilir. Örneğin X121-X421-X821-X321:

$$\sum_{i \in K_{jk}} x_{ijk} \leq 1 \quad \forall jk \in CL, k \in K(i), j \in S(i) \quad (8.26)$$

Eş. 8.26 P için mümkün bir eşitsizliği ifade eder.

Her bir görev çifti i ve h için $i \in P_a(h)$ ve $\text{enbuyuk}\{ES(i)+1, ES(p)+\gamma_{ip}-1\} \leq s' \leq \text{enkucuk}\{LS(i), LS(p)-\gamma_{ip}\}$ olmak üzere P için aşağıdaki mümkün eşitsizlik yazılabilir.

$$\sum_{j=s'}^{LS(i)} \sum_{k \in K(i)} x_{ijk} + \sum_{j=ES(p)}^{s'+\gamma_{ip}-1} \sum_{k \in K(p)} x_{ijp} \leq 1 \quad (8.27)$$

Bu mümkün eşitsizlik ile eğer p görevi $s' + \gamma_{ip} - 1$ istasyonuna kadar atanmadıysa i görevi s' 'den sonra gelen istasyonlara atanabilir.

8.2.2. Sırt çantası problemine gevşetme

0-1 sırt çantası probleminin (SCP) matematiksel modeli aşağıdaki gibidir.

Amaç fonksiyonu:

$$\text{EnBüyük } \sum_{v \in V} p_v \cdot x_v \quad (8.28)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{v \in V} w_v \cdot x_v \leq b \quad (8.29)$$

$$x_v \in \{0,1\} \quad \forall v \in V \quad (8.30)$$

Yine burada da her bir karar değişkenini sırt çantası problemindeki karar değişkenleri olarak düşünersek $x_v = x_{ijk}$ Eş. 8.29'da verilen kapasite kısıtını çevrim zamanı kısıtı gibi ele alabiliriz. SCP'nin politopu aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$PPP = \text{conv} \left\{ x \in \mathbb{R}^D : \sum_{v \in V} w_v \cdot x_v \leq b, x_v \in \{0,1\}, \forall v \in V \right\} \quad (8.31)$$

SCP'de eğer C_a PPP'de en küçük bağımlı kümeleri ifade etmek üzere aşağıdaki mümkün eşitsizlik PPP için yazılabilir.

$$\sum_{v \in C_a} x_v \leq |C_a| - 1 \quad (8.32)$$

ÇMHD problemi için bu mümkün eşitsizlik şöyle ifade edilebilir: Aynı istasyona (j,k) atabilecek görevler kümesi $i \in AGK(j,k)$ içerisinde (görevler kümesi içerisindeki görevler görev zamanları dikkate alınarak büyükten küçüğe doğru sıralanır) çevrim zamanını ilk ihlal eden görev zamanları toplamında yer alan görevler bir en küçük bağımlı kümeyi oluşturur ve aşağıdaki mümkün eşitsizlik P için geçerlidir. Konu ile ilgili Pinnoi ve Wilhelm (1997; 1998; 2000)'in çalışmalarına bakılabilir.

$$\sum_{i \in C_{jk}} t_i \cdot x_{ijk} \leq |C_{jk}| - 1 \quad C_{jk} \subseteq AGK(j,k), k \in K(i), j \in S(i) \quad (8.33)$$

8.3. Paralel İş Alanları

Bir istasyonda birden fazla operatörün eş zamanlı çalışabilmesine olanak sağlanmaktadır. Aynı istasyonda yer alan operatörler, görevlerin öncelik ilişkileri ve tamamlanma zamanları dikkate alınarak oluşturulan çizelgeler ile montaj işlemlerini yaparlar. Örneğin bir otomobil için herhangi bir istasyonda dört farklı iş alanı oluşturulabilir (sağ-ön (R-F), sağ-arka (R-B), sol-ön (L-F), sol-arka (L-B), sağ veya sol-ön (E-F), sağ veya sol-arka (E-B)).

Çift taraflı montaj hatlarında sadece iki iş alanı yer almaktadır. Bölüm 4'te önerilen matematiksel modelin ikiden fazla iş alanı oluşturacak şekilde yeniden düzenlenmesinde sadece k ($k = 1, 2$) indisi ile tanımlanan hattın sağ tarafı ve hattın sol tarafı ifadelerinin değiştirilmesi gerekmektedir. Dört iş alanı için $k = 1, 2, 3, 4$ şeklinde tanım yapılmalıdır. Yapılan bu değişiklik görev montaj tarafı kısıtlarına da yansıtılmalıdır (örneğin 1. görev hattın R-F tarafında gibi). Aşağıdaki şekillerde matematiksel modelin esnekliği kullanılarak $k = 1, 2, 3, 4$ için yapılabilecek bazı montaj pozisyonları verilmiştir.

L	1	2		1			1	2	3	4			1		
R	3	4		2	3	4							2	3	4

Şekil 8.3. Paralel dört iş alanı için bazı montaj pozisyonları

Konu ile ilgili literatürde iki çalışma vardır. Becker ve Scholl (2009) çalışmalarında çift taraflı montaj hatlarını da dikkate almışlardır. Bir matematiksel model ve bir dal-sınır algoritması sunulmuştur. Dimitriadis (2006) tek taraflı montaj hatlarında bir istasyonda birden fazla operatörün birbirlerine engel olmayacak şekilde bağımsız çalışması durumunu ele almıştır. Matematiksel model önerilmemiş, bir sezgisel çözüm prosedürü önerilmiştir. Operatör sayısı en küçükleme ile birlikte hattın uzunluğunun en küçükleme de ele alınmıştır.

8.4. Montaj Pozisyonu Yüksekliği

Özellikle büyük boyutlu ürünlerde bazı görevler ürünün yüksek kısımlarında diğerleri ise alçak kısımlarında yapılır. Görevler yüksekte (U) yapılanlar ve alçakta (D) yapılanlar şeklinde sınıflandırılır.

Çift taraflı montaj hatlarında bu görevlerin montaj pozisyonları, hattın solunda yüksekte (L-U), solunda alçakta (L-D), sağında yüksekte (R-U), R-D, E-U ve E-D olarak verilir. Yine sadece k indisinin yeniden düzenlenmesiyle matematiksel model bu probleme adapte edilebilir ($k = 1, 2, \dots, V$). Şöyleki $k = 1, 2, 3, 4$ alındığında $k = 1$: L-U, $k = 2$: L-D, $k = 3$: R-U, $k = 4$: R-D, $k = 1,3$: E-U, $k = 2,4$: E-D.

L	1		1
	2		2
R	3		3
	4		4

Şekil 8.4. Çift taraflı montaj hatların montaj pozisyon yükseklikleri

Yine buna benzer bir düzenleme ile paralel iş alanları da hesaba katılabilir. Örneğin $k = 1$ için sağ-ön-yüksek (R-F-U) denilebilir.

