



**ÇOK-OPERATÖRLÜ MONTAJ HATTI  
DENGELEME PROBLEMİNE YÖNELİK  
YENİ BİR YAKLAŞIM VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ**

**Hamid YILMAZ**

**Doktora Tezi  
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yrd. Doç. Dr. Mustafa YILMAZ**

**2017**

**Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOKTORA TEZİ**

**ÇOK-OPERATÖRLÜ MONTAJ HATTI DENGELEME  
PROBLEMİNE YÖNELİK YENİ BİR YAKLAŞIM VE ÇÖZÜM  
ÖNERİLERİ**

**Hamid YILMAZ**

**ENDÜSTRİ MÜHENDİLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ERZURUM  
2017**

**Her hakkı saklıdır**



TEZ ONAY FORMU

**ÇOK-OPERATÖRLÜ MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİNE YÖNELİK  
YENİ BİR YAKLAŞIM VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ**

Yrd. Doç. Dr. Mustafa YILMAZ danışmanlığında, Hamid YILMAZ tarafından hazırlanan bu çalışma, 26/05/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Endüstri Mühendisliği Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

İmza :

Üye : Doç. Dr. Emre ÇEVİKCAN

İmza :

Üye : Doç. Dr. Bülent ÇAVUŞOĞLU

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Gökay AKKAYA

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mustafa YILMAZ

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu'nun **01.06.2017** tarih ve **..22.../..18.....** nolu kararı ile onaylanmıştır.

**Prof. Dr. Cavit KAZAZ**  
Enstitü Müdürü

Bu çalışma BAP projesi kapsamında desteklenmiştir.  
Proje No: 2015/142

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## ÖZET

Doktora Tezi

### ÇOK-OPERATÖRLÜ MONTAJ HATTI Dengeleme Problemine Yönelik Yeni Bir Yaklaşım ve Çözüm Önerileri

Hamid YILMAZ

Atatürk Üniversitesi  
Fen Bilimler Enstitüsü  
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mustafa YILMAZ

Bu çalışmada, çok-operatörlü montaj hattı dengeleme problemleri ele alınarak, farklı durum ve amaçlar için çözüm önerileri sunulmuştur. İlk olarak, hat etkinliği için operatör sayısının birincil amaç, hat uzunluğunun ikincil amaç ve operatörler arası iş yükü dengesinin de üçüncül amaç olarak en küçükleyen bir karma tamsayılı matematiksel programlama modeli önerilmiştir. İlave olarak çok-operatörlü montaj hattı dengeleme problemleri kalifiye operatörler açısından ele alınarak, bu doğrultuda bir karma tamsayılı matematiksel model ve sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Ayrıca çok-operatörlü montaj hattı dengeleme problemleri çeşitli atama kısıtları altında incelenerek, problemin karma tamsayılı matematiksel modeli sunulmuş ve bir sezgisel yöntem önerilmiştir. Önerilen sezgisel algoritmalar ve matematiksel modeller test problemleri üzerinde incelenerek etkinlikleri gösterilmiştir. Bu çalışma kapsamında matematiksel modeller GUROBI 6.0 versiyonu kullanılarak çözülmüş, sezgisel algoritmalar ise C# programlama dili kullanılarak kodlanmış ve sonuçları raporlanmıştır.

**2017, 83 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Montaj hattı dengeleme, çok-operatörlü montaj hattı, Karma tamsayılı matematiksel modelleme, sezgisel algoritma

## **ABSTRACT**

Ph. D. Thesis

### **A NEW APPROACH FOR MULTI-MANNED ASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEM AND SOLUTION PROPOSALS**

Hamid YILMAZ

Atatürk University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Industrial Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Mustafa YILMAZ

In this study, multi manned assembly line balancing problem is presented by considering different situations and purposes. Firstly, a mathematical model, which minimize worker number as the primary objective, line length as the secondary and then workload differences between workers as the tertiary objective, is proposed for efficiency of line. Secondly, multi manned assembly line problems are tackle in terms of qualified workers and a mixed integer mathematical model is proposed and a heuristic algorithm is developed for the problem. Thirdly, multi-manned assembly line balancing problems are examined under various assignment constraints, a mixed integer mathematical model is presented and a heuristic method is proposed. The effectiveness of proposed mathematical models and heuristic algorithms are shown on test problems. In this study, mathematical models are solved via GUROBI 6.0, heuristic algorithms are coded in C# programming language and results are reported.

**2017, 83 pages**

**Keywords:** Assembly line balancing, multi-manned assembly line, mixed integer mathematical model, heuristic algorithms

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Mustafa YILMAZ'a, değerli zamanlarını ayırarak tezi inceleyen jürideki Sayın hocalarıma ve manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme teőekkürü bir borç bilirim.

**Hamid YILMAZ**

**Mayıs, 2017**

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	ix
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ÖZETLERİ .....</b>	<b>5</b>
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM.....</b>	<b>13</b>
3.1. Montaj Hattı Dengeleme Problemleri .....	13
3.1.1. Temel kavramlar ve terminoloji .....	14
3.1.2. Montaj hatları için temel prensipler .....	18
3.1.3. Montaj hatlarında sınıflandırmalar .....	19
3.1.3.a. Model sayısına göre sınıflandırmalar .....	20
3.1.3.b. Kontrol yapısına göre sınıflandırmalar.....	21
3.1.3.c. Otomasyon seviyesine göre sınıflandırmalar .....	22
3.1.3.d. Yerleşim şekline göre sınıflandırmalar .....	23
3.2. Çok-Operatörlü Montaj Hattı Dengeleme Problemleri .....	26
3.3. İş Yükü Dengeli Çok-Operatörlü Montaj Hattı Dengeleme Problemleri.....	28
3.3.1. Matematiksel model için kullanılan notasyonlar.....	30
3.3.2. Çözüm için karma tamsayılı matematiksel model .....	32
3.4. Kalifiye Çok-Operatörlü Montaj Hattı Dengeleme Problemleri ve Varsayımları .....	34
3.4.1. Test problemleri oluşturma .....	36
3.4.2. Matematiksel model için kullanılan notasyonlar.....	38
3.4.3. Çözüm için karma tamsayılı matematiksel model .....	39
3.4.4. Çözüm için sezgisel bir yaklaşım .....	41
3.5. Atama Kısıtlı Çok-Operatörlü Montaj Hattı Dengeleme Problemleri .....	45
3.5.1. Matematiksel model için kullanılan notasyonlar.....	46

3.5.2. Çözüm için karma tamsayılı matematiksel model .....	47
3.5.3. Çözüm için tabu arama algoritması tabanlı bir yaklaşım .....	51
3.5.3.a. Tabu arama algoritmasının probleme uyarlanması .....	51
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....</b>	<b>56</b>
4.1. İş Yüğü Dengeli Çok-Operatörlü Montaj Hattı Dengeleme Problemleri ve Karşılaştırmalı Sonuçlar .....	56
4.2. Kalifiye Çok-Operatörlü Montaj Hattı Dengeleme Problemleri ve Karşılaştırmalı Sonuçlar .....	58
4.3. Atama Kısıtlı Çok-Operatörlü Montaj Hattı Dengeleme Problemleri ve Karşılaştırmalı Sonuçlar .....	61
<b>5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....</b>	<b>67</b>
KAYNAKLAR .....	70
EKLER.....	78
EK 1.....	78
ÖZGEÇMİŞ .....	84



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

a	J'nin basamak sayısı
AS	Alt Sınır
AS	Amaç Sayısı
C	Çevrim Zamanı
ÇM_D_DT	Çok modellenli deterministik düz tip
ÇM_D_UT	Çok modellenli deterministik U tipi
ÇM_S_DT	Çok modellenli stokastik düz tip
ÇM_S_UT	Çok modellenli stokastik U tipi
ÇOMH	Çok Operatörlü Montaj Hatları
ÇOMHH	Çok Operatörlü Montaj Hattı Dengeleme Problemleri
DI	Düzensizlik İndeksi
$d_{k,k1}$	istasyonlara atanan operatörler arasındaki iş yükü farkı
$D_{max}$	En fazla uzaklık olması istenen işler kümesi
$D_{min}$	En az uzaklık olması istenen işler kümesi
EO	Esneklik Oranı
GA	Genetik Algoritma
HE	Hattın Etkinliği
IS	İstasyon Sayısı
$I_s$	Senkron işler kümesi
$I_{zn}$	Farklı istasyonda yapılacak işler kümesi
$I_{zp}$	Aynı istasyonda yapılacak işler kümesi
ist(t)	t. Takımdaki görev sayısı
J	İstasyonlar kümesi
$J_k$	Belirli istasyonda yapılacak işler kümesi
K	İstasyonda bulunan operatörler kümesi
KKA	Karınca Kolonisi Algoritması
M	Yeterince büyük bir sayı
Max Uzaklık	İstasyon Cinsinden En Büyük Uzaklık
MHDP	Montaj Hattı Dengeleme Problemi

Min Uzaklık	İstasyon Cinsinden En Küçük Uzaklık
MM	Matematiksel Model
PB	Negatif Bölgeleme
P(i)	i. görevin öncüller kümesi
P1(i)	i. görevin tüm öncüller kümesi
PK	Pozisyon Katsayısı
R(i)	i. görevin ardıllar kümesi
R1(i)	i. görevin tüm ardıllar kümesi
S	İstasyon Seri Numarası
SK	Sıra Kuvveti
strst <sub>i</sub>	i. görevin başlangıç zamanı
Suf	Alan Kullanım Faktörü
T	Toplam Takım Sayısı
T(t)	t. Takıma ait görevler
TAA	Tabu Arama Algoritması
TBA	Tavlama Benzetimi Algoritması
Team(h)	h. görevin takım numarası
Team(i)	i. görevin takım numarası
TL	Tabu Listesi
TM_D_DT	Tek modellenli deterministik düz tip
TM_D_UT	Tek modellenli deterministik U tipi
TM_S_DT	Tek modellenli stokastik düz tip
TM_S_UT	Tek modellenli stokastik U tipi
Tmax, MaxSt	İstasyonda Bulunabilecek En Fazla Takım Sayısı
PB	Pozitif Bölgeleme

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Öncelik diyagramı örnek gösterim. ....	15
Şekil 3.2. Şekil 3.1'e ait öncelik diyagramının öncelik matrisi şeklinde gösterimi.....	16
Şekil 3.3. (a) Tek modellenli hatlar (b) Karışık modellenli hatlar (c) Çok modellenli hatlar .....	21
Şekil 3.4. Düz montaj hattı yerleşimine bir örnek .....	24
Şekil 3.5. U tipi montaj hattı yerleşimine bir örnek.....	25
Şekil 3.6. Paralel montaj hattı yerleşimine bir örnek.....	26
Şekil 3.7. Çok operatörlü montaj hattı yerleşimine bir örnek.....	26
Şekil 3.8. Çok operatörlü montaj hattı Gant şeması .....	27
Şekil 3.9. İş yükü dengesi gözetilmeksizin dengelenmiş bir hat şeması. ....	29
Şekil 3.10. İş yükü dengesi göz önünde bulundurularak dengelenmiş bir hat şeması....	30
Şekil 3.11. Kalifiye çok operatörlü montaj hattı için örnek öncelik diyagramı.....	35
Şekil 3.12. Takım oluşturma mekanizması.....	37

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Montaj hattı dengeleme problemlerinin sınıflandırılması .....	19
Çizelge 3.2. Sawyer test problemine ait görevler ve takımlar .....	38
Çizelge 4.1. İş yükü dengeli montaj hattı karşılaştırma sonuçları .....	57
Çizelge 4.2. Önerilen sezgisel yöntem ve MIP karşılaştırması .....	59
Çizelge 4.3. Orta boyutlu test problemleri üzerinde sezgisel yöntem sonuçları.....	60
Çizelge 4.4. Büyük boyutlu test problemi üzerinde sezgisel yöntem sonuçları .....	60
Çizelge 4.5. Senkron, PB ve NB'ye ait atama kısıtları .....	62
Çizelge 4.6. İstasyon, Min Uzaklık ve Max Uzaklık'a ait atama kısıtları .....	63
Çizelge 4.7. TAA ve model çözümü karşılaştırması .....	65
Çizelge 4.8. TAA ile orta ve büyük boyutlu test problemi sonuçları .....	66

## 1. GİRİŞ

Küreselleşme ile birlikte meydana çıkan yoğun rekabet koşulları, malzeme, makine, mevcut işgücü, sermaye ve hammadde kaynaklarının üretime dayalı işletmelerde daha etkin ve verimli bir şekilde kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu kaynakların etkin bir şekilde kullanılması sonucunda işletmelerin maliyetlerinde önemli ölçüde düşüş sağlanarak, kapasite kullanım oranları ve toplam kârlarında artışlar meydana gelebilecektir. Bundan dolayı yüksek miktar ve kalitedeki üretimin daha az maliyetlerle pazara sunulması, üretime dayalı işletmelerin öncelikli hedefleri haline gelmiştir. Bu tarz üretimin ilk örneklerine, Henry Ford tarafından Ford Model T arabaların üretimi için tasarlanan montaj hatlarının tasarımında karşılaşılmıştır. Ancak teknolojinin hızlı ilerleyişi, artan müşteri istekleri gibi etkenlerden dolayı günümüzdeki durum, sanayi inkılabının olduğu bu zamanlardan farklılık arz etmektedir. Ortaya çıkan bu etkenler çeşitli ihtiyaçlara cevap verebilmesi açısından, farklı tip yerleşimlere veya daha karışık modellerin yer aldığı çeşitli üretim metotları ile hayata geçirilmiştir. Bu ilerlemelerden etkilenen ve daha gelişmiş bir hal alan montaj hatları da, günümüzde hala önemini koruyan en önemli üretim sistemleri arasında yer almaktadır.

Bir ürünü oluşturan küçük parçaların planlı olarak belirlenmiş bir sıraya uygun olarak birleştirilmesi işlemi montaj olarak isimlendirilirken, bu işlemlerin operatörler tarafından gerçekleştirildiği özel alanlar istasyon olarak nitelendirilir. Her bir istasyonda, montaj işlemlerinin yapılması için verilen süreye çevrim zamanı denir. Büyük miktar talepli ve belirli bir standartta son ürünlerin elde edilmesi için gerçekleştirilen montaj sürecinin, planlı olarak belirli bir sıraya göre yapıldığı ve konveyör veya benzeri taşıma sistemleri yardımı ile istasyonlar arasında taşındığı ardıl sürece montaj hattı denir. Hat boyunca işlemlerin uygulanması için görevlerin, montaj işlemlerine bağlı oluşan çeşitli kısıtlar göz önünde bulundurularak, bir veya daha fazla amaca yönelik, iş istasyonlarına atanmasına Montaj Hattı Dengeleme Problemi(MHDP) denir.

Gelişen teknolojinin ve yeni üretim stratejilerinin de gereksiniminden dolayı montaj

hatları çeşitli tiplerde karşımıza çıkmaktadır. Bunlardan bir tanesi de hat boyunca bir istasyonda birden fazla operatörün aynı ürün üzerinde montaj işlemini gerçekleştirebildiği hatlardır.

Otobüs, traktör ve araba benzeri ürünlerin montajının tek operatörlü montaj hatlarında yapıldığını düşündüğümüzde çok sayıda istasyona gereksinim duyulacaktır. Buna bağlı olarak, oluşan istasyonların yerleşimi için daha büyük boyutta alanlara ihtiyaç ortaya çıkacaktır. Büyük boyutlu bir ürün üzerinde gerçekleştirilen montaj işleminde, birbirlerinin çalışma alanlarını işgal etmeyecek şekilde operatör atanmasına izin verilmemesi hattın akış süresi ve kullanım alanı olarak verimsiz bir yapı ortaya çıkmasına sebep olacaktır. Bu tarz dezavantajların giderilmesi amacı ile son yıllarda bir ürün üzerinde, eş zamanlı olarak birbirlerini engellemeden farklı montaj işlemlerini yapan, iki veya daha fazla operatörün çalışabildiği Çok-Operatörlü Montaj Hatları (ÇOMH) ortaya çıkmıştır.

Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında, ÇOMH ile ilgili olarak, problemlerin ve çözüm önerilerinin ortaya konması son birkaç yıldır ele alınmaktadır. Bu çalışmalar problem yapısını genel olarak ortaya koymasına rağmen, gerek iş yükü dengesi, gerek hat boyunca oluşabilecek özel gereksinimler ve bu gereksinimlere bağlı çeşitli kısıtların göz ardı edilmesi ile gerçek hayat uygulamaları için sınırlı bir çözüm sağlayacağından, problemin farklı niteliklerde ele alınmasına ihtiyaç doğurmaktadır.

Yapılan montaj hattı çalışmalarının gerçek hayat problemleri ile uygulanabilirliği kısıtlı sayıda olduğu bilinmektedir. Bunun en önemli nedenlerinden birisi çözüm aranılan problemin çeşitli varsayımlar altında bazı önemli unsurların ihmal edilerek dengelenmeye çalışılmasıdır. Bunlardan bir tanesi ve ÇOMHD problemleri için ihmal edileni de iş yükü dengesidir. İstasyon boyunca iş yükü dengesinin de göz önünde bulundurulması operatörlerin eşit veya birbirine yakın oranda iş yoğunluklarının bulunmasında ve hat boyunca operatör verimliliğinin artmasında katkı sağlamaktadır.

Aynı zamanda, literatürde çok-operatörlü montaj hattı dengeleme problemleri, tüm

işlerin tüm operatörler tarafından yapılabildiği durum için incelenmiştir. Oysa gerçek hayat uygulamalarında otobüs, kamyon gibi karmaşık yapıya sahip ürünlerin üretiminde döşeme takımı, elektrik ve elektronik aksam takımı, özel kaynak takımı vb. gibi çeşitli spesifik gereksinime ihtiyaç duyulan işler vardır. Bu işlemler klasik dengeleme prosedüründe ihmal edilerek tüm operatörler tarafından yapılabildiği kabul edilir ve istasyonlardaki operatörlere atanır. Bununla beraber istasyon boyunca, gerek hat gereksinimleri gerek iş parçacıkları gereksinimlerinde doğacak çeşitli engellerinde de dengeleme de önemli rol oynadığı görülmektedir. Hat boyunca oluşan bu durumlar, MHD problemleri için çeşitli ek kısıtları da beraberinde getirmektedir. ÇOMHDP de, uygulamada etkinliğini koruması açısından, bu tarz atama kısıtlarının göz önünde bulundurulduğu durumlar altında incelenmesinin gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Bu sebeple, bu çalışma kapsamında Çok-Operatörlü Montaj Hattı Dengeleme Problemleri (ÇOMHDP) iş yükü dengesi ve çeşitli atama kısıtları altında ele alınarak çözüm önerileri sunulmuş ve literatürde tespit edilen boşluk belirli ölçüde doldurulmaya çalışılmıştır.

Çalışmanın akışı şu şekilde organize edilmiştir. İkinci bölümde ÇOMHDP ile ilgili yapılan literatür araştırması detaylı bir şekilde verilmiştir. Bununla beraber gerçek hayat uygulamalarında karşılaşılan ve çeşitli MHD' de ortaya konan atama kısıtları ve iş yükü dengesi ile ilgili literatür bilgisi sunulmuştur.

Üçüncü bölümde, MHD, temel kavramlar ve terminoloji, prensipleri ve sınıflandırmaları çeşitli başlıklar halinde ortaya konmuştur. Bu amaçla, ÇOMHDP iş yükü dengesi göz önünde bulundurulması durumu sunularak, problem ile ilgili olarak notasyonlar ve matematiksel model sunulmuştur. Aynı zamanda, kalifiye veya özel işçi guruplarının içerisinde yer aldığı ÇOMHDP için bir matematiksel model geliştirilerek, aynı başlık altında da problem için bir sezgisel yöntem önerilmiştir. Bunlara ek olarak, literatürde ve gerçek hayat uygulamalarında sıkça karşılaşılan çeşitli atama kısıtları altında ÇOMHDP ortaya konmuştur. Bu problem için matematiksel model ve Tabu Arama Algoritması (TAA) tabanlı bir meta sezgisel önerilmiştir.

Çalışmanın dördüncü bölümünde, araştırma bulguları ve tartışmalar yer almaktadır. Öncelikle iş yükü dengeli ÇOMHDP ele alınarak, literatürde sunulan model ile önerilen model sonuçları karşılaştırılmış ve önerilen modelin iş yükü dengesi açısından etkinliği çeşitli test problemleri üzerinde gösterilmiştir. Yine aynı bölümde, kalifiye iş gücüne ihtiyaç duyan ÇOMHDP ele alınarak, önerilen matematiksel model ile küçük boyutlu test problemleri üzerinde sonuçları raporlanmıştır. Matematiksel modelin orta ve büyük boyutlu test problemleri üzerinde etkinlik gösterememesinden dolayı, probleme bir sezgisel yöntem ile çözüm aranmıştır. Sezgisel yöntem ile alınan sonuçlar, küçük boyutlu test problemleri üzerinde matematiksel model ile alınan sonuçlar üzerinde karşılaştırılmış ve etkinliği gösterilmiştir. Bunun yanı sıra önerilen sezgisel yöntem ile orta ve büyük test problemleri için çözüm sonuçları raporlanmıştır. Çalışmanın devamı olarak, atama kısıtları altında ÇOMHDP için sunulan matematiksel model ile küçük boyutlu test problemleri üzerinde alınan sonuçlar, probleme uyarlanan TAA sonuçları ile karşılaştırılarak etkinliği gösterilmiştir. TAA ile orta ve büyük boyutlu test problemleri üzerinde alınan sonuçlarda ayrıca rapor edilmiştir.

Son olarak beşinci bölümde, yapılan çalışma ve sonuçlar ile ilgili değerlendirmeler yapılmış olup, bu tecrübeler ışığında gelecekte yapılabilecek çalışmalardan bahsedilmiştir.



## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Montaj hatları ilk defa 1913 yılında Henry Ford tarafından geliştirilip olup, MHD problemi ilk olarak Helgeson *et al.* (1954) tarafından çalışılmıştır. Bununla beraber ilk defa Salveson (1955) tarafından tek modellenmiş basit montaj hattı dengeleme problemi için matematiksel olarak formüle edilerek sunulmuştur. Bu çalışmaların öncülüğü ile çeşitli teknolojik gelişmeler ve ihtiyaçlar doğrultusunda MHDP literatürde artık daha sık karşılaşılan bir problem haline almıştır. Bu çalışmalarda (Buxey *et al.* 1973; Shtub and Dar-El 1989; Ghosh and Gagnon 1989; Rekiek *et al.* 2002; Boysen *et al.* 2009; Rashid *et al.* 2011) çeşitli alt ve üst sınır hesaplamalarından, matematiksel modellerden, çözüm yöntemlerinden, sezgisel ve meta-sezgisel algoritmalarından, farklı amaca yönelik hatlardan bahsedilmiştir. Bunların yanı sıra MHDP'ye yönelik çeşitli literatür taramalarında (Baybars 1986; Erel and Sarin 1998; Scholl and Becker 2006; Becker and Scholl 2006; Boysen *et al.* 2009; Sivasankaran and Shahabudeen 2014) bu çalışmalar içerisinde yer almaktadır. MHDP ile ilgili olarak dikkate alınan amaca, çözüm yöntemine ve problem tipine göre literatürde yer alan bazı önemli çalışmalar **EK-1**'de sunulmuştur.

Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında, MHD problemleri ile ilgili çeşitli alanlarda ve farklı çözüm yöntemleri üzerine birçok çalışma karşımıza çıkmaktadır (Sivasankaran and Shahabudeen 2014). Buna rağmen çok-operatörlü montaj hatları çeşitli sanayi dallarında kullanılmasına rağmen literatürde son birkaç yıldır ele alınmaktadır (Kellegöz 2011). İlk kez Dimitriadis (2006) tarafından incelenen bu MHD problemi, her bir istasyonda eş zamanlı olarak aynı ürün üzerinde işlem yapabilen operatörlerin bulunduğu yeni bir sınıf olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu problem sınıfı, gerçek hayat uygulamalarında, otobüs, otomobil, traktör vb. hatlarda, sıkça kullanılmasına rağmen literatürde, bu konu hakkında yapılan çalışmalar son birkaç yıldır yer almaya başlamıştır (Dimitriadis 2006). Bu bölümde ÇOMHDP ile ilgili literatür çalışmalarına yer verilmekle beraber, çeşitli gerçek hayat uygulamalarında ve MHDP'ye ait literatür çalışmalarında karşımıza çıkan ancak ÇOMHDP'de göz ardı edilen çeşitli çalışmalara da atıflarda bulunarak bu alandaki boşlukların gösterilmesi hedeflenmiştir.

ÇOMHDP ile ilgili literatürde bilinen ilk çalışma Dimitriadis (2006) tarafından ortaya konulmuştur. Bu çalışmada (Dimitriadis 2006) hat boyunca oluşacak toplam istasyon sayısının, buna bağlı olarak da alan ihtiyacının en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, Hoffmann (1963) tarafından önerilen sezgisel yöntemin probleme uyarlanması ile bir çözüm yöntemi sunulmuştur. Sunulan sezgisel yöntem literatürde var olan test problemleri üzerinde denenerak basit montaj hattı dengeleme problemi sonuçları ile karşılaştırılmış ve birçok problem seti üzerinde istasyon sayısı, operatör sayısı değişimi olmaksızın, en küçüklenmesi sağlanmıştır. Aynı zamanda çalışmada, bir gerçek hayat uygulaması üzerinde de yöntem denenerak sonuçları rapor edilmiştir.

Becker and Scholl (2009) istasyon sayılarının ve çevrim süresinin verildiği, operatör sayısının en küçüklendiği değişken çalışma alanlı bir ÇOMHDP ele alınmıştır. Problem çözümü için, Scholl ve Klein (1997) tarafından ele alınan SALOME yöntemini esas alan bir dal sınır algoritması geliştirilmiştir. Bununla beraber çalışma içerisinde sezgisel bir yöntem de önermişlerdir. Bu çözüm önerileri, çift taraflı montaj hattı dengeleme problemleri için, Kim *et al.* (2000) ve Baykasoğlu and Dereli (2008)'nin sunmuş oldukları sonuçlar ile karşılaştırılarak yöntemin etkinliğini göstermişlerdir. Bununla beraber daha önceden test edilmemiş problem setleri üzerinden alınan sonuçlarda rapor edilmiştir.

Cevikcan *et al.* (2009) çalışmalarında karışık modelli bir MHDP için doğrusal olmayan bir matematiksel model ile beraber dikey ve yatay dengelemenin içerisinde olduğu çeşitli adımları içeren bir sezgisel yöntem önermişlerdir. Önerdikleri yöntem bir traktör fabrikasının montaj hattı üzerinde uygulanarak sunulmuştur.

Fattahi *et al.* (2009) yaptıkları çalışmadan ÇOMHD problemleri için karma tam sayılı bir matematiksel model önermişlerdir. Önerilen modelde amaç fonksiyonu iki adet hedef içermektedir. Bu hedeflerden öncül olanı atan operatör sayısının en küçüklenmesi, ikincil olanı ise belirli bir katsayı çarpanı ile istasyon sayısının en küçüklenmesi olarak tasarlanmıştır. Bununla beraber, probleme karınca kolonisi algoritması tabanlı bir meta-sezgisel çözüm yöntemi de önerilmiştir. Önerilen

matematiksel model sonuçları ile meta-sezgisel yöntem sonuçları karşılaştırılarak, meta-sezgisel yöntemin etkinliği gösterilmiştir. Bunun yanı sıra Dimitriadis (2006) tarafından rapor edilen test problemleri sonuçları ile de karşılaştırılarak daha iyi sonuçlar alındığı çalışmalarında sunulmuştur.

Xiongwen and Qifu (2011) çalışmalarında ÇOMHD problemleri için bir matematiksel model önermişlerdir. Bununla beraber genetik algoritma tabanlı bir karma sezgisel yöntemde çalışmalarında sunarak literatürde yer alan çeşitli test problemleri üzerinde çeşitli çevrim zamanları için alınan sonuçlar raporlanmıştır.

Kellegöz and Toklu (2012) çalışmalarında ÇOMHDP için Jumper ismini verdikleri bir dal-sınır algoritması geliştirmişlerdir. Çalışma kapsamında önerdikleri Jumper ile Becker and Scholl (2009) tarafından sunulan ve VVsolver isimli dal sınır algoritmasının probleme uyarlanmış hali ile kıyaslayarak, sundukları Jumper dal-sınır algoritmasının etkinliğini çeşitli büyüklükteki test problemleri üzerinde göstermişlerdir.

Roshani *et al.* (2013) çalışmalarında ÇOMHD problemleri için, tavlama benzetimi temelli bir meta-sezgisel yöntem sunmuşlardır. Bu algorithmada düzgünlük indeksi, hat etkinliği ve açılan istasyon sayıları gibi çeşitli kriterler göz önüne alınarak tek bir amaç fonksiyonu altında toplanmıştır. Sunulan sezgisel algoritma Fattahi *et al.* (2011) ve Dimitriadis (2006) tarafından rapor edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak daha etkin sonuçlar verdiği çalışmalarında sunulmuştur.

Kazemi and Sedighi (2013) çalışmalarında maliyet tabanlı ÇOMHD problemini ele almışlardır. Bu problem çözümü için matematiksel bir model önermekle beraber, parçacık sürü optimizasyonu ve genetik algoritma tabanlı sezgisel çözüm önerisinde bulunmuşlardır. Önerilen sezgisel yöntemin parametre ve operatör seçimlerinde deney tasarımı yöntemi kullanmışlar ve önerilen yöntemlerin etkinliğini çalışmalarında raporlamışlardır.

Kellegöz and Toklu (2015) yaptıkları çalışmada ÇOMHD problemleri için karma tam

sayılı bir matematiksel model önermişlerdir. Bu model ile küçük boyutlu test problemleri üzerinde optimum sonuca ulaşmalarına rağmen, orta ve büyük boyutlu test problemlerinde yetersiz kaldığı üzerinde durmuşlardır. Bu amaçla, öncelik kurallarına dayalı bir kurucu sezgisel ile etkinliği artırılmış genetik algoritma tabanlı bir meta-sezgisel yöntem sunulmuştur. Ayrıca çalışmada test problemleri sonuçları ve CPU zamanları da rapor edilmiştir.

Roshani and Giglio (2015a) çalışmalarında Tip II ÇOMHDP için sabit istasyon sayısı altında çevrim zamanını en küçükleyen bir algoritma önermiştir. Bu algoritma tavlama benzetimi temelli olup, etkinliği Dimitriadis (2006) tarafından sunulan gerçek hayat uygulaması ve literatürdeki çeşitli boyutlarda test problemleri üzerinde gösterilmiştir.

Roshani and Giglio (2015b) çalışmalarında maliyet tabanlı ÇOMHD problemi için bir matematiksel model önermişlerdir. Önerilen matematiksel model sonuçları küçük boyutlu test problemleri üzerinde sonuçları alınarak rapor edilmiştir.

Kellegöz (2016) çalışmasında ÇOMHD problemleri için bir karma tamsayılı matematiksel model önererek, Fattahi *et al.* (2011) tarafından sunulan karma tamsayılı matematiksel modelleme ile karşılaştırmıştır. Bu karşılaştırmada daha az sayıda değişken ve kısıt kullanmasından dolayı daha etkin bir model olduğu gösterilmiştir. Aynı zamanda problem için tavlama benzetimi tabanlı bir meta-sezgisel yöntem de önerilmiştir. Bununla beraber algoritma için çeşitli komşuluk üretme prosedürlerinden bahsedilerek, önerilen meta-sezgisel yöntemin etkinliği Fattahi *et al.* (2011) tarafından sunulan karınca kolonisi algoritması sonuçları ile karşılaştırılmış ve daha iyi sonuçlar aldığı raporlanmıştır.