Konu ile ilgili literatürde tek çalışma vardır. Lapierre ve Ruiz (2004) çift taraflı montaj hatlarında hattın montaj pozisyonların yüksekliği dikkate alınarak bir gerçek

uygulama yapmışlardır. Bununla birlikte beslemeli hatlarda ele alınmıştır. Matematiksel model önerilmemiş bir sezgisel çözüm yöntemi önerilmiştir.

8.5. Atama kısıtları

Otomotiv endüstrisinde sıklıkla ortaya çıkan problemlerden biridir. Montaj parçalarının montaj öncesi depolandığı alanlar, montaj araçlarının bulunduğu alanlar, operatörlerin rahat çalışabilmesi için gerekli alan gibi durumlar dikkate alınır. Aşağıda sıralanan genel nedenlerden dolayı bir gerçek hayat probleminde alan kısıtı dikkate alınmalıdır [Bautista ve Pereira, 2006];

- İstasyon uzunluğu kısıtlıdır. Bu durum genellikle sabit hızla hareket eden konveyörlerde ortaya çıkmaktadır. Operatör istasyon uzunluğu kadar hattın üzerinde gider.
- Genellikle, montaj için gerekli bütün parçalar ve araçlar hattın iki tarafına dağıtılır. Bunların mümkün olduğunca iş alanına yakın yerleşimleri yapılır.
- Karışık modelli üretimde alan kısıtları büyük önem taşımaktadır.
- Montaj hattında yeni ürün üretimi yapılacağı zaman alan kısıtları ortaya çıkabilir. Örneğin bir araba modeli üretiminden sonra başka bir araba modeli üretimine geçildiğinde özellikle yeni ürün fiziksel olarak bir öncekinden daha büyükse alan kısıtlarının dikkate alınması gerekir.

Her bir görev i 'nin yerine getirilebilmesi için a_i kadar alana ihtiyaç vardır. Her bir istasyon (j, k) 'nın ise A_{jk} kadar mevcut alan kaynağı vardır. Her bir istasyon için eşit alan kaynağı verilebilir $A = A_{jk}$. Alan kısıtı aşağıdaki gibidir.

$$\sum_{i \in I} a_i x_{ijk} \leq A_{jk} \quad \forall j \in J, k \in K(i) \quad (8.34)$$

Yine görevlerin istasyonlara atanmasında sıklıkla dikkate alınan kısıtlar arasında bölgeleme kısıtları, senkronize görev kısıtları ve istasyon kısıtları yer almaktadır. Bu

kısıtlara daha önce yapılan çalışmalarda yer verilmiştir. Aşağıda sırasıyla bölgeleme kısıtları, senkronize görev kısıtları ve istasyon kısıtı verilmiştir.

Bölgeleme_kısıtları

CZ uyumlu görevler kümesi ve IZ uyumsuz görevler kümesi olmak üzere;

$$x_{hjk} - x_{ijk} = 0 \quad \forall (i, h) \in CZ, j \in J, k \in K(i) \cap K(h) \quad (8.35)$$

$$x_{hjk} + x_{ijk} \leq 1 \quad \forall (i, h) \in IZ, j \in J, k \in K(i) \cap K(h) \quad (8.36)$$

Senkronize görev kısıtları

Burada, görev h ve i karşılıklı istasyona atanmalı ve aynı anda başlamalıdır. SZ senkronize görevler kümesi olmak üzere;

$$x_{hjf} - x_{ijk} = 0 \quad \forall (i, h) \in SZ, j \in J, k \in K(i), f \in K(h), k \neq f \quad (8.37)$$

$$t_h^f - t_h - t_i^f + t_i = 0 \quad \forall (i, h) \in SZ \quad (8.38)$$

İstasyon kısıtı

Belirli bir görev r daha önce belirli bir istasyonda (g, f) yapılmalıdır. PZ istasyon kısıtları kümesi olmak üzere;

$$x_{rgf} = 1 \quad \forall (r, (g, f)) \in PZ \quad (8.39)$$

Bu bölümde, gelecekte çift taraflı montaj hattı dengeleme problemleri için yapılabilecek bazı çalışmalara önerilerde bulunulmuştur. Bu öneriler doğrultusunda çok daha karmaşık problemler ele alınarak gerçek hayatta uygulanabilir çözüm yaklaşımlarının geliştirilebilir ve önerilen yaklaşımların özellikle gerçek hayat problemleri üzerinde test edilebilir.

KAYNAKLAR

Aase, G.R., Schniederjans, M.J., Olson, J.R., “U-OPT: An analysis of exact U-shaped line balancing procedures”, *International Journal of Production Research*, 41: 4185-4210 (2003).

Aase, G.R., Olson, J.R., Schniederjans, M.J., “U-shaped assembly line layouts and their impact on labor productivity: An experimental study”, *European Journal of Operational Research*, 156: 698-711 (2004).

Agrawal, P.K., “The related activity concept in assembly line balancing”, *International Journal of Production Research*, 23: 403-421 (1985).

Ağpak, K., Gökçen, H., “Assembly line balancing: Two resource constrained cases”, *International Journal of Production Economics*, 96: 129-140 (2005).

Ajenblit, D.A., Wainwright, R.L., “Applying genetic algorithms to the U-shaped assembly line balancing problem”, *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, Anchorage, AK, 96-101 (1998).

Akagi, F., Osaki, H., Kikuchi, S., “A method for assembly line balancing with more than one worker in each station”, *International Journal of Production Research*, 21: 755-770 (1983).

Aköz, O., Petrovic, D., “A fuzzy goal programming method with imprecise goal hierarchy”, *European Journal of Operational Research*, 181: 1427-1433 (2007).

Andrés, C., Miralles, C., Pastor, R., “Balancing and scheduling tasks in assembly lines with sequence-dependent setup times”, *European Journal of Operational Research*, 187 (3): 1212-1223 (2008).

Arcus, A.L., “COMSOAL: A computer method of sequencing operations for assembly lines”, *International Journal of Production Research*, 4: 259-277 (1966).

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).

Bard, J.F., “Assembly line balancing with parallel workstations and dead time”, *International Journal of Production Research*, 27: 1005-1018 (1989).

Bartholdi, J.J., “Balancing two-sided assembly lines: A case study”, *International Journal of Production Research*, 31: 2447-2461 (1993).

Bautista, J., Suarez, R., Mateo, M., Companys, R., “Local search heuristics for the assembly line balancing problem with incompatibilities between tasks”,

Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, CA, 2404-2409 (2000).

Bautista, J., Pereira, J., “Ant algorithms for assembly line balancing”, ***Lecture Notes in Computer Science***, 2463, 65-75 (2002).

Bautista, J., Pereira, J., “Ant algorithms for a time and space constrained assembly line balancing problem”, ***European Journal of Operational Research***, 177: 2016-2032 (2006).

Bautista, J., Pereira, J., “A dynamic programming based heuristic for the assembly line balancing problem”, ***European Journal of Operational Research***, 194: 787-794 (2009).

Baybars, I., “A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem”, ***Management Science***, 32: 909-932 (1986).

Baykasoğlu, A., “Multi-rule multi-objective simulated annealing algorithm for straight and U type assembly line balancing problems”, ***Journal of Intelligent Manufacturing***, 17: 217-232 (2006).

Baykasoglu, A., Özbakir, L., “Stochastic U-line balancing using genetic algorithms”, ***International Journal of Advanced Manufacturing Technology***, 32: 139-147 (2007).

Baykasoglu, A., Dereli, T., “Two-sided assembly line balancing using an ant-colony-based heuristic”, ***International Journal of Advanced Manufacturing Technology***, 36 (5-6): 582-588 (2008).

Baykasoglu, A., Dereli, T., “Simple and U-type assembly line balancing by using an ant colony based algorithm”, ***Mathematical and Computational Applications***, 14: 1-12 (2009).

Becker, C., Scholl, A., “A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing”, ***European Journal of Operational Research***, 168: 694-715 (2006).

Becker, C., Scholl, A., “Balancing assembly lines with variable parallel workplaces: Problem definition and effective solution procedure”, ***European Journal of Operational Research***, 199 (2): 359-374 (2009).

Bellman, R.E., Zadeh, L.A., “Decision making in a fuzzy environment”, ***Management Science***, 17(2): 141-164 (1970).

Benzer, R., Gökçen, H., Çetinyokuş, T., Çerçioğlu, H., “A network model for parallel line balancing problem”, ***Mathematical Problems in Engineering***, Art. No. 10106 (2007).

Boctor, F.F., “A multiple-rule heuristic for assembly line balancing”, ***Journal of Operational Research Society***, 46: 62-69 (1995).

- Boucher, T.O., "Choice of assembly line design under task learning", *International Journal of Production Research*, 25: 513-524 (1987).
- Boysen, N., Fliedner, M., Scholl, A., "A classification of assembly line balancing problems", *European Journal of Operational Research*, 183: 674-693 (2007).
- Boysen, N., Fliedner, M., "A versatile algorithm for assembly line balancing", *European Journal of Operational Research*, 184: 39-56 (2008).
- Bukchin, J., Dar-El, E.M., Rubinovitz, J., "Mixed-model assembly line design in a make-to-order environment", *Computers and Industrial Engineering*, 41: 405-421 (2002).
- Bukchin, J., Rubinovitz, J., "A weighted approach for assembly line design with station paralleling and equipment selection", *IIE Transactions*, 35: 73-85 (2003).
- Bukchin, Y., Rabinowitch, I., "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*, 174: 492-508 (2006).
- Buxey, G.M., Slack, N.D., Wild, R., "Production flow line system design - A review", *AIIE Transactions*, 5: 37-48 (1973).
- Buxey, G.M., "Assembly line balancing with multiple stations", *Management Science*, 20: 1010-1021 (1974).
- Carnahan, B.J., Norman, B.A., Redfern, M.S., "Incorporating physical demand criteria into assembly line balancing", *IIE Transactions*, 33: 875-887 (2001).
- Carraway, R.L., "A dynamic programming approach to stochastic assembly line balancing", *Management Science*, 35: 459-471 (1989).
- Carter, J.C., Silverman, F.N., "A cost-effective approach to stochastic line balancing with off-line repairs", *Journal of Operations Management*, 4: 145-157 (1984).
- Chakravarty, A.K., Shtub, A., "Balancing mixed model lines with in-process inventories", *Management Science*, 31: 1161-1174 (1985).
- Chakravarty, A.K., Shtub, A., "A cost minimization procedure for mixed model production lines with normally distributed task times", *European Journal of Operational Research*, 23: 25-36 (1986).
- Chakravarty, A.K., "Line balancing with task learning effects", *IIE Transactions*, 20: 186-193 (1988).
- Chanas, S., Kuchta, D., "Fuzzy goal programming-one notion, many meanings", *Control and Cybernetics*, 31(4): 871-890 (2002).

- Charnes, A., Cooper, W.W., "Management Models and Industrial Applications of Linear Programming", **John Wiley & Sons**, New York (1961).
- Chen, L.H., Tsai, F.C., "Fuzzy goal programming with different importance and priorities", **European Journal of Operational Research**, 133: 548-556 (2001).
- Chen, S., "Just-In-Time U-shaped assembly line balancing", **Industrial System and Engineering**, Ph.D. Thesis, Lehigh University (2003).
- Chen, S.H., Plebani, L., "Heuristic for balancing U-shaped assembly lines with parallel stations", **Journal of The Operations Research Society of Japan**, 51: 1-14 (2008).
- Chiang, W.C., "The application of a tabu search metaheuristic to the assembly line balancing problem", **Annals of Operations Research**, 209-227 (1998).
- Chiang, W.C., Urban, T.L., "The stochastic U-line balancing problem: A heuristic procedure", **European Journal of Operational Research**, 175: 1767-1781 (2006).
- Chiang, W.C., Panagiotis K., Urban, T.L., "Line balancing in a just-in-time production environment: Balancing multiple U-lines", **IIE Transactions**, 39: 347-359 (2007).
- Cohen, Y., Dar-El, M.E., "Optimizing the number of stations in assembly lines under learning for limited production", **Production Planning and Control**, 9: 230-240 (1998).
- Dar-El, E.M., Rabinovitch, M., "Optimal planning and scheduling of assembly lines", **International Journal of Production Research**, 26: 1433-1450 (1988).
- Deckro, R.F., "Balancing cycle time and workstations", **IIE Transactions**, 21: 106-111 (1989).
- Deckro, R.F., Rangachari, S., "A goal approach to assembly line balancing", **Computers and Operations Research**, 17: 509-521 (1990).
- Dimitriadis, S.G., "Assembly line balancing and group working: A heuristic procedure for workers' groups operating on the same product and Workstation", **Computers and Operations Research**, 33: 2757-2774 (2006).
- Erel, E., Sarin, S.C., "A survey of the assembly line balancing procedures", **Production Planning and Control**, 9: 414-434 (1998).
- Erel, E., Gökcen, H., "Shortest route formulation of mixed-model assembly line balancing problem", **European Journal of Operational Research**, 116: 194-204 (1999).

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).

Erel, E., Sabuncuoglu, I., Sederici, H., “Stochastic assembly line balancing using beam search”, *International Journal of Production Research*, 43: 1411-1426 (2005).

Fleszar, K., Hindi, K.S., “An enumerative heuristic and reduction methods for the assembly line balancing problem”, *European Journal of Operational Research*, 145: 606-620 (2003).