Roshani and Giglio (2016) çalışmalarında ÇOMHD problemleri için birincil amacı çevrim zamanını ikincil amacı da istasyonda bulunan operatör sayısının en küçüklenmesini hedefleyen bir karma tam sayılı matematiksel model önermişlerdir. Bununla beraber tavlama benzetimi tabanlı ISA ve DSA isimli iki adet meta-sezgisel yöntem önererek, sonuçlar bu iki yöntem arasında karşılaştırılmıştır. Raporlanan

sonuçlarda DSA'nın, ISA'ya göre çözüm ve zaman açısından daha kaliteli bir yöntem olduğu gösterilmiştir.

Bahsedilen çalışmalarla beraber, literatürde çeşitli MHDP üzerinde uygulanmış ve öneminden bahsedilmiş olan operatörler arasındaki iş yükü dengesinin de göz önünde bulundurulduğu çalışmalar bu kapsamda sunulmuştur.

Rachamadugu and Talbot (1991), çalışmalarında literatürde genellikle montaj hattı dengeleme problemleri üzerinde verilen istasyon sayısına bağlı olarak çevrim zamanı en küçüklenmesi veya verilen çevrim zamanına karşın istasyon sayısının en küçüklendiğinin üzerinde durarak, operatörlerdeki iş yükü dengelerinin göz önünde bulundurulmadığını vurgulamıştır. Bu amaçla bir sezgisel algoritma önererek iş yükü dengelerinin etkin bir şekilde sağlandığı sonuçlar, çalışmasında sunulmuştur.

Hwang and Katayama (2009) iş yükü dengesinin montaj hattı dengeleme problemleri için öneminden bahsetmiştir. Yaptıkları çalışmada U tipi karışık modelli hat dengeleme problemi için iş yükü dengesini de göz önünde bulunduran, genetik algoritma tabanlı yöntem geliştirerek literatürde var olan test problemleri üzerinden sonuçları sunulmuştur.

Nearchou (2008) çalışmasında, basit montaj hattı dengeleme problemi için çok amaçlı bir sezgisel yöntem önermiş olup, amaç olarak denge gecikmeleri ve çevrim zamanı en küçüklemesi ile beraber eşit iş yükü dağılımını içermektedir. Literatürde var olan test problemleri üzerinde, önerdiği yöntemin etkinliğini göstermiştir.

Nearchou (2011) yaptığı çalışmada basit montaj hattı dengeleme problemleri için parçacık sürü optimizasyon temelli bir meta-sezgisel yöntem önermiştir. Önerilen yöntemde çevrim zamanı en küçüklenmesi ile beraber olabildiğince eşit iş yükü dağılımını da çalışmasında göz önünde bulundurmaktadır.

Uddin and Lastra (2011), çalışmalarında iş yükü denge kısıtlarının öneminden

bahsederek, karışık modelli montaj hattı dengeleme problemleri ile ilgili olarak bir çalışma sunmuş ve sonuçları raporlamıştır.

Lopez (2014) çalışmasında iş yükü dengesiz montaj hatları üzerinde durarak, iş yükü dengesinin öneminden bahsetmiştir. İş yükü dengesi ile ilgili geniş bir literatür çalışması sunmuşlardır.

ÇOMHDP'ye benzerliği ile karşımıza çıkan gurup tabanlı montaj hattı dengeleme problemleri Johnson (1991) tarafından sunulmuştur. Çalışmasında çok operatörlü montaj hatları için montaj takımlarından bahsederek kalifiye işçi tabanlı montaj hattı dengeleme problemi için bir dal-sınır algoritması sunmuştur. Ayrıca çalışmasında, montaj hattı üzerinde çalışacak olan takım veya operatör guruplarını üç kategoriye ayırmıştır. Bunlardan ilki, tüm işlerin tüm operatörler tarafından yapılabildiği, ikincisi tüm işlerin sadece o işlerde uzman olan, yani kalifiye operatörler tarafından yapılabildiği ve üçüncü olarak da bazı işlerin özel operatörlere gereksinim duyduğu, bazılarının ise tüm operatörler tarafından yapılabilir olduğu montaj hatları olarak sınıflandırmıştır.

Corominas *et al.* (2008), çalışmalarında kalifiye ve kalifiye olmayan (kiralık) operatörlerin beraber çalıştığı bir motosiklet üretimi yapan gerçek hayat uygulamasını ele alarak, problem için 0-1 tam sayılı matematiksel model önermişlerdir. Önerilen matematiksel model de amaç olarak kalifiye olmayan (kiralık) operatörlerin en küçüklenmesi hedeflenmiştir.

Bu çalışmalarların yanı sıra, literatürde farklı MHDP'de uygulanmasına rağmen ÇOMHDP için henüz net olarak ortaya konmayan atama kısıtları ile ilgili çeşitli çalışmalarda bulunmaktadır.

Becker and Scholl (2009) tarafından yapılan çalışmada ÇOMHDP için çeşitli montaj durumları altında matematiksel modeli verilmiştir. Bu model de verilen montaj durumları istasyonda bulunan görevlerin aynı operatör veya aynı istasyonda farklı

operatörler tarafından yapılabilir olduğu durumlar için incelenmiştir.

Kellegöz (2011) çalışmasında ÇOMHD problemleri için önerdiği modelde işçi uyumsuz, istasyon uyumsuz, negatif bölgeleme kısıtları, aynı işçi veya aynı istasyona atanacak görevlerden bahsederek matematiksel olarak ifade etmiştir. Test problemleri üzerindeki çalışmalarında bu kısıtların tamamını ihmal ederek sadece öncelik kısıtlarını dikkate almıştır.

Bu çalışmaların yanı sıra, Boysen *et al.*(2007), çalışmalarında montaj hattı dengeleme problemlerini sınıflandırarak çeşitli atama kısıtlarının olduğu durumları ortaya koymuşlardır.

Scholl *et al.* (2010) çalışmalarında çeşitli atama kısıtlarından detaylı bir biçimde bahsetmiş ve basit MHDP için çeşitli atama kısıtları altında bir matematiksel model önermişlerdir. Aynı zamanda problem çözümü için bir dal-sınır algoritması temelli kesin çözüm önerisi sunmuşlardır.

Purnomoa *et al.* (2013), çalışmalarında çift taraflı montaj hattı dengeleme problemleri Tip-II'yi çeşitli atama kısıtları altında inceleyerek, çözüm amacı verilen istasyon sayısına bağlı olarak çevrim zamanını en küçükmek olan bir matematiksel model önerisinde bulunmuşlardır. Bununla beraber problem için genetik algoritma tabanlı bir sezgisel yöntem önererek, daha hızlı ve etkin sonuçlar elde ettiklerini çalışmalarında sunmuşlardır.

Yuan *et al.* (2015) çalışmalarında çift taraflı montaj hattı dengeleme problemleri üzerinde oluşabilecek çeşitli kısıtlardan kısıtlarından bahsetmiş ve bu kısıtların problemi daha karmaşık bir hale getirdiğini söylemişlerdir. Problem için tam sayılı matematiksel model ile birlikte LAHC isimli bir meta sezgisel yöntem önermişlerdir. Test problemleri üzerinde yaptıkları çalışmalarda, LAHC'in önerilen matematiksel model ve alt sınırlar üzerinde daha etkili sonuçlar verdiğini rapor etmişlerdir.

Ağpak and Zolfaghari (2015), çalışmalarında paralel çift taraflı montaj hattı dengeleme problemleri üzerinde genişletilmiş şekli ile bahsetmişlerdir. Sunulan problem, maliyet tabanlı, zaman ve alan kısıtlarının yanı sıra çeşitli atama kısıtlarını da içermektedir. özüm için bir karma tam sayılı matematiksel model önerilerek, sonuçları çalışmada sunulmuştur.

Bu alışmaları ışığında, literatürde farklı MHDP'ye uygulanmış olup, ÇOMHDP için literatürde karşılaşılmayan veya detaylı olarak ortaya konmayan çeşitli durumların söz konusu olduğu görölmektedir. Bunlar, operatörler üzerindeki iş yükü dengesi, hat boyunca farklı nedenlerden dolayı oluşabilecek ekstra kısıtlamalar veya kalifiye operatör gibi unsurlar olduğu yukarıdaki literatür taramasında gösterilmeye çalışılmıştır.



### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Montaj Hattı Dengeleme Problemleri

Üretim, bir hammadde ya da yarı mamul üzerinde onun fiziksel veya kimyasal yapısının değiştirilmesi sonucunda değer eklenmesi süreci olarak nitelendirilebilir. Bunun yanı sıra, fayda oluşturan çeşitli etmenlerin bir araya getirilmesi olarak da tanımlanabilir. Üretim sırasında, süreçlerin büyük kısmının ortaya konulduğu ve belirli bir akışın sağlandığı bütünleşik yapılarda üretim sistemi olarak anılmaktadır. Üretim sistemleri, ürün çeşit ve miktarlarına göre günümüzde farklı şekillerde karşımıza çıkabilmektedir.

Bu sistemlerden bir tanesi olan seri üretim, büyük hacimli talepler için uygulanan bir üretim şeklidir. Seri üretimde ürün akışının olması ve tesislerin üretilen ürüne göre tasarlanması, bu tip üretime has durumlardır. Bu tarz üretim sistemlerinde bir başlangıç noktasından ilk hareketine başlayan hammadde, yarı mamul veya parça gibi bileşenler, belirli bölümlerde işlemlere tabi tutularak son ürün haline dönüşür ve sistemden çıkarlar. Seri üretim sistemlerinde tekrarlı işlemlerin yüksek seviyede olması nedeniyle, uzmanlaşma ve kalite seviyesi yüksek buna bağlı olarak da üretim maliyetleri düşüktür. Bu tarz üretim sistemlerinin temel bileşenlerinden bir tanesi montaj hatlarıdır (Derya 2012).

Günümüzde montaj hatları çeşitli üretim endüstrisinde kullanılan üretim teknolojilerinden birisidir. Montaj hatları ilk kez kullanılmaya başlandığı zamanlardan bu yana teknolojik ilerlemeler, müşteri talepleri ve gereksinimlerindeki değişimler ve işletmelerin rekabet avantajı sağlama çabaları sonucunda çeşitli biçimlerde karşımıza çıkmaktadır. Gündelik hayatımızda sıkça karşılaştığımız çeşitli ürünlerin (otomobil, bilgisayar, çamaşır makinesi, buzdolabı, televizyon vb.) üretimi farklı özellikteki montaj hatları kullanılarak üretilmektedir.

Montaj hatları getirdiği birçok avantaj ile beraber, mühendislik açısından üretimi en verimli Şekilde meydana getirmek amacı ile düzenlenmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu amaçla, montaj hattı boyunca işlemlerin uygulanması için görevlerin, montaj işlemlerine bağlı oluşan çeşitli kısıtlar göz önünde bulundurularak, bir veya daha fazla amaca yönelik, iş istasyonlarına atanmasına Montaj Hattı Dengeleme Problemi (MHDP) olarak adlandırılır.

### **3.1.1. Temel kavramlar ve terminoloji**

Bu bölümde montaj hattı dengeleme problemlerine ait bazı kavramların açıklanmasına yer verilecektir.

#### **Montaj iş oğesi**

Bir montaj hattında nihai ürüne ulaŐılmak amacı ile parçalanamayan en küçük yapısına görev denir. Örneğin, bir otomobil üretiminde tampon kısmının gövdeye yerleŐtirilerek montaj işleminin gerçekleştirilmesi bir görev olarak adlandırılmaktadır.

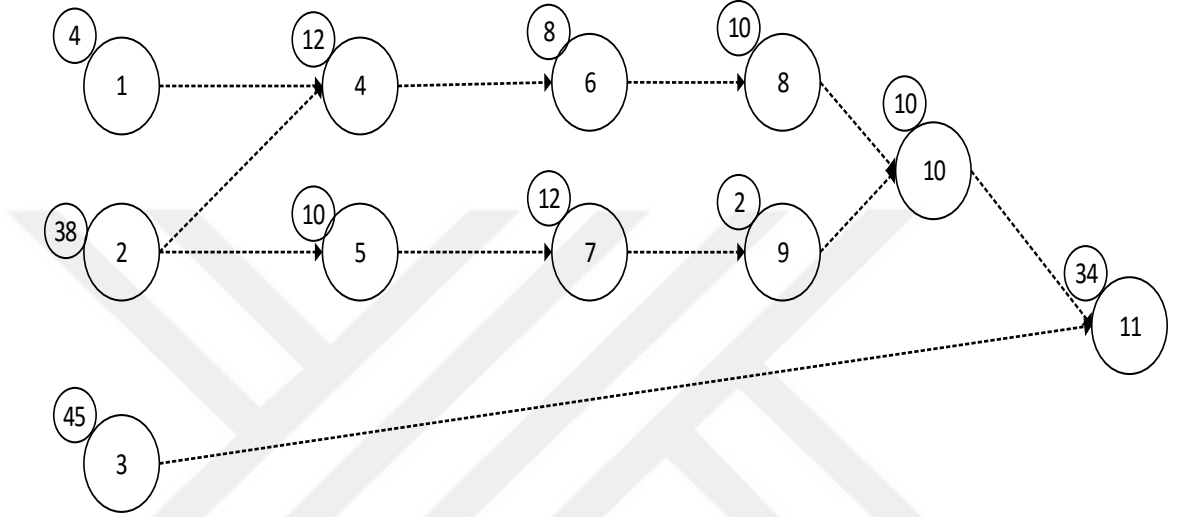
#### **Montaj iş oğresi süresi**

Belirlenen görevlerin tamamlanabilmesi için gerekli olan süredir. Bu görev süreleri, MHDP’de sabit ve belirli olarak ele alınabildiği gibi, belirli bir dağılıma uyduğu durumlar olarak da karşımıza çıkabilmektedir.  $t_i$  görevin montajının tamamlanabilmesi için gereken süre  $t_i$  olarak ifade edilir (Scholl 1999).

#### **ncelik diyagramı**

Montajı yapılacak ürüne dair görevlerin hangi sıra ve süre ile yapılması gerektiğini gösteren bir Őekilsel ifadedir. ncelik diyagramında düğümler görevleri temsil eder. Bu düğümler çeşitli önceliklerle birbirlerine bağlı veya bağımsızdırlar. Düğümler arası

bağlantılar oklar yardımı ile gösterilir ve öncelik ilişkilerini gösterir. Okun ucunun değdiği düğüm, çıktığı düğüme ait olan ardılık ilişkisini gösterir. Düğümler üzerindeki sayılar görevlere ait işlem sürelerini gösterir. Şekil 3.1’de, 11 görevli bir öncelik diyagramına ait örnek gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Öncelik diyagramı örnek gösterim.

### Öncelik matrisi

Öncelik ilişkilerinin matematiksel olarak bir matris yardımı ile gösterilmesine denilmektedir.  $n$  düğümlü bir öncelik diyagramında öncelik matrisi boyutu  $n \times n$  boyutunda olup,  $j$  görevi  $i$  görevinin ardılı ise matrisin  $i$ . satır,  $j$ . sütunu 1 değeri alır, aksi durumda 0 değeri yazılır. Şekil 3.1’de verilen öncelik diyagramına ait öncelik matrisi Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1
2		-	0	1	1	1	1	1	1	1	1
3			-	0	0	0	0	0	0	0	1
4				-	0	1	0	1	0	1	1
5					-	0	1	0	1	1	1
6						-	0	1	0	1	1
7							-	0	1	1	1
8								-	0	1	1
9									-	1	1
10										-	1
11											-

**Şekil 3.2.** Şekil 3.1'e ait öncelik diyagramının öncelik matrisi şeklinde gösterimi

### **Toplam zaman**

Üretilcek ürünün, montajı için gerekli olan tüm görevlerin belirli tamamlanma zamanlarının toplamı olarak ifade edilir.

### **İş istasyonu**

Hat üzerinde çeşitli görevlerin gerçekleştirildiği hat parçasına denir. İş istasyonlarının birleşmesi ile montaj hattı meydana gelir. İstasyon aynı zamanda operatörlerin, montaj işlemini gerçekleştirebilecekleri ekipmanları da barındırır.