Gao, J., Sun, L.Y., Wang, L.H., “An efficient approach for type II robotic assembly line balancing problems”, *Computers and Industrial Engineering*, 56: 1065-1080 (2009).

Gendreau, M., “An introduction to tabu search”, In: Glover F., Kochenberger G.A.,. Handbook of metaheuristics. *Kluwer Academic Publishers*, Boston, Dordrecht, London (2003).

Ghosh, S., Gagnon, R.J., “A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems”, *International Journal of Production Research*, 27: 637-670 (1989).

Glover, F., “Tabu search, Part I”, *ORSA Journal of Computing*, 1:190-206 (1989a).

Glover, F., “Tabu search, Part II”, *ORSA Journal of Computing*, 2:4-32 (1989b).

Glover, F., Laguna, M., “Tabu search”, In: Reeves C.R. (ed) Modern heuristic techniques for combinatorial problems. Blackwell, London, Edinburgh, Boston, Melbourne, Paris, Berlin, Wien (1993).

Glover, F., Laguna, M., “Tabu search”, *Kluwer Academic Publishers*, Boston, Dordrecht, London (1997).

Goncalves, J.F., Almeida, J.R., “A hybrid genetic algorithm for assembly line balancing”, *Journal of Heuristics*, 8: 629-642 (2002).

Gökçen, H., Erel, E., “A goal programming approach to mixed-model assembly line balancing problem”, *International Journal of Production Economics*, 48: 177-185 (1997).

Gökçen, H., Erel, E., “Binary integer formulation for mixed-model assembly line balancing problem”, *Computers and Industrial Engineering*, 34: 451-461 (1998).

Gökçen, H., Agpak, K., Gencer, C., Kizilkaya, E., “A shortest route formulation of simple U-type assembly line balancing problem”, *Applied Mathematical Modelling*, 29: 373-380 (2005).

Gökçen, H., Agpak, K., “A goal programming approach to simple U-line balancing problem”, *European Journal of Operational Research*, 171: 577-585 (2006).

Gökçen, H., Ağpak, K., Benzer, R., “Balancing of parallel assembly lines”, *International Journal of Production Economics*, 103: 600-609 (2006).

Guerriero, F., Miltenburg, J., “The stochastic U-line balancing problem”, *Naval Research Logistics*, 1: 31-57 (2003).

Gunther, R.E., Johnson, G.D., Paterson, R.S., “Currently practiced formulations for the assembly line balancing problem”, *Journal of Operations Management*, 3: 209-221 (1983).

Gutjahr, A.L., Nemhauser, G.L., “An algorithm for the line balancing problem”, *Management Science*, 11(2): 308-315 (1964).

Hackman, S.T., Magazine, M.J., Wee, T.S., “Fast, effective algorithms for simple assembly line balancing problems”, *Operations Research*, 37: 916-924 (1989).

Hannan, E.L., “Linear programming with multiple fuzzy goals”, *Fuzzy Sets and Systems*, 6: 235-248 (1981).

Haq, A.N., Jayaprakash, J., Rengarajan, K., “A hybrid genetic algorithm approach to mixed-model assembly line balancing”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28: 337-341 (2006).

Held, M., Karp, R.M., Shreshian, R., “Assembly line balancing-Dynamic programming with precedence constraints”, *Operations Research*, 11: 442-459 (1963).

Helgeson, W.B., Salvesson, M.E., Smith, W.W., “How to balance an assembly line”, Technical Report, *Carr Press*, New Canaan, Conn (1954).

Henig, M.I., “Extensions of the dynamic programming method in the deterministic and stochastic assembly-line balancing problems”, *Computers and Operations Research*, 13: 443-449 (1986).

Hu, X., Wu, E., Jin, Y., “A station-oriented enumerative algorithm for two-sided assembly line balancing”, *European Journal of Operational Research*, 186: 435-440 (2008).

Hwang, C.L., Yoon, K., “Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications”, *Springer*, Heidelberg (1987).

Hwang, R.K., Katayama, H., “A multi-decision genetic approach for workload balancing of mixed-model U-shaped assembly line systems”, *International Journal of Production Research*, 47: 3797-3822 (2009).

Jackson, J.R., "A computing procedure for a line balancing with a precedence matrix", *Management Science*, 2: 261-272 (1956).

Johnson, R.V., "A branch and bound algorithm for assembly line balancing problems with formulation irregularities", *Management Science*, 29: 1309-1324 (1983).

Johnson, R.V., "Balancing assembly lines for teams and work groups", *International Journal of Production Research*, 29: 1205-1214 (1991).

Kao, E.P.C., "A preference order dynamic program for stochastic assembly line balancing", *Management Science*, 22: 1097-1104 (1976).

Kao, E.P.C., "Computational experience with a stochastic assembly line balancing algorithm", *Computers and Operations Research*, 6: 79-86 (1979).

Kao, E.P.C., Queyranne, M., "On dynamic programming methods for assembly line balancing", *Operations Research*, 30: 375-390 (1982).

Kara, Y., Ozcan, U., Peker, A., "An approach for balancing and sequencing mixed-model JIT U-lines", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32(11-12): 1218-1231 (2007a).

Kara, Y., Ozcan, U., Peker, A., "Balancing and sequencing mixed-model JIT U-lines with multiple objectives", *Applied Mathematics and Computation*, 184(2): 566-588 (2007b).

Kara, Y., Paksoy, T., Chang, C-T., "Binary fuzzy goal programming approach to single model straight and U-shaped assembly line balancing", *European Journal of Operational Research*, 195: 335-347 (2009).

Karabati, S., Sayin, S., "Assembly line balancing in a mixed-model sequencing environment with synchronous transfers", *European Journal of Operational Research*, 149: 417-429 (2003).

Karni, R., Herer, Y.T., "Allocation of tasks to stations in small-batch assembly with learning: Basic concepts", *International Journal of Production Research*, 33: 2973-2998 (1995).

Kilinci, O., Bayhan, G.M., "A Petri net approach for simple assembly line balancing problems", *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, 30: 1165-1173 (2006).

Kilinci, O., Bayhan, G.M., "A P-invariant-based algorithm for simple assembly line balancing problem of type-1", *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, doi: 10.1007/s00170-007-0975-2 (2007).

Kim, Y.K., Kim, Y., Kim, Y.J., "Two-sided assembly line balancing: a genetic algorithm approach", *Production Planning and Control*, 11: 44-53 (2000a).

- Kim, Y.K., Kim, J.Y., Kim, Y., “A coevolutionary algorithm for balancing and sequencing in mixed model assembly lines”, ***Applied Intelligence***, 13: 247-258 (2000b).
- Kim, Y.K., Kim, S.J., Kim, J.Y., “Balancing and sequencing mixed-model U-lines with a co-evolutionary algorithm”, ***Production Planning and Control***, 11: 754-764 (2000c).
- Kim, Y.K., Kim, J.Y., Kim, Y., “An endosymbiotic evolutionary algorithm for the integration of balancing and sequencing in mixed-model U-lines”, ***European Journal of Operational Research***, 168: 838-852 (2006).
- Kim, Y.K., Song, W.S., Kim, J.H., “A mathematical model and a genetic algorithm for two-sided assembly line balancing”, ***Computers and Operations Research***, 36 (3): 853-865 (2009).
- Kottas, J.F., Lau, H.-S., “A cost-oriented approach to stochastic line balancing”, ***AIIE Transactions***, 5: 164-171 (1973).
- Kottas, J.F., Lau, H.-S., “A total operating cost model for paced lines with stochastic task times”, ***AIIE Transactions***, 8: 234-240 (1976).
- Kottas, J.F., Lau, H.-S., “A stochastic line balancing procedure”, ***International Journal of Production Research***, 19: 177-193 (1981).
- Lapierre, S.D., Ruiz, A.B., “Balancing assembly lines: An industrial case study”, ***Journal of the Operational Research Society***, 55: 589-597 (2004).
- Lapierre, S.D., Ruiz, A., Soriano, P., “Balancing assembly lines with tabu search”, ***European Journal of Operational Research***, 168: 826-837 (2006).
- Lee, T.O., Kim, Y., Kim, Y.K., “Two-sided assembly line balancing to maximize work relatedness and slackness”, ***Computers and Industrial Engineering***, 40: 273-292 (2001).
- Leu, Y.-Y., Matheson, L.A., Rees, L.P., “Assembly line balancing using genetic algorithms with heuristic-generated initial populations and multiple evaluation criteria”, ***Decision Sciences***, 25: 581-606 (1991).
- Liu, S.B., Ong, H.L., Huang, H.C., “Two bi-directional heuristics for the assembly line type II problem”, ***International Journal Advanced Manufacturing Technology***, 22: 656-661 (2003).
- Liu, S.B., Ong, H.L., Huang, H.C., “A bidirectional heuristic for stochastic assembly line balancing Type II problem”, ***International Journal Advanced Manufacturing Technology***, 25: 71-77 (2005).

Liu, S.B., Ng, K.M., Ong, H.L., “Branch-and-bound algorithms for simple assembly line balancing problem”, *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, doi: 10.1007/s00170-006-0821-y (2007).

Lyu, J., “A single-run optimization algorithm for stochastic assembly line balancing problems”, *Journal of Manufacturing Systems*, 16: 204-210 (1997).

Macaskill, J.L.C., “Production-line balances for mixedmodel lines”, *Management Science*, 19: 423-434 (1972).

Malakooti, B., “A multiple criteria decision making approach for the assembly line balancing problem”, *International Journal of Production Research*, 29: 1979-2001 (1990).

Malakooti, B., “Assembly line balancing with buffers by multiple criteria optimization”, *International Journal of Production Research*, 32: 2159-2178 (1994).

Martino, L., Pastor, R., “Heuristic procedures for solving the general assembly line balancing problem with setups”, *International Journal of Production Research*, doi: 10.1080/00207540802577979 (2009).

Matanachai, S., Yano, C.A., “Balancing mixed-model assembly lines to reduce work overload”, *IIE Transactions*, 33: 29-42 (2001).

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).

McMullen, P.R., Frazier, G.V., “Using simulated annealing to solve a multiobjective assembly line balancing problem with parallel workstations”, *International Journal of Production Research*, 36: 2717-2741 (1998).

McMullen, P.R., Tarasewich, P., “Using ant techniques to solve the assembly line balancing problem”, *IIE Transactions*, 35: 605-617 (2003).

McMullen, P.R., Tarasewich, P., “Multi-objective assembly line balancing via a modified ant colony optimization technique”, *International Journal of Production Research*, 44: 27-42 (2006).

Merengo, C., Nava, F., Pozetti, A., “Balancing and sequencing manual mixed-model assembly lines”, *International Journal of Production Research*, 37: 2835-2860 (1999).

Mertens, P., “Fließbandabstimmung mit dem Verfahren der begrenzten Enumeration nach Müller-Merbach”, *Ablaufund Planungsforschung*, 8: 429-433 (1967).

Miltenburg, J., Wijngaard, J., “The U-line line balancing problem”, *Management Science*, 40: 1378-1388 (1994).

Miltenburg, J., “Balancing U-lines in a multiple U-line facility”, ***European Journal of Operational Research***, 109: 1-23 (1998).

Miltenburg, J., “Balancing and scheduling mixed-model U-shaped production lines”, ***International Journal of Flexible Manufacturing Systems***, 14: 119-151 (2002).

Miralles, C., García-Sabater, J.P., Andrés, C., Cardós, M., “Branch and bound procedures for solving the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem: Application”, ***Discrete Applied Mathematics***, doi: 10.1016/j.dam.2005.12.012 (2007).

Monden, Y., “Toyota Production System”, ***Engineering and Management Press***, Georgia, USA (1993).

Moodie, C.L., Young, H.H., “A heuristic method of assembly line balancing for assumptions of constant or variable work element times”, ***Journal of Industrial Engineering***, 16: 23-29 (1965).

Narasimhan, R., “Goal programming in a fuzzy environment”, ***Decision Sciences***, 11: 325-336 (1980).

Nearchou, A.C., “Multi-objective balancing of assembly lines by population heuristics”, ***International Journal of Production Research***, 46: 2275-2297 (2008).

Nkasu, M.M., Leung, K.H., “A stochastic approach to assembly line balancing”, ***International Journal of Production Research***, 33: 975-991 (1995).

Özcan, U., Toklu, B., “Balancing of mixed-model two-sided assembly lines”, ***Computers and Industrial Engineering***, 57(1): 217-227 (2009a).

Özcan, U., Toklu, B., “A new hybrid improvement heuristic approach to simple straight and U-type assembly line balancing problems”, ***Journal of Intelligent Manufacturing***, 20: 123-136 (2009b).

Özcan, U., Gökçen, H., Toklu, B., “Balancing parallel two-sided assembly lines”, ***International Journal of Production Research***, doi: 10.1080/00207540903074991 (2009).

Pastor, R., Andrés, C., Miralles, C., “Corrigendum to Balancing and scheduling tasks in assembly lines with sequence-dependent setup”, ***European Journal of Operational Research***, 187 (2008) 1212-1223 (2009).

Pastor, R., Ferrer, L., “An improved mathematical program to solve the simple assembly line balancing problem”, ***International Journal of Production Research***, 47: 2943-2959 (2009).

Pinnoi, A., Wilhelm, W.E., “A branch and cut approach for workload smoothing on assembly lines”, ***INFORMS Journal on Computing***, 9: 335-350 (1997).

Pinnoi, A., Wilhelm, W.E., "Assembly system design: A branch and cut approach", *Management Science*, 44: 103-118 (1998).