### **İstasyon zamanı**

Montaj hattında istasyona atanan görevlerin sürelerinin toplamına eşittir. k. istasyona atanan işlerin toplam süreleri  $S_k$  olarak ifade edilir.

### **Çevrim süresi**

Montaj hattı boyunca, bir istasyonda görev veya görevlerin gerçekleştirilebilmesi için verilen maksimum zaman çevrim zamanı olarak adlandırılır. Çevrim zamanı, o hattı oluşturan istasyon zamanına eşit veya daha büyüktür. Montaj hatlarındaki en büyük zaman dilimine ait görev süresi çevrim zamanı için bir alt sınırı teşkil eder. Aynı zamanda oluşan talep ile de çevrim zamanı için bir üst sınır meydana gelir. Çevrim zamanı C ile gösterilir.

### **İstasyon boş zamanı**

İstasyon boş zamanı, çevrim süresi ile istasyon süresi arasındaki farktır. Bu fark istasyonda bulunan operatörün boş bekleme zamanı gösterir.

### **Denge kaybı**

Hat boyunca tüm istasyonlardaki boş zamanların toplamına eşit olup aynı zamanda toplam boş zaman olarak da ifade edilebilmektedir (Kellegöz 2011).

### **Hattın etkinliği**

Hat etkinliği bir montaj hattı dengeleme problemlerinde bir verimlilik ölçütü olarak kullanılır. Toplam görev sürelerinin, açılan istasyonların toplam sürelerine oranı ile hesaplanır.

### **Sıra kuvveti ve esneklik Oranı**

Bu iki ölçüt, montaj hattı dengeleme problemlerinin zorluk derecelerinin değerlendirilmesine olanak sağlar. Öncelik matrisinin kullanılması ile öncelik ilişkilerinin sayısını belirler. Esneklik Oranı (EO), Sıra Kuvvetinin (SK) tamamlayıcı

niteliğindedir. İki değerde 0-1 arasında değerler almakta olup  $EO=1-SK$ 'dır. SK değeri Denklem 3.1 yardımı ile hesaplanır.  $\sum_{i=1}^n Q_i$  öncelik matrisinde 1 değerlerinin toplamını göstermektedir.

$$SK = \frac{2 \cdot \sum_{i=1}^n Q_i}{n \cdot (n-1)} \quad (3.1)$$

### Düzensünlük indeksi

İstasyonda bulunan operatörlere atanan görevlerin, iş yükü açısından eşit dağılıp dağılmadığının bir ölçütüdür. Düzensünlük İndeksi (DI), Denklem 3.2 ile hesaplanır.

$$SI = \sqrt{\sum_{i=1}^k (C - t(S_i))^2} \quad (3.2)$$

### Montaj hattı dengeleme problemi

Montajı yapılacak ürüne ait bilgilerin (görevler, görevlere ait süreler ve bu görevler arasındaki öncelik ilişkileri) ışığında, montaj hattı için belirlenen performans kriter veya kriterlerinin en iyilenmesini amaçlayacak şekilde istasyonlara atanmasına montaj hattı dengeleme problemi denir.

#### 3.1.2. Montaj hatları için temel prensipler

Montaj hatlarının düzenlenmesi aşağıda sunulan prensiplerin en iyi uyumuna göre yapılmaktadır (Çerçioğlu 2009).

- İşgücü prensibi: Cevap aranan sorular içerisinde, montaj hattı boyunca hangi miktarda işgücüne veya işçiye gereksinim olduğu, bunların nerelerde ve ne kadar bulundurulması gerekliliği yer almaktadır.

- İş akışı prensibi: Görevlerin ve buna bağlı görevlerin belirli bir süreci takip etmesi istenmektedir. Bu durum süreklilik açısından da önem arz etmektedir.
- En küçük hareket uzaklığı prensibi: Montaj hattı boyunca taşıma mesafelerinin oluşabilecek darboğaz, depolama ve maliyet açısından minimum seviyede olmaları gerekmektedir.
- Sabit yol prensibi: Görevlerin tamamı, son ürüne ulaşıncaya kadar aynı yol üzerinde hareket etmelidir.
- İşlemlerin eş zamanlı sürdürülmesi prensibi: Montaj hattı boyunca tüm işlemler tüm istasyonlarda eş zamanlı yapılır.
- Parçaların değişebilirliği prensibi: Montaj işlemi sırasında işlem akışını bozmadan bazı parçalar değiştirilebilir olmalıdır.
- Birim işlem prensibi: Son ürün için, tüm işlemler en küçük parçacıklarına ayrılmıştır.
- En küçük işlem süresi: Son ürün oluşumu için montaj işlemi en kısa sürede bitirilmelidir. İşlem sürelerinin sabit olması göz önünde bulundurulduğunda, bu işlem bekleme zamanlarının en küçüklenmesi olarak yapılır.

### 3.1.3. Montaj hatlarında sınıflandırmalar

Montaj hatları için çeşitli faktörler altında, farklı sınıflandırmalar mevcuttur. Bu sınıflandırmalar, model sayısına, kontrol yapısına, otomasyon seviyesine ve yerleşim şekillerine göre çeşitlilikler göstermektedir. Montaj hattı dengeleme problemlerinin sınıflandırmalarına dair detaylı çalışma Boyse *et al.* (2007) tarafından sunulmuştur. MHDP sınıflandırmaları Çizelge 3.1’de sunulmuştur.

**Çizelge 3.1.** Montaj hattı dengeleme problemlerinin sınıflandırılması

Sınıflandırma	Hat Çeşitleri		
Model Sayısına Göre	Tek Modelli	Karışık Modelli	Çok Modelli
Kontrol Yapısına Göre	Gecikmeli	Gecikmesiz	
Otomasyon Seviyesine Göre	Manuel	Otomatik	
Yerleşim Şekline Göre	Düz	U Tipi	Paralel

### **3.1.3.a. Model sayısına göre sınıflandırmalar**

Montaj hattında bir veya birden fazla ürün çeşidinin üretilmesine göre montaj hatları 3 kategoride incelenir. Bunlar; Tek modelli, karışık modelli ve çok modelli montaj hatlarıdır. Bir montaj hattında sadece tek tip ürün üretilmesi durumu ile karşılaşılabılır. Bu tarz montaj hatları tek modelli montaj hatları olarak isimlendirilir. Bir hatta birden çok ürün üretimi aynı anda gerçekleşmesi durumunda bu hatlar, karışık modelli montaj hatları olarak gruplandırılır. Aynı zamanda, bir hat boyunca çok sayıda ürünün montaj işleminin birbiri ardına üretimi ise çok modelli montaj hattı olarak isimlendirilir.

#### **Tek modelli hatlar**

Aynı tip model ya da ürünün yüksek miktarlarda sürekli olarak üretildiği montaj hatlarıdır. Bu tarz hatlarda ürün çeşitliliği en az düzeydedir. Her bir istasyon kendine atanan aynı ürüne ait alt parça montajlarını tekrarlama sureti ile nihai ürüne ulaşılır. Gelişen teknoloji ve müşteri talepleri doğrultusunda bu tarz hatlar günümüzde artık nadiren kullanılan hat çeşitleri arasında yer almaktadır. Şekil 3.3(a)'da tek modelli montaj hattı için örnek gösterim sunulmuştur.

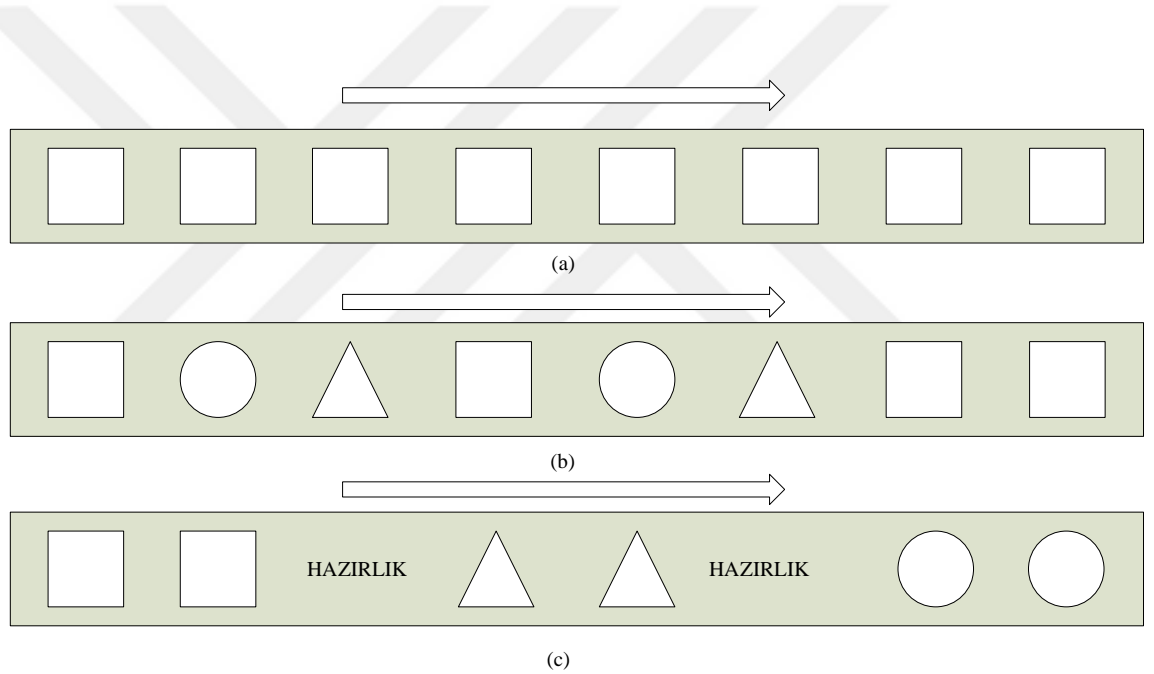
#### **Karışık modelli hatlar**

Aynı anda birden fazla benzerlik gösteren tipteki ürünlerin üretildiği montaj hatlarıdır. Bu tip montaj hatlarının en önemli özelliği, müşteri taleplerine anında karşılık verebilmesidir. Bundan dolayı stoka olan üretim en az seviyededir. Karışık modelli montaj hatlarında görülen dezavantaj ise hat boyunca farklı tiplerdeki ürünlerin ayrı iş parçalarının hat boyunca atanması sonucunda istasyon sayısında artışa sebep olması gösterilebilir. Bu tip montaj hattı dengeleme problemleri daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Aynı zamanda bu dengeleme problemleri için kısa dönemli sıralama problemleri de ortaya çıkmaktadır. Şekil 3.3(b)'de karışık modelli montaj hattı için örnek gösterim sunulmuştur.



### Çok modelli hatlar

Çok modelli hatlarda birbirine benzer nitelik gösteren çok çeşitli ürünlerin üretildiği hatlardır. Bu tip hatlarda üretim partiler halinde yapılmaktadır. Böylelikle üretilen ürünlerin karıştırılmasına izin verilmez. Hat boyunca üretilecek ürün tipindeki değişim, hattın yeniden düzenlenmesini gerektirdiği gibi, hazırlık zamanı ve maliyetleri dikkate alınması esastır. Bundan dolayı ürünlerin çevrimleri ile beraber partilerin sırasının ve büyüklüklerinin de belirlenmesi gerekir. Şekil 3.3(c)'de çok modelli montaj hattı için örnek gösterim sunulmuştur.



**Şekil 3.3.** (a) Tek modelli hatlar (b) Karışık modelli hatlar (c) Çok modelli hatlar

#### 3.1.3.b. Kontrol yapısına göre sınıflandırmalar

Montaj hatları kontrol yapısına göre ikiye ayrılır. Bunlar gecikmeli ve gecikmesiz hatlardır.

### **Gecikmesiz hatlar**

Bu tür hatlarda, hat boyunca açılan istasyonlar için eşit süre tanımlanır. Belirlenen bu sürenin tamamlanması ile ürün bir istasyondan diğer istasyona hareketini gerçekleştirir. Gecikmesiz hatlarda belirli bir çevrim zamanı esas alınarak, görevlerin istasyonlara dağılımı sağlanır. Çeşitli malzeme taşıma ekipmanları bu akışın sürekliliğini sağlar. Bir ürün belirli bir istasyona geldiği zaman operatör tarafından ona özgü görevleri yerine getirerek ürünün istasyonu terk etmesi sağlanır. Bu işlem hattın sonuna kadar tekrar edilir. Bununla beraber görev sürelerinin stokastik yapıda olduğu durumlar için çevrim zamanının sağlanması belirli bir olasılık değeri ile sağlanır. Aynı zamanda istasyonlar arasında çevrim sürelerinin de farklılık gösterdiği gecikmesiz hatlarda bulunmaktadır.

### **Gecikmeli hatlar**

Bu tarz hatlarda gecikmesiz hatların aksine, istasyon sürelerinin çevrim zamanını aşmasına izin verilebilmektedir. Bu da istasyonlar arası ara stok birikimlerine neden olmaktadır. Yavaş çalışan bir istasyonun önünde ara stok oluşması gibi durumlarla karşılaşılabilir. Bu tarz hatlarda iki durum söz konusudur. Tampon doluluğu ve istasyon açığıdır. Tampon doluluğu, bir istasyonda işlem devam ederken bekleyen iş parçalarının kapasiteyi aşması ile oluşur. Bu durumda istasyon, tampon alanı için yer açılıncaya kadar boş bekleme yapacaktır. Bunun yanı sıra istasyonun işleme hazır olmasına rağmen işleme tabi tutulacak iş parçasının olmaması durumu da istasyon açığı olarak nitelendirilir. Bu durumda istasyon, iş parçası gelinceye kadar boş bekleyecektir.

#### **3.1.3.c. Otomasyon seviyesine göre sınıflandırmalar**

Montaj hatları otomasyon seviyesine göre ikiye ayrılır. Bunlar otomatik ve manuel hatlardır.

### **Manuel hatlar**

Bu tarz hatlar iş gücüne dayalı hatlardır. Hat boyunca istasyonlarda belirlenen görevlerin operatörler tarafından yapıldığı hatlardır. Bu tarz hatlar genellikle iş gücü maliyetlerinin, çeşitli makine maliyetlerine oranla daha düşük olduğu durumlarda tercih edilir. Manuel hatlarda yoğun iş gücü olduğundan dolayı bu tip hatlar operatörün fiziksel veya zihinsel durumlarından kolayca etkilenir. Bundan dolayı bu tip hatların görev süreleri genellikle stokastik yapıdadır. Bunun yanı sıra manuel hatlarda sürekli olarak tekrar dayalı işlerin olması operatör için bir deneyim sağlayacaktır. Bu tarz hatlarda dengeleme yapılırken öğrenme etkisi de dikkate alınmalıdır.

### **Otomatik hatlar**

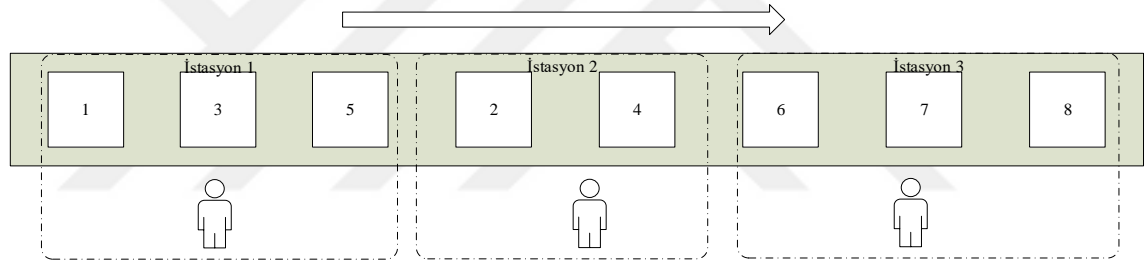
Bu tarz hatlarda istasyonlar arası aktarımlar ve görevler otomatik olarak yapılmaktadır. Manuel hatların büyük boyuttaki ürünlerin üretiminde, operatörler üzerinde ciddi sağlık sorunlarına yol açabileceği durumlar göz önünde bulundurularak tasarlanmış hatlardır. İş gücü maliyetinin, makine maliyetlerinden yüksek olduğu durumlar için kullanılması işletme açısından önemlidir. Montaj hatlarına otomasyonun sağladığı en büyük avantajlardan bir tanesi de görev sürelerindeki değişimlerin çok az olmasıdır. Bundan dolayı hatlarda dengeleme işlemi daha sağlıklı bir şekilde yapılması kolaylaşmakta ve boş bekleme ve gecikmeler en aza indirilebilmektedir.

#### **3.1.3.d. Yerleşim şekline göre sınıflandırmalar**

Montaj hatları, montajı yapılacak ürüne göre veya buna bağlı istasyonların yerleşim biçimlerine göre farklılık gösterebilmektedirler. Bunun yanı sıra hattın kurulacağı alan, maliyet ve makine konumları da yerleşim şekillerinde önemli yere sahiptir. Örneğin, kurulum yapılacak olan fabrika alanının yeterli olmaması durumunda, hattı fabrika içerisinde kıvrımlar yapması ile hattın sürekliliği sağlanabilir. Bu şekilde farklı biçimsel özellikler gösteren montaj hatları temel olarak üç sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar, düz montaj hatları, U tipi montaj hatları ve paralel montaj hatlarıdır.

### Düz montaj hatları

Bu tip hatlar bir doğru boyunca birbirini izleyen istasyonların oluşturduğu hatlardır. Montaj hatlarının ilk olarak ortaya çıkması bu tarz düz hatlar şeklinde olmuştur. Bu hatlarda, montaj işlemi ilk istasyondan başlayarak ardıl sıralanmış istasyonlar boyunca hareketini tamamlar ve son istasyondan bitmiş ürün olarak çıkar. Düz montaj hatlarının getirdiği kolaylıklar arasında, akışın hızlı olması, basit bir yapıya sahip olması, servis verme imkanının kolay olması gibi unsurlar yer almaktadır. Bunların yanı sıra, düz bir hat boyunca ilerlemesinden dolayı fazla yer işgal etmesi ve operatörlerin birbiri ile iletişiminin sınırlı olması dezavantajları arasında sayılabilir. Şekil 3.4'de düz montaj hattına ait bir gösterim sunulmuştur.

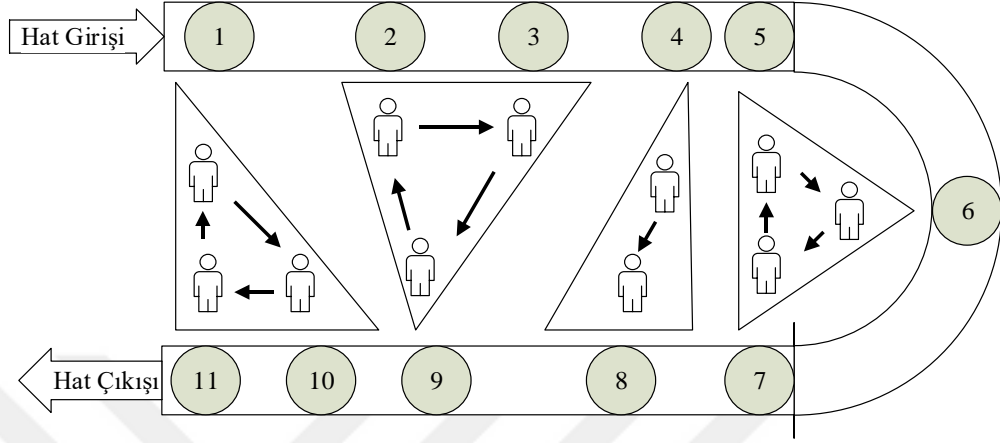


Şekil 3.4. Düz montaj hattı yerleşimine bir örnek

### U Tipi montaj hatları

U tipi montaj hatlarında, makineler hattın çevresinde konumlandırılır. Buna bağlı olarak da operatörler hattın iç tarafında montaj işlemlerini gerçekleştirirler. U tipi hatlarda, hattın giriş ve çıkış noktaları aynı pozisyondadır. Bu tip hatlarda çalışan operatörler birden fazla süreç içerisinde çalışabilmektedir. Buda operatör niteliklerinin yüksek olması gerekliliğini beraberinde getirip, montaj hattı esnekliğini artırır. U tipi montaj hatlarında genellikle hattın giriş ve çıkış noktasında bir operatör çalışır, buda bir görevin hattı terketmeden diğer görevin başlatılmaması esnekliğini ve kontrolünü sağlamaktadır. Bu tip montaj hatlarında ürünler ve operatörler saat yönü veya tersi istikamette hareket eder. Düz montaj hatlarına göre, U Tipi hatlar eşit veya daha az operatör gereksinimi

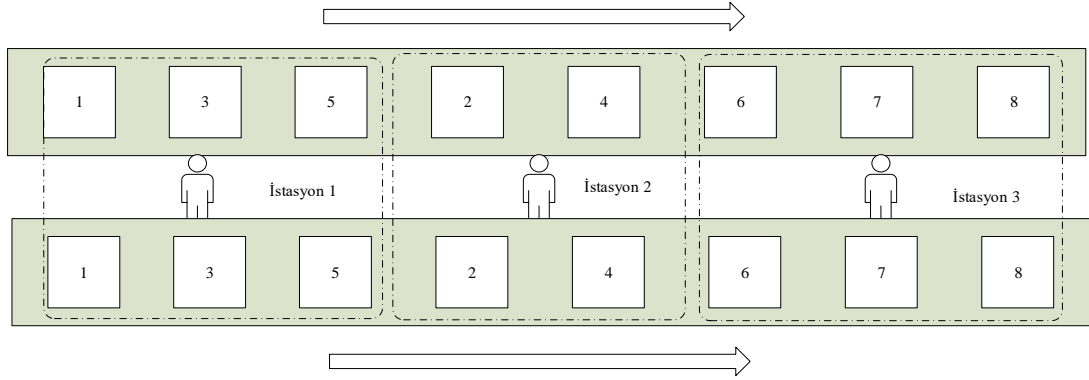
duymaktadır. Şekil 3.5’de U tipi montaj hattına bir örnek gösterilmiştir.



**Şekil 3.5.** U tipi montaj hattı yerleşimine bir örnek

### **Paralel montaj hatları**

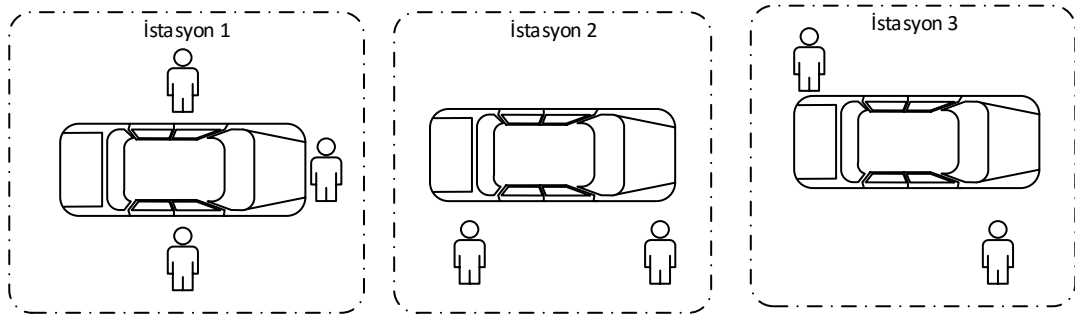
Bazı durumlarda düz montaj hatları birbirine paralel olacak şekilde tasarlanır. Bu durumun ortaya çıkması temelde iki nedene dayanır. Birincisi talebin yüksek miktarlarda olduğu durumlarda hattın kapasitesinin talebi karşılayamamasıdır. İkinci durum ise her bir ürüne olan talebin yeterli büyüklükte olması nedeni ile farklı ürünlerin üretildiği birbirine paralel hatlarının oluşturulmasıdır. Bu durumlarda hatların paralelleştirilip operatörlerin komşu hatlarda çalıştığı yerleşimine, paralel montaj hatları denir. Paralel montaj hatlarının ihtiyaç duyulan operatör sayısında azalma sağlaması, bir hatta meydana gelen bir problemin diğer hatları etkilememesi gibi avantajları vardır. Şekil 3.6’da paralel montaj hattına bir örnek gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Paralel montaj hattı yerleşimine bir örnek

### 3.2. Çok-Operatörlü Montaj Hattı Dengeleme Problemleri

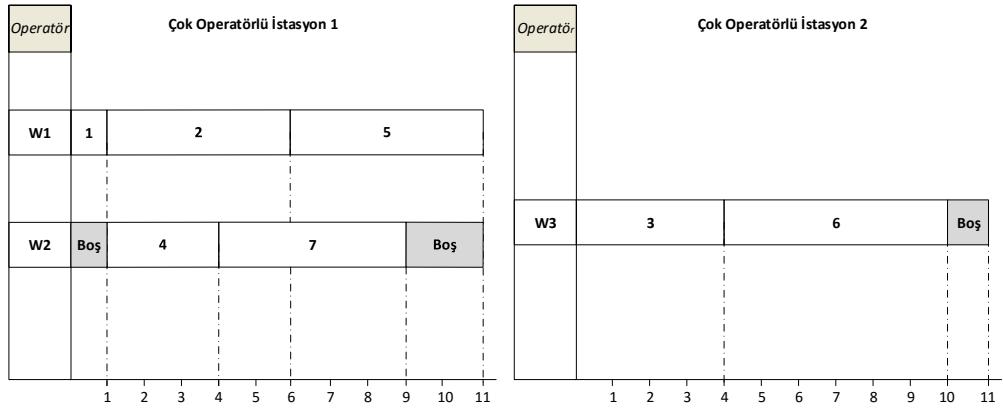
Teknolojinin de avantajı ile son yıllarda daha karmaşık yapıya sahip ürünlerin üretimi artık mümkün olmaktadır. Bu tarz ürünler yüzlerce hatta binlerce alt parçacıklardan oluşabilmektedir. Bu tarz ürünlerin düz montaj hatlarında üretimlerinin gerçekleştirilmesi montaj hattının ve son ürünün temininde uzun zaman almasına sebep olacaktır. Buda üretkenlikte düşüşe neden olacaktır. Özellikle büyük boyutlu ürünlerde, aynı ürün üzerinde birbirlerini engellemeyecek şekilde eş zamanlı çalışabilecek operatörler bulundurulmaktadır. Bu hatlarda her bir istasyonda çeşitli sayıdaki operatörler çevrim zamanı boyunca kendilerine atanan görev veya görevleri yerine getirerek bir sonraki istasyona aktarılmasını sağlarlar. Bu tarz montaj hatları literatürde çok operatörlü montaj hatları olarak anılmaktadır. Çok operatörlü montaj hatları ile ilgili bir gösterim Şekil 3.7’de sunulmuştur.



Şekil 3.7. Çok operatörlü montaj hattı yerleşimine bir örnek

Çok operatörlü montaj hatlarının kullanımı ile düz montaj hatlarına oranla daha kısa hat uzunluğuna sahip olabileceği, bununla beraber ara stok miktarlarında düşüş sağlanacağı ve çok operatörlü istasyonlar sayesinde ekipmanların operatörler tarafından ortak kullanması sonucunda ekipman maliyetlerinin daha düşük olabileceği, Dimirtiadis (2006) tarafından yapılan çalışmada belirtilmiştir. Aynı zamanda, çok operatörlü montaj hatları gurup tabanlı ve paralel istasyonlu montaj hatlarından farklılıklar gösterdiğinden bahsedilmiştir. Bununla beraber çok operatörlü montaj hatlarının, çift taraflı montaj hatları ile benzerliklerinin olması yanı sıra çift taraflı montaj hatlarının istasyonlarda yalnızca iki operatör bulundurması ve pozisyon kısıtlarından dolayı farklılıklar göstermektedir.

Çok operatörlü montaj hatlarının daha açık bir şekilde anlaşılması amacı ile 7 görevli, 2 istasyonlu, çevrim zamanı ( $c = 11$ ) ve görev süreleri toplamı  $\sum_{i=1}^{11} t_i = 29$  olan örnek bir Gant şeması Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.8.** Çok operatörlü montaj hattı Gant şeması

Şekil 3.8 incelendiğinde hatta bulunan toplam istasyon sayısının iki olduğu görülmektedir. Söz konusu istasyonlarda sırası ile 2 ve 1 operatör bulunmakta olup toplam operatör sayısı 3'tür. Birinci istasyonda bulunan birinci operatöre (W1) 1, 2 ve 5 görevleri, ikinci operatöre (W2) ise 4 ve 7 görevleri sırası ile atanmıştır. Aynı zamanda ikinci istasyonda bulunan birinci operatöre (W3) 3 ve 6 görevleri atanmıştır. Şekil

3.8'den da görüldüğü gibi 2 istasyonda tek operatör bulunmasından dolayı görevler sadece öncüllük ilişkileri bağlamında sıralanmıştır. Ancak birinci istasyonun ikinci operatörüne bakıldığında, atanan 4 görevi öncülündeki işin aynı istasyonda birinci operatör tarafından yapılmasından kaynaklanan bir birimlik bir bekleme zamanı olduğu görülmektedir. Bu durum birden fazla operatör bulunduran istasyonlarda çeşitli bekleme zamanlarını karşımıza çıkarmaktadır. Bu nedenle görevlerin istasyonlara atanmasının yanında hangi operatör tarafından ve görev başlangıç zamanlarının da belirlenmesi gerekir.

Aynı problemin düz montaj hattı dengeleme problemi olarak çözümünde istasyon sayısı için bir alt sınır (AS),  $AS = \left\lceil \sum_{i=1}^{11} t_i / c \right\rceil = \lceil 29 / 11 \rceil = 3$  'dür. Oysa çok operatörlü montaj hattı dengeleme problemi olarak ele alınmasında 2 istasyon tüm görevlerin bitirilmesi için yeterlidir. Böylelikle alan gereksinimini azalttığı görülmektedir. Aynı zamanda düz montaj hattı olarak bakıldığında ürün akış süresi 33 iken bu süre çok operatörlü montaj hattı için 22'ye düşmüştür.

Düz montaj hatlarındaki en iyi istasyon sayısı, çok operatörlü montaj hatları için en iyi operatör sayısına eşittir. Aynı zamanda bu sayısı, çok operatörlü montaj hatlarında istasyon sayısı için bir üst sınır teşkil etmektedir. Bu nedenle çok operatörlü montaj hatlarında hedef, hat boyunca kullanılan operatör sayısı ile beraber açılan istasyon sayısının da en küçüklenmesidir. Bu durum çift taraflı montaj hatlarında da karşımıza çıkmaktadır (Wu *et al.* 2008; Özcan and Toklu 2009a, 2009b). Probleme dair hedefler operatör sayısının, çevrim zamanının, istasyon sayısının ve istasyonda bulunabilecek en büyük operatör sayısının en küçüklenmesi olarak tanımlanabilir.