Pinnoi, A., Wilhelm, W.E., "Valid inequalities for a class of assembly system problems", *European Journal of Operational Research*, 126: 31-50 (2000).

Pinto, P.A., Dannenbring, D.G., Khumawala, B.M., "A branch and bound algorithm for assembly line balancing with paralleling", *International Journal of Production Research*, 13: 183-196 (1975).

Pinto, P.A., Dannenbring, D.G., Khumawala, B.M., "Branch and bound and heuristic procedures for assembly line balancing with paralleling of stations", *International Journal of Production Research*, 19: 565-576 (1981).

Plans, J., Corominas, A., "Modelling and solving the SALB-E problem", *Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning*, Porto, Portugal - July (1999).

Ponnambalam, S.G., Aravindan, P., Naidu, G.M., "A multi-objective genetic algorithm for solving assembly line balancing problem", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16: 341-352 (2000).

Rachamadugu, R., Talbot, B., "Improving the equality of workload assignments in assembly lines", *International Journal of Production Research*, 29: 619-633 (1991).

Raouf, A., Tsui, C., "A new method for assembly line balancing having stochastic work elements", *Computers and Industrial Engineering*, 6: 131-148 (1982).

Reeve, N.R., Thomas, W.H., "Balancing stochastic assembly lines", *AIIE Transactions*, 5: 223-229 (1973).

Rekiek, B., Dolgui, A., Delchambre, A., Bratcu, A., "State of art of optimization methods for assembly line design", *Annual Reviews in Control*, 26: 163-174 (2002).

Roberts, S.D., Villa, C.D., "On a multiproduct assembly line-balancing problem", *AIIE Transactions*, 2: 361-364 (1970).

Romero, C., "A general structure of achievement function for a goal programming model", *European Journal of Operational Research*, 153: 675-686 (2004).

Rosenblatt, M.J., Carlson, R.C., "Designing a production line to maximize profit", *IIE Transactions*, 17: 117-121 (1985).

Sabuncuoglu, I., Erel, E., Tanyer, M., "Assembly line balancing using genetic algorithms", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 11: 295-310 (2000).

Sabuncuoglu, I., Erel, E., Alp, A., “Ant colony optimization for the single model U-type assembly line balancing problem”, *International Journal of Production Economics*, doi:10.1016/j.ijpe.2008.11.017 (2009).

Salveson, M.E., “The assembly line balancing problem”, *The Journal of Industrial Engineering*, 6 (3): 18-25 (1955).

Sarin, S.C., Erel, E., “Development of cost model for the single-model stochastic assembly line balancing problem”, *International Journal of Production Research*, 28: 1305-1316 (1990).

Sarin, S.C., Erel, E., Dar-El, E.M., “A methodology for solving single-model, stochastic assembly line balancing problem”, *Omega*, 27: 525-535 (1999).

Sarker, B.R., Shanthikumar, J.G., “A generalized approach for serial or parallel line balancing”, *International Journal of Production Research*, 21: 109-133 (1983).

Sawik, T., “Monolithic vs. hierarchical balancing and scheduling of a flexible assembly line”, *European Journal of Operational Research*, 143: 115-124 (2002).

Scholl, A., Voß, S., “Simple assembly line balancing-Heuristic approaches”, *Journal of Heuristics*, 2: 217- 244 (1996).

Scholl, A., Klein, R., “ULINO: Optimally balancing U-shaped JIT assembly lines”, *International Journal of Production Research*, 37: 721-736 (1999).

Scholl, A., Becker, C., “A note on an exact method for cost-oriented assembly line balancing”, *International Journal of Production Economics*, 97: 343-352 (2005).

Scholl, A., Becker, C., “State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing”, *European Journal of Operations Research*, 168: 666-693 (2006).

Scholl, A., Boysen, N., Flidner, M., “The sequence-dependent assembly line balancing problem”, *OR Spectrum*, 30 (3): 579-609 (2008).

Scholl, A., Boysen, N., “Designing parallel assembly lines with split workplaces: Model and optimization procedure”, *International Journal of Production Economics*, 119: 90-100 (2009).

Schrage, L., Baker, K.R., “Dynamic programming solution of sequencing problems with precedence constraints”, *Operations Research*, 26: 444-449 (1978).

Shin, D., Min, H., “Uniform assembly line balancing with stochastic task times in just-in-time manufacturing”, *International Journal of Operations and Production Management*, 11(8): 23-34 (1991).

Shtub, A., "The effect of incompleteness cost on line balancing with multiple manning of work stations", *International Journal of Production Research*, 22: 235-245 (1984).

Shtub, A., Dar-El, E.M., "A methodology for the selection of assembly systems", *International Journal of Production Research*, 27: 175-186 (1989).

Shtub, A., Dar-El, E.M., "An assembly chart oriented assembly line balancing approach", *International Journal of Production Research*, 6: 1137-1151 (1990).

Silverman, F.N., Carter, J.C., "A cost-based methodology for stochastic line balancing with intermittent line stoppages", *Management Science*, 32: 455-463 (1986).

Simaria, A.S., Vilarinho, P.M., "A genetic algorithm based approach to the mixed-model assembly line balancing problem of type II", *Computers and Industrial Engineering*, 4: 391-407 (2004).

Simaria, A.S., Vilarinho, P.M., "2-ANTBAL: An ant colony optimisation algorithm for balancing two-sided assembly lines", *Computers and Industrial Engineering*, 56 (2): 489-506 (2009).

Sniedovich, M., "Analysis of a preference order assembly line problem", *Management Science*, 27: 1067-1080 (1981).

Sotskov, Y., Dolgui, A., Portmann, M.-C., "Stability analysis of optimal balance for assembly line with fixed cycle time", *European Journal of Operational Research*, 168: 783-797 (2006).

Sparling, D., "Balancing Just-In-Time production units: The N U-line balancing problem", *INFOR*, 36: 215-237 (1998).

Sparling, D., Miltenburg, J., "The mixed-model U-line balancing problem", *International Journal of Production Research*, 36: 485-501 (1998).

Sphicas, G.P., Silverman, F.N., "Deterministic equivalents for stochastic assembly line balancing", *AIIE Transactions*, 8: 280-282 (1976).

Suresh, G., Sahu, S., "Stochastic assembly line balancing using simulated annealing", *International Journal of Production Research*, 32: 1801-1810 (1994).

Suresh, G., Vinod, V.V., Sahu, S., "Genetic algorithm for assembly line balancing", *Production Planning and Control*, 7: 38-46 (1996).

Tabucanon, M.T., "Multiple criteria decision making in industry (Studies in production and engineering economics; 8)", *Elsevier*, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo (1988).

Taillard, E., "Some efficient heuristic methods for flow shop sequencing problem", *European Journal of Operational Research*, 47: 65-74 (1990).