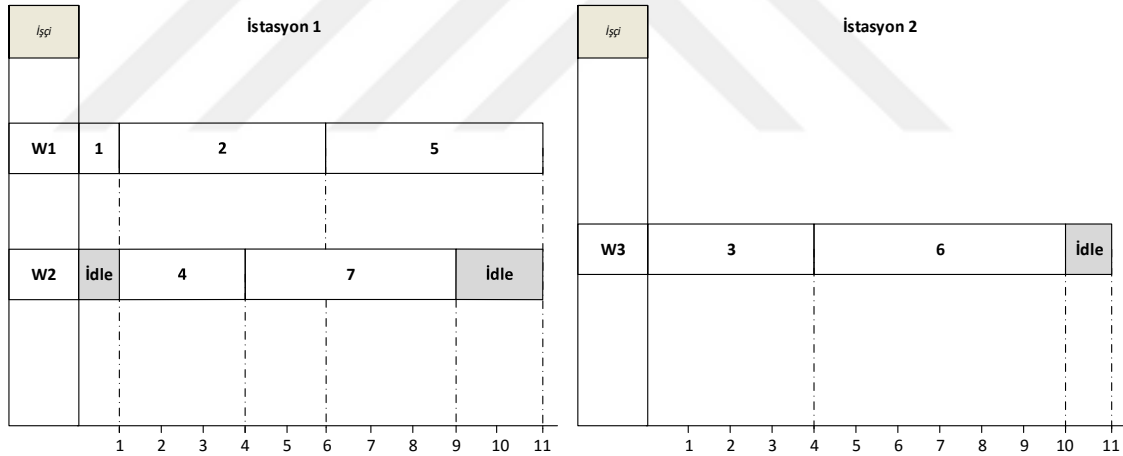
### 3.3. İş Yükü Dengeli Çok-Operatörlü Montaj Hattı Dengeleme Problemleri

Literatürde yapılan montaj hattı çalışmalarının gerçek hayat problemleri ile uygulanabilirliği kısıtlı sayıda olduğu bilinmektedir. Bunun en önemli nedenlerinden birisi çözüm aranılan problemin çeşitli varsayımlar altında bazı önemli kısıtların ihmal



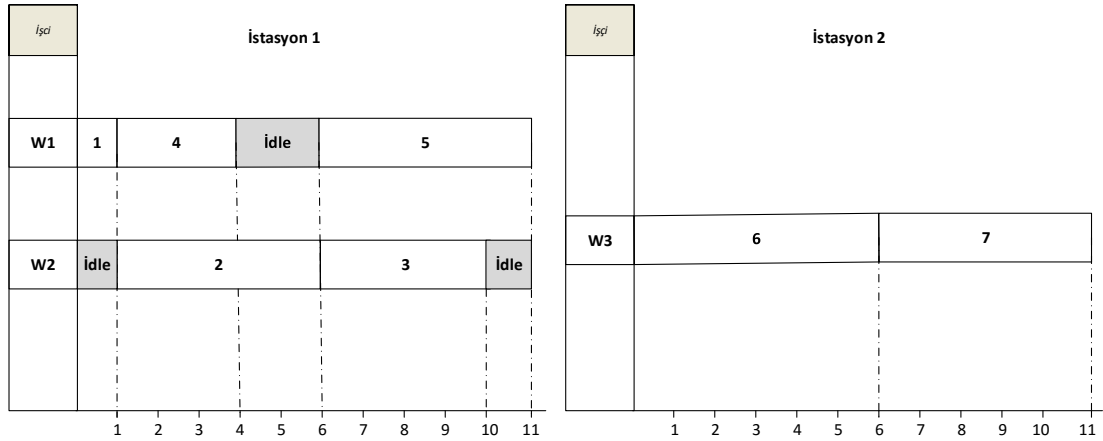
edilerek dengelenmeye çalışılmasıdır. Çok-operatörlü montaj hatları iki veya daha fazla operatörü aynı istasyonda aynı ürün üzerinde işlem yapılacak şekilde tasarlanmasından dolayı farklı nitelikler gösterebilmektedir. Bununla beraber bu tarz montaj hatları dengelenirken gerçek hayat problemlerine cevap verebilmesi amacı ile operatör sayısı ve istasyon sayısının en küçüklenmesinin yanı sıra hatta bulunan operatörler arasında eşit veya birbirine yakın iş yükü dengesi de gözetilmelidir.

Şekil 3.9 ve 3.10’da çok-operatörlü montaj hatları için verilen iki dengeleme şekli Gant şeması ile gösterilmiştir. Her iki hat Fattahi *et al.* (2011) tarafından sunulan  $c = 11$  zamanlı,  $n=7$  görevli bir problem için iş yükü dengesinin göz önünde bulundurulduğu ve bulundurulmadığı durumlar için ele alınmıştır. İş yükü dengesi bir operatörün, tüm operatörler ile olan görev zamanları farkının toplamı olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 3.9.** İş yükü dengesi gözetilmeksizin dengelenmiş bir hat şeması.

Şekil 3.9’da, W1 operatörünün boş zamanının olmadığı, W2 operatörünün 3 ve W3 operatörünün 1 birimlik boş bekleme zamanlarının olduğu görülmektedir. Bu operatörler arasındaki toplam iş yükü denge farkı,  $|W1-W2| = |0-3|=3$ ,  $|W1-W3| = |0-1|=1$  ve  $|W2-W3| = |3-1|=2$  olmak üzere toplamda  $3+1+2=6$ ’dır.



**Şekil 3.10.** İş yükü dengesi göz önünde bulundurularak dengelenmiş bir hat şeması

Aynı şekilde iş yükü dengesi göz önünde bulundurularak yapılan başka bir çözüm önerisi Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Bu çözümde iş yükü farkları,  $|W1-W2|=|2-2|=0$ ,  $|W1-W3|=|2-0|=2$  ve  $|W2-W3|=|2-0|=2$  olmak üzere toplamda  $0+2+2=4$ 'dür. Şekil 3.10'da gösterilen çözüm, Şekil 3.9'daki çözüm ile aynı istasyon ve operatör sayısına sahip olmasının yanı sıra, daha iyi bir iş yükü dağıtımını sağlamıştır.

Yapılan bu çalışma sıkça ihmal edilen ve çok-operatörlü montaj hatlarına daha önce uygulanmamış olan iş-yükü denge kısıtı da göz önünde bulundurularak, çok-operatörlü montaj hattı dengeleme problemine çözüm önerisi sunmaktır. Bu çözüm önerisi kapsamında bir matematiksel model önerilmiş ve literatürde var olan küçük boyutlu test problemleri üzerinde etkinlikleri gösterilmiştir.

### 3.3.1. Matematiksel model için kullanılan notasyonlar

Matematiksel model için kullanılan kümeler, parametreler, indisler ve karar değişkenleri aşağıdaki gibidir.

#### İndisler

$i, i1$ : Görevler.

j: İstasyonlar.

k, k1: Operatörler.

### Kümeler

J: İstasyonlar kümesi.  $J=\{1,2,\dots,j,\dots,n\}$

K: İstasyondaki operatörler.  $K=\{1,2,\dots,k,k1,\dots,N_{\max}\}$

P(i): i. görevin öncüller kümesi.

P1(i): i. görevin tüm öncüller kümesi.

R(i): i. görevin ardıllar kümesi.

R1(i): i. görevin tüm ardıllar kümesi.

M: Yeterince büyük pozitif bir sayı.

### Karar değişkenleri

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } i. \text{ görev } j. \text{ istasyonda, } k. \text{ operator tarafından yapılıyorsa.} \\ 0, & \text{diğer durumlarda.} \end{cases}$$

$$ws_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } k. \text{ operator } j. \text{ istasyonda kullanılıyorsa.} \\ 0, & \text{diğer durumlarda.} \end{cases}$$

$$ws1_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } k. \text{ operatörler } j. \text{ istasyonda kullanılıyorsa.} \\ 0, & \text{diğer durumlarda.} \end{cases}$$

$$w_{i,i1} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } i \text{ görevi, } i1 \text{ görevinden önce yapılıyorsa.} \\ 0, & \text{diğer durumlarda.} \end{cases}$$

str<sub>t</sub><sub>i</sub>: i. görevin başlama zamanı.

d<sub>k,k1</sub>: İstasyonlara atanana operatörler arasındaki iş yükü farkı.

### 3.3.2. Çözüm için karma tamsayılı matematiksel model

İş yükü dengeli çok operatörlü montaj hattı dengeleme problemleri için önerilen karma tamsayılı matematiksel model aşağıdaki sunulmuştur.

$$\min \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} ws_{jk} + \frac{1}{N_{max} \cdot n + 1} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} j \cdot x_{mjk} + \frac{1}{Ct \cdot n \cdot N_{max}} \sum_{k \in K} \sum_{k1 \in K} d_{k,k1} \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{ijk} = 1, \forall i \in Z \quad (3.4)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} j \cdot x_{i1jk} \leq \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} j \cdot x_{ijk} \quad 1, \forall i \in Z, i1 \in P(i) \quad (3.5)$$

$$\text{str}t_i + t_i \leq Ct \quad (3.6)$$

$$\text{str}t_i - \text{str}t_{i1} + M \cdot \left(1 - \sum_{k \in K} x_{i1jk}\right) + M \cdot \left(1 - \sum_{k \in K} x_{ijk}\right) \geq t_{i1}, \forall i \in Z, i1 \in P(i), j \in J \quad (3.7)$$

$$\text{str}t_{i1} - \text{str}t_i + M(1 - x_{i1jk}) + M(1 - x_{ijk}) + M(1 - w_{i,i1}) \geq t_i, \\ \forall i \in Z, i1 \in \{g \mid g \in I - (P1(i) \cup S1(i)) \text{ ve } i < g\}, j \in J, k \in K \quad (3.8)$$

$$\text{str}t_i - \text{str}t_{i1} + M(1 - x_{i1jk}) + M(1 - x_{ijk}) + Mw_{i,i1} \geq t_{i1}, \\ \forall i \in Z, i1 \in \{g \mid g \in I - (P1(i) \cup S1(i)) \text{ ve } i < g\}, j \in J, k \in K \quad (3.9)$$

$$\sum_{i \in Z} t(i).X_{ijk} - \sum_{i \in Z} t(i).X_{ij_1k_1} \leq d_{k,k_1} \quad \forall j, j_1 \in J, k, k_1 \in K, \text{ if } j_1 > j, \forall k, k_1, \text{ if } j_1 = j, \forall k_1 > k \quad (3.10)$$

$$-\sum_{i \in Z} t(i).X_{ijk} + \sum_{i \in Z} t(i).X_{ij_1k_1} \leq d_{k,k_1} \quad \forall j, j_1 \in J, k, k_1 \in K, \text{ if } j_1 > j, \forall k, k_1, \text{ if } j_1 = j, \forall k_1 > k \quad (3.11)$$

$$\sum_{i \in Z} x_{ijk} - m.ws_{jk} \leq 0, \forall j \in J, k \in K \quad (3.12)$$

$$\sum_{k \in K} k.ws_{1jk} - \sum_{k \in K} ws_{jk} = 0, \quad \forall j \in J \quad (3.13)$$

$$ws_{j(k+1)} \leq ws_{jk}, \forall j \in J, k = 1, 2, \dots, N_{max} - 1 \quad (3.14)$$

$$strt_i \geq 0, \forall i \in Z \quad (3.15)$$

$$k < k_1, \quad \forall k, k_1 \in K \quad (3.16)$$

$$d_{k,k_1} \geq 0, k, k_1 \in K \quad (3.17)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, \forall i \in Z, j \in J, k \in K \quad (3.18)$$

$$w_{i,i_1} \in \{0,1\}, \forall i \in Z, i_1 \in \{g \mid g \in I - (P1(i) \cup S1(i)) \text{ ve } i < g\} \quad (3.19)$$

$$ws_{jk} \in \{0,1\}, \forall j \in J, \quad k \in K \quad (3.20)$$

Eşitsizlik 3.3, amaç fonksiyonu olup birincil olarak operatör sayısını, ikincil olarak açılan istasyon sayısını, üçüncül olarak da toplam iş yükü denge farkını minimize eden

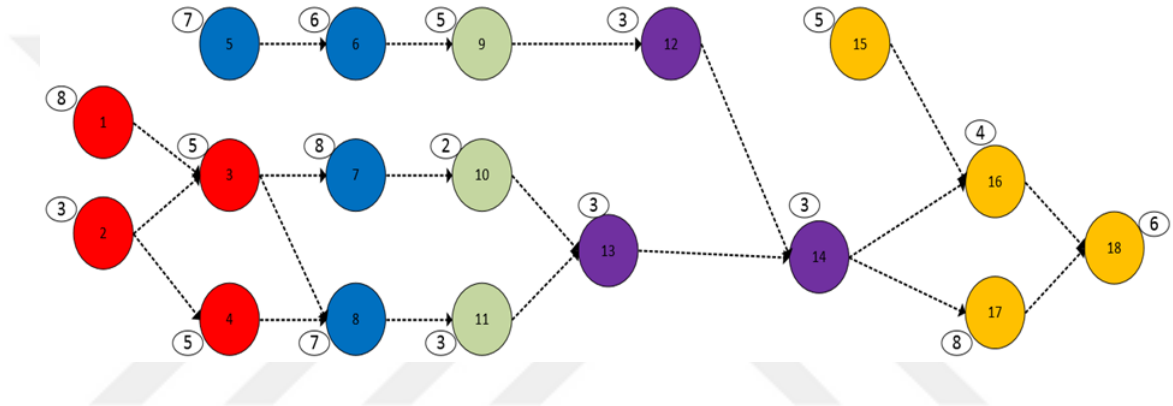
bir yapıya sahiptir. Eşitsizlik 3.4, her bir istasyonda her bir görevin yalnızca bir işçi tarafından yapıldığından emin olur. Eşitsizlik 3.5, öncelik kısıtlarının sağlandığı kısıttır. Eşitsizlik 3.6, istasyondaki çevrim zamanının aşılmamasını sağlar. Eşitsizlik 3.7, 3.8, 3.9 ise kontrol sağlar. Eğer görev  $i_1$ ,  $i$  görevinin öncülü ise  $i$ 'nin başlama zamanı  $i_1$  işinden sonra olmasını Eşitsizlik 3.7 sağlar. Eğer  $i$  ve  $i_1$  işlerinin öncüllük ilişkisi yok ise, eşitsizlik 3.8 ve 3.9 işe koyulur. Eğer  $i$  işi,  $i_1$  işinden önce atanmış ise eşitsizlik 3.8, aksi takdirde eşitsizlik 3.9 aktif olacaktır. Eğer  $i$  ve  $i_1$  işleri farklı istasyonlara atanacak olursa, yeteri kadar büyük bir sayı ile çarpılarak göz ardı edilir. Eşitsizlik 3.10 ve 3.11 ise istasyonlar arası iş yükü dengesi kısıtları olup, mutlak değerin doğrusal olarak modellenmiş şeklindedir. Eğer toplam  $k$ . operatörün iş yükü,  $k_1$ 'den büyük ise eşitsizlik 3.10, aksi takdirde 3.11 kısıtlayıcı olacaktır. Eşitsizlik 3.12 çok-operatörlü montaj hattı için tasarlanmış işçi kısıtıdır. Eşitsizlik 3.13, her bir istasyonda kullanılan işçi sayısını doğrular. Eşitsizlik 3.14, işçilerin atanma sırasını gözlemler. Eşitsizlik 3.15, her bir iş için başlama zamanının sıfırdan büyük eşit olmasını sağlar. Eşitsizlik 3.16, yeni işçilerin artan bir sayıda olmasını sağlar. Eşitsizlik 3.17, 3.18, 3.19 ve 3.20 işaret kısıtlarını ifade eder.

#### **3.4. Kalifiye Çok-Operatörlü Montaj Hattı Dengeleme Problemleri ve Varsayımları**

Montaj hattı dengeleme problemlerinde, takım olgusunu ilk olarak Johnson (1991) tarafından ortaya konulmuştur. Montaj hattı üzerinde çalışacak olan takım veya operatör gurupları üç kategoriye ayrılmıştır. Bunlardan ilki, tüm işlerin tüm operatörler tarafından yapılabildiği, ikincisi tüm işlerin sadece o işlerde uzman olan, yani kalifiye operatörler tarafından yapılabildiği ve üçüncü olarak da bazı işlerin özel operatörlere gereksinim duyduğu, bazılarının ise tüm operatörler tarafından yapılabilir olduğu montaj hatlarıdır.

Literatürde, çok-operatörlü montaj hattı dengeleme problemleri şu ana kadar bahsedilen operatör guruplarından, tüm işlerin tüm operatörler tarafından yapılabildiği durum için incelenmiştir. Oysa gerçek hayat uygulamalarında otobüs, kamyon gibi karmaşık yapıya

sahip ürünlerin üretiminde döşeme takımı, elektrik ve elektronik aksam takımı, özel kaynak takımı vb. gibi çeşitli spesifik gereksinime ihtiyaç duyulan işler vardır. Bu işlemler klasik dengeleme prosedüründe ihmal edilerek tüm operatörler tarafından yapılabildiği kabul edilir ve istasyonlardaki operatörlere atanır. Şekil 3.11’de görüleceği üzere, kalifiye çok operatörlü montaj hatlarında her bir görev önceden kalifiye operatör guruplarına atanarak, belirli operatör guruplarınca montaj işleminin gerçekleşmesi sağlanır.



**Şekil 3.11.** Kalifiye çok operatörlü montaj hattı için örnek öncelik diyagramı

Bu çalışma kapsamında, çok-operatörlü montaj hattı dengeleme problemi, kalifiye eleman gerekliliği göz önünde bulundurularak matematiksel model ve bir sezgisel yöntem sunulmuştur. Önerilen matematiksel model ve sezgisel yöntemin sınanması amacı ile literatürde bulunan test problemlerinin problem yapısına uyarlanması gösterilmiştir.

### **Problem varsayımları**

Hat üzerinde kitle üretimi yapılmaktadır.

Çevrim zamanı bilinmektedir.

Görev süreleri belirli yapıdadır.

Tüm istasyonlardaki makine ve operatörler aynı iş yapma kapasitesine sahip değildirler.

İstasyonlar arası bekleme süresi yoktur.

Operatör guruplarının hangi işleri yapabildiği önceden bilinmektedir.

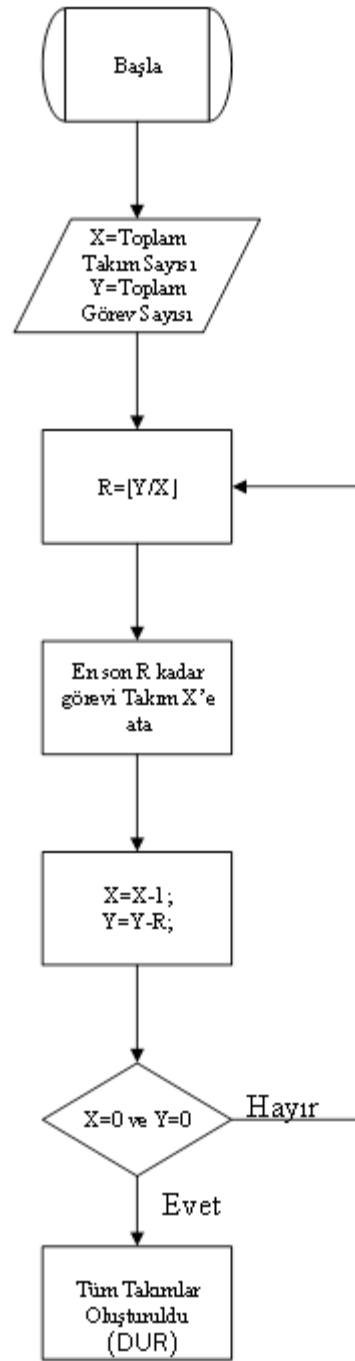
Öncelik ilişkileri kesin olarak bilinmektedir.

### 3.4.1. Test problemleri oluşturma

Sunulan matematiksel model ve sezgisel algoritmanın test edilmesi amacı ile literatürde, problem tipine ait bir veri seti bulunmamaktadır. Bundan dolayı literatürde montaj hatları için var olan test problemleri, problem tipine göre uyarlanmıştır. Uyarlanma mekanizması Şekil 3.12'de gösterilmiştir. Mekanizma öncelikli olarak oluşturulması istenen takım sayısını ve toplam görev sayısını alır. Takım atamasına en son görevden başlayarak, ilk göreve geldiğinde tüm görevlerin takım ataması bitmiş olur. Oluşturulan takımlar mevcut görev sayısının, mevcut takım sayısına oranı ile bulunur. Bu oranın bir tamsayı olmaması durumunda, alta yuvarlanarak kaç adet görevin o takım içerisinde yer alacağı hesaplanır.

Takım oluşturma prosedürünün daha iyi anlaşılabilmesi için bir örnek üzerinde gösterilmiştir. Literatürde yer alan Sawyer (1970) test problem 4 takıma bölünmek istenmiştir. Öncelikle  $Y=30$  ve  $X=4$  olarak ayarlanmıştır.  $Y1=30$ ,  $X1=4$ .  $Y1/X1 = R1=7,5$  sonucu alınmıştır.  $R1$  aşağı yuvarlanarak  $\lceil 7,5 \rceil = 7$ 'ye eşitlenmiştir. Bunun anlamı, son 7 işin (24-30) 4. Takıma atandığıdır. Veri seti yenilendiğinde,  $Y1=23$  ve  $X1=3$  değerini alır.  $Y1/X1=R=7,666$ . Aşağı yuvarlandığında  $\lceil 7,666 \rceil = 7$  olur. 17-23 görevleri 3. takıma atanır. Tekrardan veri seti yenilenir,  $Y1=16$  ve  $X1=2$  değerini alır.  $Y1/X1=R=8$  olduğundan, görev 9-16 2. takıma atanır. Kalan işlerde, 1-8, 1. takıma atanır. Düzenlenmiş görevler ve takımlar Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.





**Şekil 3.12.** Takım oluşturma mekanizması

**Çizelge 3.2.** Sawyer test problemine ait görevler ve takımlar

Görev Numarası	Takım	Görev Numarası	Takım	Görev Numarası	Takım
1	1	11	2	21	3
2	1	12	2	22	3
3	1	13	2	23	3
4	1	14	2	24	4
5	1	15	2	25	4
6	1	16	2	26	4
7	1	17	3	27	4
8	1	18	3	28	4
9	2	19	3	29	4
10	2	20	3	30	4

### 3.4.2. Matematiksel model için kullanılan notasyonlar

Matematiksel model için kullanılan kümeler, parametreler, indisler ve kara değişkenleri aşağıdaki gibidir.

#### İndisler

$i, h$	Görevler.
$j$	İstasyonlar.
$t, t1$	Takımlar.

#### Parametreler

$I$	İşler kümesi. $I = \{1, 2, \dots, i, \dots, h, \dots, n\}$
-----	--

J	İstasyonlar kümesi. $J=\{1, 2, \dots, j, \dots, m\}$
T	Takımlar kümesi. $T=\{1, 2, \dots, t, \dots, l\}$
T(t)	t. takıma ait görevler.
P(i)	i.işin süresi.
C	Çevrim zamanı.
MaxSt	Herbir istasyon için maksimum takım sayısı.
M	Pozitif büyük bir sayı.
O(i)	i.görevin öncül kümesi. i.görevin aynı takımda olan tüm öncül işler kümesi.
O1(i)	i.görevin ardıl kümesi i.görevin aynı takımda olan tüm ardıl işler kümesi.
A(i)	i.görevin ardıl kümesi i.görevin aynı takımda olan tüm ardıl işler kümesi.
A1(i)	i.görevin ardıl kümesi.
ist(t)	t. takımdaki görev sayısı.
Team(i)	i.görevin takım numarası.
Team(h)	h.görevin takım numarası.

### Karar değişkenleri

$x(i,j,t)$	1, Eğer t. takımdaki i. görev j. istasyona atanmış ise; 0, d.d.
$st(i)$	i. görevin başlama zamanı.
$w(j,t)$	1, t takımını j. istasyonda kullanılmış ise; 0, diğer durumlarda.
$y(i,h)$	1, eğer i. görev aynı istasyonda ve aynı takımda h. görevden önce yapılıyor ise; 0, diğer durumlarda.

### 3.4.3. Çözüm için karma tamsayılı matematiksel model

Kalifiye çok operatörlü montaj hattı dengeleme problemleri için önerilen karma tamsayılı matematiksel model aşağıdaki sunulmuştur.

$$\text{En küçükle } \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} j \cdot w_{jt} \quad (3.21)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ijt} = 1, \quad \forall i \in I \text{ and } t \in \text{Team}(i) \quad (3.22)$$

$$\sum_{j \in J} j \cdot x_{hjt1} \leq \sum_{j \in J} j \cdot x_{ijt}, \quad \forall i \in I, \quad h \in O(i), \quad t \in \text{Team}(i), \\ t1 \in \text{Team}(h) \quad (3.23)$$

$$st_i + P_i \leq C \quad (3.24)$$

$$st_i - st_h + M \cdot (1 - x_{ijt}) + M \cdot (1 - x_{hjt1}) \geq P_h, \quad \forall i \in I, h \in P(i), \\ j \in J, \quad t \in \text{Team}(i), \quad t1 \in \text{Team}(h) \quad (3.25)$$

$$st_h - st_i + M \cdot (1 - x_{hjt}) + M \cdot (1 - x_{ijt}) + M \cdot (1 - y_{i,h}) \geq P_i, \\ \forall i \in I, h \in \{g \mid g \in T(t) - (O1(i) \cup A1(i)) \text{ ve } i < g\}, j \in J, \\ t \in \text{Team}(i) \quad (3.26)$$

$$st_i - st_h + M \cdot (1 - x_{ijt}) + M \cdot (1 - x_{hjt}) + M \cdot y_{i,h} \geq P_h, \\ \forall i \in I, h \in \{g \mid g \in T(t) - (O1(i) \cup A1(i)) \text{ ve } i < g\}, j \in J, \\ t \in \text{Team}(i) \quad (3.27)$$

$$\sum_{i \in T(t)} x_{ijt} - ist(t) \cdot w_{jt} \leq 0, \quad \forall j \in J, t \in \text{Team}(i), \quad (3.28)$$

$$\sum_{t \in T} w_{jt} \leq \text{MaxSt}, \quad \forall j \in J \quad (3.29)$$

$$st_i \geq 0, \quad \forall i \in I \quad (3.30)$$

$$x_{ijt} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (3.31)$$

$$y_{i,h} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I, h \in \{g \mid g \in T(t) - (O1(i) \cup A1(i)) \text{ ve } i < g\} \quad (3.32)$$

$$w_{jt} \in \{0,1\}, \quad \forall j \in J, \quad t \in T \quad (3.33)$$

Amaç fonksiyonu olan Eşitsizlik 3.21, birincil olarak takım sayısını ikincil olarak da açılan istasyon sayısının en küçüklenmesini sağlamaktadır. Eşitsizlik 3.22, atama kısıtıdır ki bir işin bir istasyonda yalnızca bir takıma atanmasını sağlar. Eşitsizlik 3.23 tüm öncelik ilişkilerinin sağlanmasından emin olur. Eşitsizlik 3.24, tüm işlerin çevrim zamanından önce bitmesini sağlar. Eşitsizlik 3.25, 3.26 ve 3.27 sıralama kontrol kısıtlarıdır. Tüm  $i$  ve  $h$  işleri için, eğer  $i$ ,  $h$  işinin bir ardılı ise, Eşitsizlik 3.25  $i$  işinin başlangıç süresinin  $h$  işinden sonar olmasını sağlar. Eğer  $i$  ve  $h$  işleri arasında herhangi bir öncelik ilişkisi bulunmuyor ve takımları da aynı ise, eşitsizlik 3.26 ve 3.27 aktif hale geçer. Örneğin,  $i$ ,  $h$ 'dan önce atanmış ise  $y_{ih} = 1$  değerini alır ve Eşitsizlik 3.26  $sth - sti \geq P_i$  şeklini alır. Diğer taraftan, eğer  $h$ ,  $i$ 'den önce atanmış ise, Eşitsizlik 3.27 aktif olur. Eğer  $i$  ve  $h$  farklı istasyonlara atanmış ise Eşitsizlik 3.25, 3.26 ve 3.27 yeterince büyük bir sayı ile çarpılarak inaktif hale getirilir. Eşitsizlik 3.28 operatör kısıtıdır. Eğer  $j$  istasyonda  $t$ . takıma herhangi bir iş atanmış ise 1 değerini alır. Eşitsizlik 3.29, istasyonda bulunabilecek maksimum operatör sayısıdır. Eşitsizlik 3.30, tüm işlerin başlama zamanının 0 veya 0'dan büyük olmasını sağlar. Eşitsizlik 3.31, 3.32 ve 3.33 işaret kısıtlarını gösterir.

#### 3.4.4. Çözüm için sezgisel bir yaklaşım

Bu çalışmada sunulan sezgisel yöntem, rassal arama olarak bilinen sezgisel yöntemin çok-operatörlü montaj hatları için uyarlanmış halidir. Algoritma, toplam takım sayısı, istasyonda bulunabilecek maksimum takım sayısı ve önceden belirli takımlar olmak üzere üç önemli kriter üzerine çalışmaktadır. Başlangıç verisi olarak, çevrim zamanı, toplam takım sayısı, istasyonda bulunabilecek maksimum takım sayısı, istasyon numarası ilk basamakta hazırlanmaktadır. Tüm atanabilir işler kümesi  $A$  kümesinde

listelenir. İlk atama için A listesinden bir iş rassal olarak seçilir. Bu atama işlemi tüm işlerin atanması ile son bulur. Sunulan sezgisel yöntemin basamakları aşağıdaki gibidir:

Adım 1: Başlangıç verilerini oluştur, (1) Çevrim zamanı 'C', (2) Toplam takım sayısı 'T' ve (3) İstasyonda bulunabilecek maksimum takım sayısı 'Tmax'.(4) İstasyon seri numarası  $S = 0$  ve sonraki adıma geç.

Adım 2: Görevler içerisinde önceliği olmayan işler kümesini A oluştur ve rasgele bir iş seç, sonraki adıma geç.

Adım 3: Eğer  $S > 0$ ; sonraki adıma geç.

Değilse, Eğer  $S=0$  ve A listesi boş değilse;  $S=1$  olarak ayarla ve Adım 2'ye dön.

Adım 4: Eğer  $S > 0$  ve A kümesi dolu ise;

Adım 4.1: Eğer önceliğinde iş yok ise;

Adım 4.1.1: Tüm istasyonları gez; eğer aynı takım numarası ile atanmış farklı işler var ise ve eklendiğinde çevrim zamanını aşmıyor ise, görevi ekle. A kümesinden işi çıkar. Adım 2'ye dön.

Adım 4.1.2: Tüm istasyonları gez; eğer aynı takım numarası ile atanmış farklı işler var ise ve eklendiğinde çevrim zamanını aşıyor ise, yeni istasyon aç ve görevi ata. A kümesinden işi çıkar. Adım 2'ye dön.

Adım 4.1.3: Tüm istasyonları gez; Eğer aynı takım numaralı iş veya işler yok ise ve istasyonda bulunan toplam takım sayısı, izin verilen toplam takım sayısından küçük ise. Görevi ata ve A kümesinden çıkar. Adım 2'ye geri dön.

Adım 4.1.4: Tüm istasyonları gez; Eğer aynı takım numaralı iş veya işler yok ise ve istasyonda bulunan toplam takım sayısı, izin verilen toplam takım sayısına eşit ise. Yeni istasyon aç, görevi ata ve A kümesinden çıkar. Adım 2'ye geri dön.

Adım 4.2: Eğer öncül işleri var ise;

Adım 4.2.1: Eğer öncülündeki iş ile atanmayı bekleyen işlerin takımları aynı ise

Adım 4.2.1.1: Önceliğinde olan işe eklenmesi durumunda çevrim zamanını aşmıyor ise, görevi ekle. A kümesinden çıkar. Adım 2'ye dön.

Adım 4.2.1.2: Önceliğinde olan işlerin istasyonlarını gez. Eğer eklenmesi durumunda çevrim zamanını aşıyor ise, yeni istasyon aç ve görevi ata. A kümesinden çıkar. Adım2'ye dön.

Adım 4.2.2: Eğer öncülündeki iş ile atanmayı bekleyen işlerin takımları aynı değil ise;

Adım 4.2.2.1: Farklı takımlar tarafından yapılan işlerin istasyon numaralarını al. Bu istasyonlardan eşit veya büyük olan istasyonları tara.

Adım 4.2.2.1.1: Eğer önceliğinde ve farklı takımdaki işin tamamlanma süresi, aynı takımdan büyük ise,

Adım 4.2.2.1.1.1: Eğer görev süresinin farklı takımda olan işlere eklenmesi çevrim zamanını aşmıyor ise, görevi ekle . A kümesinden görevi çıkar. Adım 2'ye dön.

Adım 4.2.2.1.1.2: Eğer görev süresinin farklı takımda olan işlere eklenmesi çevrim zamanını aşıyor ise, yeni istasyon aç ve görevi ekle. A kümesinden görevi çıkar. Adım 2'ye dön.