Talbot, F.B., Patterson J.H., "An integer programming algorithm with network cuts for solving the simple assembly line balancing problem", *Management Science*, 30: 85-99 (1984).

Tamiz, M., Jones, D., Romero, C., "Goal programming for decision making: an overview of the current state-of-the-art", *European Journal of Operational Research*, 111: 569-581 (1998).

Thomopoulos, N.T., "Mixed model line balancing with smoothed station assignments", *Management Science*, 16: 593-603 (1970).

Tiwari, R.N., Dharmar, S., Rao, J.R., "Fuzzy goal programming-an additive model", *Fuzzy Sets and Systems*, 24: 27-34 (1987).

Toklu, B., Özcan, U., "A fuzzy goal programming model for the simple U-line balancing problem with multiple objectives", *Engineering Optimization*, 40(3): 191-204 (2008).

Tsujimura, Y., Gen, M., Kubota, E., "Solving fuzzy assembly line balancing problem with genetic algorithms", *Computers and Industrial Engineering*, 29: 543-547 (1995).

Ugurdag, H.F., Rachamadugu, R., Papachristou, C.A., "Designing paced assembly lines with fixed number of stations", *European Journal of Operational Research*, 102: 488-501 (1997).

Urban, T.L., "Note. Optimal balancing of U-shaped assembly lines", *Management Science*, 44: 738-741 (1998).

Urban, T.L., Chiang, W.-C., "An optimal piecewise-linear optimization of the U-line balancing problem with stochastic task times", *European Journal of Operational Research*, 168: 771-782 (2006).

Van Hop, N., "A heuristic solution for fuzzy mixed-model line balancing problem", *European Journal of Operational Research*, 168: 789-810 (2006).

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).

Vilarinho, P.M., Simaria, A.S., "ANTBAL: An ant colony optimization algorithm for balancing mixed-model assembly lines with parallel workstations", *International Journal of Production Research*, 44: 291-303 (2006).

Visich, J.K., Diaz-Saiz, J., Khumawala, B.M., “Development of heuristics to reduce model imbalance for the mixedmodel, U-shaped assembly line”, ***Proceedings of Annual Meeting Decision Science Institute***, 1786-1791 (2002).

Wang, H.F., Fu, C.C., “A generalization of fuzzy goal programming with preemptive structure”, ***Computers and Operations Research***, 24(9): 819-828 (1997).

Wilson, J.M., “Formulation of a problem involving assembly lines with multiple manning of work stations”, ***International Journal of Production Research***, 24: 59-63 (1986).

Wu, E-F., Jin, Y., Bao, J-S., Hu, X-F., “A branch-and-bound algorithm for two-sided assembly line balancing”, ***International Journal of Advanced Manufacturing Technology***, 39 (9-10): 1009-1015 (2008).

Zadeh, L.A., “Fuzzy sets”, ***Information and Control***, 8: 338-353 (1965).

Zimmerman, H.J., “Fuzzy programming and linear programming with several objective functions”, ***Fuzzy Sets and Systems***, 1: 45-55 (1978).

EKLER

EK-1. Montaj hattı dengeleme problemlerinin sınıflandırılması

[illegible]

EK-1. (Devam) Montaj hattı dengeleme problemlerinin sınıflandırılması

Yazar(lar)	Yerleşim şekli				Ürün	Görev zamanı				Amaç								Paralellik			Çözüm Yöntemi
	<i>d</i>	<i>p</i>	<i>u</i>	<i>uⁿ</i>	<i>tm</i>	<i>mm</i>	<i>det</i>	<i>dinst</i>	<i>fuz</i>	<i>min^m</i>	<i>min^c</i>	<i>max^E</i>	<i>min^{dh}</i>	<i>min^{co}</i>	<i>max^{pr}</i>	<i>optⁿ</i>	<i>par^{isd}</i>	<i>par^{gor}</i>	<i>par²</i>		
(1993)																					
Kim ve ark. (2000c)	*				*		*			*									*	GA	
Lee ve ark. (2001)	*				*		*			*	*								*	H	
Lapierre ve Ruiz (2004)	*				*		*			*									*	H	
Baykasoğlu ve Dereli (2007)	*				*		*			*									*	ANT	
Hu ve ark. (2008)	*				*		*			*									*	H	
Wu ve ark. (2007)	*				*		*			*									*	B&B	
Kim ve ark. (2007)	*				*		*				*								*	M,GA	
Becker ve Scholl (2009)	*				*		*			*									*	M, B&B	
Simaria ve Vilarinho (2009)	*					*	*			*									*	M, ANT	
Özcan ve Toklu (2009)	*					*	*			*									*	M, SA	
Boucher (1987)	*				*			*				*								H	
Chakravarty (1988)	*				*			*				*								DP, H	
Scholl ve ark. (2007)	*				*			*		*	*	*								M	
Moodie ve Young (1965)	*				*			*					*							H	
Kottas ve Lau (1973)	*				*			*						*						H	
Reeve ve Thomas (1973)	*				*			*					*							H	
Kottas ve Lau (1976)	*				*			*						*						H	
Kao (1976)	*				*			*		*										DP	
Sphicas ve Silverman (1976)	*				*			*		*										M	
Kao (1979)	*				*			*		*										DP	
Kottas ve Lau (1981)	*				*			*						*						H	
Sniedovich (1981)	*				*			*		*										DP	
Raouf ve Tsui (1982)	*				*			*		*			*							H	
Carter ve	*				*			*						*						H	

EK-1. (Devam) Montaj hattı dengeleme problemlerinin sınıflandırılması

Yazar(lar)	Yerleşim şekli				Ürün	Görev zamanı				Amaç								Paralellik			Çözüm Yöntemi
	d	p	u	u ⁿ	tm	mm	det	dinst	to	fuz	min ^m	min ^c	max ^E	min ^{dh}	min ^{co}	max ^{pr}	opt ⁿ	par ^{isd}	par ^{gor}	par ²	
Silverman (1984)																					
Shtub (1984)	*				*				*						*						M,H
Henig (1986)	*				*				*						*						DP
Silverman ve Carter (1986)	*				*				*						*						H
Wilson (1986)	*				*				*						*						M
Carraway (1989)	*				*				*	*											DP
Sarin ve Erel (1990)	*				*				*						*						DP
Shin ve Min (1991)	*				*				*						*						H
Suresh ve Sahu (1994)	*				*				*					*			*				SA
Nkasu ve Leung (1995)	*				*				*	*	*	*									M
Suresh ve ark. (1996)	*				*				*					*			*				GA
Lyu (1997)	*				*				*						*						H
Sarin ve ark. (1999)	*				*				*						*						H
Liu ve ark. (2005)	*				*				*			*									H
Tsujimura ve ark. (1995)	*				*					*							*				M,GA
Thomopoulos (1970)	*				*	*				*				*							H
Macaskill (1972)	*				*	*							*								H
Chacravarty ve Shtup (1985)	*				*	*									*						M,H
Gökçen ve Erel (1997)	*				*	*											*				M
Gökçen ve Erel (1998)	*				*	*				*											M
Erel ve Gökçen (1999)	*				*	*				*											M
Merengo ve ark. (1999)	*				*	*				*				*							H
Kim ve ark. (2000b)	*				*	*								*							GA
Matanachai ve Yano (2001)	*				*	*								*							H
Karabati ve Sayin (2003)	*				*	*											*				M,H

EK-1. (Devam) Montaj hattı dengeleme problemlerinin sınıflandırılması

[illegible]

EK-1. (Devam) Montaj hattı dengeleme problemlerinin sınıflandırılması

[illegible]

EK-1. (Devam) Montaj hattı dengeleme problemlerinin sınıflandırılması

Yazar(lar)	Yerleşim şekli				Ürün	Görev zamanı				Amaç								Paralellik			Çözüm Yöntemi
	d	p	u	u ⁿ	t ^m	m ^m	d ^e	d ⁱ	st ^o	fuz	min ^m	min ^c	max ^E	min ^{d₁}	min ^{co}	max ^{pr}	opt ⁿ	par ^{is₁}	par ^{g_{or}}	par ²	
ve Özbakır (2007)																					
Ağpak ve Gökçen (2007)			*		*				*		*										M
Boysen ve Fliedner (2008)			*		*				*							*		*	*		H,M
Chen ve Plebani (2008)			*		*	*					*							*			H
Toklu ve Özcan (2008)			*		*	*			*								*				M
Kara ve ark. (2009)	*		*		*	*			*								*				M
Sparling ve Miltenburg (1998)			*	*		*	*				*			*							M,H
Kim ve ark. (2000a)			*			*	*							*							GA
Miltenburg (2002)			*			*	*							*							GA
Visich ve ark. (2002)			*			*	*							*							TAA,SA
Kim ve ark. (2006)			*			*	*							*							GA
Kara ve ark. (2007a)			*			*	*				*			*							SA
Kara ve ark. (2007b)			*			*	*		*								*				SA
Hwang ve Katayama (2009)			*			*	*				*			*							GA
Miltenburg (1998)				*	*		*				*						*				DP
Sparling (1998)				*	*		*				*				*						H
Chiang ve ark. (2007)				*	*		*				*	*			*						M,B&B

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : Özcan, Uğur
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 01.09.1978 Çiçekdağı
 Medeni hali : Evli
 E-mail : uozcan@selcuk.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Selçuk Üni./Endüstri Müh. Bölümü	2005
Lisans	Selçuk Üni./Endüstri Müh. Bölümü	2002
Lise	Kırıkkale Anadolu Öğretmen Lisesi	1997

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2002-2006	Selçuk Üni. Endüstri Müh. Bölümü	Arş. Gör.
2006-2009	Gazi Üni. Endüstri Müh. Bölümü	Arş. Gör.

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

- Özcan, U., Çerçioğlu, H., Gökçen, H., Toklu, B., “Balancing and sequencing of parallel mixed-model assembly lines”, *International Journal of Production Research*, doi: 10.1080/00207540903055735 (2009).
- Özcan, U., Gökçen, H., Toklu, B., “Balancing parallel two-sided assembly lines”, *International Journal of Production Research*, doi: 10.1080/00207540903074991 (2009).

3. Özcan, U., Toklu, B., “Balancing two-sided assembly lines with sequence-dependent setup times”, *International Journal of Production Research*, doi: 10.1080/00207540903140750 (2009).
4. Özcan, U., Toklu, B., “Multiple-criteria decision-making in two-sided assembly line balancing: A goal programming and a fuzzy goal programming models”, *Computers and Operations Research*, 36: 1955-1965 (2009).
5. Özcan, U., Toklu, B., “Balancing of mixed-model two-sided assembly lines”, *Computers and Industrial Engineering*, 57: 217-227 (2009).
6. Özcan, U., Toklu, B., “A new hybrid improvement heuristic approach to simple straight and U-shaped assembly line balancing problems”, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 20: 123-136 (2009).
7. Özcan, U., Toklu, B., “A tabu search algorithm for two-sided assembly line balancing”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43: 822-829 (2009).
8. Toklu, B., Özcan, U., “A fuzzy goal programming model for the simple U-line balancing problem with multiple objectives”, *Engineering Optimization*, 40(3): 191-204 (2008).
9. Kara, Y., Ozcan, U., Peker, A., “An approach for balancing and sequencing mixed-model JIT U-lines”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32(11-12): 1218-1231 (2007).
10. Kara, Y., Ozcan, U., Peker, A., “Balancing and sequencing mixed-model just-in-time U-lines with multiple objectives”, *Applied Mathematics and Computation*, 184(2): 566-588 (2007).
11. Çerçioğlu, H., Özcan, U., Gökçen, H., Toklu, B., “Paralel montaj hattı dengeleme problemleri için bir tavlama benzetimi yaklaşımı”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24(2): 331-341 (2009).
12. Özcan, U., Çerçioğlu, H., Gökçen, H., Toklu, B., “A tabu search algorithm for the parallel assembly line balancing problem”, *G.U. Journal of Science*, accepted paper (2009).

13. Özcan, U., Peker, A., “Karışık modellenli U-tipi montaj hatlarında hat dengeleme ve model sıralama problemleri için yeni bir sezgisel yaklaşım”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(2): 277-286 (2007).
14. Çerçioğlu, H., Özcan, U., Toklu, B., Gökçen, H., “Tavlama benzetimi kullanılarak paralel montaj hatlarının dengelenmesi”, *YA/EM 2007 - Yöneylem Araştırması / Endüstri Mühendisliği 27. Ulusal Kongresi*, 2-4 Temmuz 2007, İzmir, 786-790 (2007).
15. Kara, Y., Ozcan, U., Peker, A., “A simulated annealing approach for balancing and sequencing of mixed-model U-lines”, *Yöneylem Araştırması-Endüstri Mühendisliği XXIV. Ulusal Kongresi*, 24: 238 – 240 (2004).
16. Kara, Y., Ozcan, U., Peker, A., “Balancing and sequencing of mixed-model U-lines with multiple objectives”, *Yöneylem Araştırması-Endüstri Mühendisliği XXIV. Ulusal Kongresi*, 24: 229 – 231 (2004).
17. Kara, Y., Ozcan, U., “Karışık modellenli U-tipi montaj hatlarının paralel iş istasyonları ile dengelenmesi için bir sezgisel metot”, *IV. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu*, 278 -283 (2004).
18. Tekin, M., Kara, Y., Özcan, U., “Stokastik görev zamanlı karışık modellenli U-tipi montaj hatlarında hat dengelemesi ve model sıralaması”, *IV. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu*, 290-295 (2004).