Adım 4.2.2.1.2: Eğer önceliğinde ve farklı takımdaki işin tamamlanma süresi, aynı takımdan küçük ise,

Adım 4.2.2.1.2.1: Eğer aynı takımdaki öncül işin bitiş zamanına eklenmesi çevrim zamanını aşmıyor ise, görevi ekle. A kümesinden işi kaldır. Adım 2'ye geç.

Adım 4.2.2.1.2.2: Eğer aynı takımdaki öncül işin bitiş zamanına eklenmesi çevrim zamanını aşmıyor ise, yeni istasyon aç, görevi ekle. A kümesinden işi kaldır. Adım 2'ye geç.

Adım 4.2.2.1.3: Eğer önceliğindeki işlerde atanmayı bekleyen iş ile aynı takımda herhangi bir iş bulunmuyor ise ve istasyonda bulunan takım sayısı, istasyonda bulunabilecek toplam takım sayısından az ise,

Adım 4.2.2.1.3.1: Eğer öncülündeki işlerden en büyük tamamlanma süreli işin bitiş zamanına eklenmesi çevrim zamanını aşmıyor ise, görevi ekle. A kümesinden görevi sil. Adım 2'ye git.

Adım 4.2.2.1.3.2: Eğer öncülündeki işlerden en büyük tamamlanma süreli işin bitiş zamanına eklenmesi çevrim zamanını aşmıyor ise, yeni istasyon aç, görevi ekle. A kümesinden görevi sil. Adım 2'ye git.

Adım 4.2.2.1.4: Eğer önceliğindeki işlerde atanmayı bekleyen iş ile aynı takımda herhangi bir iş bulunmuyor ise ve istasyonda bulunan takım sayısı, istasyonda bulunabilecek toplam takım sayısına eşit ise, yeni istasyon aç, görevi ata. Adım 2'ye geç.

Bu adımları A listesinde herhangi bir iş kalmayınca kadar tekrar et.



### 3.5. Atama Kısıtlı Çok-Operatörlü Montaj Hattı Dengeleme Problemleri

Gerçek hayat uygulamalarında montaj hattı dengeleme problemleri, çevrim zamanı ve öncelik kısıtlarının dışında çeşitli kısıtlarıda içermektedir. Bu kısıtlar literatürde atama kısıtları olarak bilinmektedir (Boysen *et al.* 2007). Literatürde bulunan atama kısıtları çok-operatörlü montaj hattına uyarlanarak 4 başlık altında toplanmıştır. Bunlar aşağıdaki gibi ele alınmaktadırlar.

**Bölge Kısıt:** İki tip bölge kısıt olup bunlar pozitif ve negatif bölge kısıtlarıdır. Pozitif bölge kısıt, bir iş kümesinde bulunan işlerin aynı istasyon içerisinde montajının yapılmasıdır. Örneğin, pahalı bir kaynağı kullanan işler aynı istasyona atanması veya montaj için farklı ekipmanlara gereksinim duyan işlerin farklı istasyonlarda bulunması gibi durumlar söz konusu olabilir. Bölge kısıt bu tarz kısıtların da göz önünde bulundurulduğu durumlar için geçerlidir (Dar-el and Rubinovitch 1979; Scholl *et al.* 2010).

**Mesafe Kısıtı:** Montaj sürecinde iş parçacıkları arasında belirli bir uzaklık bulunması istenebilir. Bu uzaklık istasyon veya süre cinsinden ölçülebilir. Bu süreler en az ve en fazla olacak şekilde sınıflandırılır. Örneğin, bir boyama sürecinde, boyanın kuruması ve o parça üzerinde işlem yapılabilmesi için minimum gerekli olan bir mesafe vardır. Erimiş metal ile ilgili bir süreçte, metalin tam katı hale gelmeden üzerinde işlem yapılabilmesi için maksimum uzaklık söz konusudur (Scholl *et al.* 2010).

**Eşzaman Kısıtı:** Bazı görevler eşzamanlı olarak aynı istasyonda farklı operatörler tarafından yapılabilmektedir. Bu kısıt, çift taraflı ve çok-operatörlü montaj hatlarına özgü bir kısıttır.

**İstasyon Kısıtı:** Bazı görevler sadece belirli istasyoda yapılabildiği durumlardır. Örneğin spesifik bir teçhizatın bulunduğu bir istasyona o makine ile ilgili görevin atanması gibi (Lapierre and Ruiz 2004).

Tezin bu kısmında, bu tip problemler için bir matematiksel model sunulmuş ve sezgisel algoritma geliştirilmiştir.

### 3.5.1. Matematiksel model için kullanılan notasyonlar

Matematiksel model için kullanılan kümeler, parametreler, indisler ve karar değişkenleri aşağıdaki gibidir.

#### İndisler

i,h,g	Görevler.
J,n	İstasyonlar.
k	Operaörler.
a	J'nin basamak sayısı.

#### Parametreler

I	İşler kümesi. $I=\{1, 2, \dots, i, \dots, h, \dots, I\}$
J	İstasyonlar kümesi. $J=\{1, 2, \dots, j, \dots, J\}$
K	Operatörler kümesi. $K=\{1, 2, \dots, k, \dots, K_{max}\}$
$I_s$	Senkron işler kümesi.
$I_{zp}$	Aynı istasyonda yapılacak işler kümesi.
$I_{zn}$	Farklı istasyonda yapılacak işler kümesi.
$J_k$	Belirli istasyonlarda yapılacak işler kümesi.
$D_{min}$	En az uzaklık olması istenen işler kümesi.
$D_{max}$	En fazla uzaklık olması istenen işler kümesi.
t(i)	i.işin süresi .
C	Çevrim zamanı.
M	Pozitif büyük bir sayı.
P(i)	i.görevin öncül kümesi.
P1(i)	i.görevin tüm öncül işler kümesi.

- $S(i)$  i.görevin ardıl kümesi.  
 $S1(i)$  i.görevin tüm ardıl işler kümesi.  
 $d_{\min}(i,g)$  i işi ile g işi arasında olması gereken enküçük uzaklık.  
 $d_{\max}(i,g)$  i işi ile g işi arasında olması gereken büyük uzaklık.

### Karar değişkenleri

- $x(i,j)$  1, eğer i. görev j. istasyona atanmış ise; 0, değilse.  
 $t(i,j,k)$  1, eğer i. görev j. istasyonda k. operatöre atanmış ise; 0, değilse.  
 $st(i)$  i.görevin başlama zamanı.  
 $w(j,k)$  1, k. operatör j. istasyonda kullanılmış ise; 0, değilse.  
 $U(j)$  1, j. istasyon açılmış ise; 0, değilse.  
 $y(i,h)$  1, eğer i. görev aynı istasyonda ve aynı takımda h. görevden önce yapılıyor ise;  
0, değilse.  
 $a(i,g)$  1, eğer i ve g işlerinin bulunduğu istasyon farkı negatif ise;0, değilse.

### 3.5.2. Çözüm için karma tamsayılı matematiksel model

Atama kısıtlı çok operatörlü montaj hattı dengeleme problemleri için önerilen karma tamsayılı matematiksel model aşağıdaki sunulmuştur.

$$\text{En küçük} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} w_{jk} + \frac{1}{10^a} * \sum_{j \in J} U_j \quad (3.34)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in I \quad (3.35)$$

$$\sum_{k \in K} t_{ijk} = x_{ij}, \quad \forall i \in I \text{ ve } j \in J \quad (3.36)$$

$$\sum_{j \in J} j \cdot x_{hj} \leq \sum_{j \in J} j \cdot x_{ij}, \quad \forall i \in I, \quad h \in P(i) \quad (3.37)$$

$$st_i + t_i \leq C \quad (3.38)$$

$$st_i - st_h + M \cdot (1 - x_{ij}) + M \cdot (1 - x_{hj}) \geq t_h, \quad \forall i \in I, h \in P(i), \\ j \in J \quad (3.39)$$

$$st_h - st_i + M \cdot (1 - t_{hjk}) + M \cdot (1 - t_{ijk}) + M \cdot (1 - y_{ih}) \geq P_i, \\ \forall i \in I, h \in \{g \mid g \in I - (P1(i) \cup S1(i)) \vee i < g\}, j \in J, k \\ \in K \quad (3.40)$$

$$st_i - st_h + M \cdot (1 - t_{hjk}) + M \cdot (1 - t_{ijk}) + M \cdot (y_{ih}) \geq P_h, \quad \forall i \in I, h \\ \in \{g \mid g \in I - (P1(i) \cup S1(i)) \vee i < g\}, j \in J, k \\ \in K \quad (3.41)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} - ||I|| \cdot U_j \leq 0, \quad \forall j \in J \quad (3.42)$$

$$U_j \geq U_{j+1}, \quad j = 1, 2, \dots, (J - 1) \quad (3.43)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} - U_j \geq 0, \quad \forall j \in J \quad (3.44)$$

$$\sum_{i \in I} t_{ijk} - ||I|| \cdot w_{jk} \leq 0, \quad \forall j \in J, \quad \forall k \in K \quad (3.45)$$

$$st_i - st_g = 0 \quad (i, g) \in I_s \quad (3.46)$$

$$\sum_{j \in J} j \cdot x_{ij} - \sum_{j \in J} j \cdot x_{gj} = 0, \quad (i, g) \in I_s \text{ ve } I_{zp} \quad (3.47)$$

$$x_{ij} + x_{gj} \leq 1, \quad (i, g) \in I_{zn}, \forall j \in J \quad (3.48)$$

$$x_{in} = 1, \quad (i, n) \in J_k \quad (3.49)$$

$$\sum_{j \in J} j \cdot x_{ij} - \sum_{j \in J} j \cdot x_{gj} \geq d_{min}(i, g) - M \cdot a_{ig}, \quad (i, g) \in D_{min}, \forall j \in J \quad (3.50)$$

$$\sum_{j \in J} j \cdot x_{ij} - \sum_{j \in J} j \cdot x_{gj} \leq M \cdot (1 - a_{ig}) - d_{min}(i, g), \quad (i, g) \in D_{min}, \forall j \in J \quad (3.51)$$

$$\sum_{j \in J} j \cdot x_{ij} - \sum_{j \in J} j \cdot x_{gj} \leq d_{max}(i, g), \quad (i, g) \in D_{max}, \forall j \in J \quad (3.52)$$

$$\sum_{j \in J} j \cdot x_{ij} - \sum_{j \in J} j \cdot x_{gj} \geq -d_{max}(i, g), \quad (i, g) \in D_{max}, \forall j \in J \quad (3.53)$$

$$st_i \geq 0, \quad \forall i \in I \quad (3.54)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.55)$$

$$t_{ijk} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (3.56)$$

$$y_{ih} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I, h \in \{g \mid g \in I - (P1(i) \cup S1(i)) \text{ ve } i < g\} \quad (3.57)$$

$$w_{jk} \in \{0,1\}, \quad \forall j \in J, \quad k \in K \quad (3.58)$$

$$U_j \in \{0,1\}, \quad \forall j \in J \quad (3.59)$$

$$a_{ig} \in \{0,1\}, \quad (i, g) \in D_{min,max} \quad (3.60)$$

Amaç fonksiyonu olan Eşitsizlik 3.34, birincil olarak takım sayısını ikincil olarakta açılan istasyon sayısının en küçüklenmesini sağlamaktadır.  $\frac{1}{10^a}$  katsayısı ile çarpımı istasyon sayısının ikincil olarak en küçüklenmesini sağlamaktadır. “a” burada parameter değeri olarak girilen maksimum istasyon sayısının basamak sayısıdır. Örneğin J=12 için a=2’dir. Eşitsizlik 3.35, atama kısıtıdır ki bir işin yalnızca bir istasyona atanmasını sağlamaktadır. Eşitsizlik 3.36, bir istasyona atanan bir görevin, o istasyonda sadece bir işçi tarafından yapılmasını sağlar. Eşitsizlik 3.37 tüm öncelik ilişkilerinin sağlanmasından emin olur. Eşitsizlik 3.38, tüm işlerin çevrim zamanından önce bitmesini sağlar. Eşitsizlik 3.39, 3.40 ve 3.41 sıralama kontrol kısıtlarıdır. Tüm i ve h işleri için, eğer i, h işinin bir ardılı ise, Eşitsizlik 3.39 i işinin başlangıç süresinin h işinden sonar olmasını sağlar. Eğer i ve h işleri arasında herhangi bir öncelik ilişkisi bulunmuyor ve aynı istasyonda aynı işçi tarafından yapılıyor ise, Eşitsizlik 3.40 ve 3.41 aktif hale geçer. Örneğin, i, h’den önce atanmış ise yih=1 değerini alır ve Eşitsizlik 3.39 sth – sti  $\geq$  Pi şeklini alır. Diğer taraftan, eğer h, i’den önce atanmış ise, Eşitsizlik 3.40 aktif olur. Eğer i ve h farklı istasyonlara atanmış ise Eşitsizlik 3.39, 3.40 ve 3.41 yeterince büyük bir sayı ile çarpılarak pasif hale getirilir. Eşitsizlik 3.42 herhangi bir istasyona iş ataması yapılmış ise istasyonun açıldığını gösterir. Eşitsizlik 3.43, istasyonların artan bir şekilde açılmasını sağlar. Eşitsizlik 3.44, bir istasyon açılmış ise oraya kesinlikle bir iş atanmasını sağlar. Eşitsizlik 3.45, açılan bir istasyonda henharngi bir işçiye atama yapılmış ise o işçinin aktif olduğunu gösterir. Eşitsizlik 3.46, senkron kısıtı için işlerin başlama zamanının eşit olmasını sağlar. Eşitsizlik 3.47, beraber veya senkron işlerin aynı istasyona atamasını sağlar. Eşitsizlik 3.48, aynı istasyonda bulunması istenmeyen işlerin farklı istasyonlara atanmasını sağlar. Eşitsizlik 3.49, atanacağı istasyonun belli olduğu iş için bir kısıttır. Eşitsizlik 3.50 ve 3.51 aralarında minimum uzaklık olması istenen işler için kısıttır. Eşitsizlik 3.52 ve 3.53 aralarında maksimum uzaklık olması istenen işler için kısıttır. Eşitsizlik 3.54, tüm işlerin başlama zamanının 0 veya 0’dan büyük olmasını sağlar. Eşitsizlik 3.55, 3.56, 3.57, 3.58, 3.59 ve

3.60 işaret kısıtlarını gösterir.

### 3.5.3. Çözüm için tabu arama algoritması tabanlı bir yaklaşım

Tabu arama algoritması (TAA) temelde yerel arama kullanarak optimizasyon problemlerinin çözümü için kurgulanmış bir meta sezgisel yöntemdir. Yerel optimum noktalarda uzaklaşmak amacı ile Glover (1989a,b) tarafından geliştirilen TAA'nın, yapısında komşuluk, hareket, başlangıç çözümü, arama stratejisi, istek kriteri, hafıza yapısı, durdurma kriterleri yer alır. TAA, en küçükleme problemlerinde en iyi veya en iyiye yakın sonuçlar üretmek kaydı ile başarılı sonuçlar vermektedir (Taillard 1990). Montaj hattı dengeleme problemlerinde, çeşitli tabu arama çalışmaları yapılmıştır (Scholl and Voß 1996; McMullen 1998; Chiang 1999; Lapierre *eta al.* 2006).

Kullanıcı tarafından belirlenen sayıda iterasyon yapan TAA, komşuluk yapısına bağlı uygun çözümler üretir. Bu çalışmada önerilen TAA algoritması, çeşitli amaç fonksiyonlarını içerisinde barındırmaktadır.

#### 3.5.3.a. Tabu arama algoritmasının probleme uyarlanması

Çalışma kapsamında sunulan TAA, başlangıç çözümü ( $X_0$ ) ile bir uygun çözüm üretir. Bu çözümü aynı zamanda mevcut çözüm ( $X_m$ ) ve en iyi çözüm ( $X^*$ ) olarak kaydeder. Başlangıç uygun çözümü için amaç fonksiyonu değeri  $f(X_0)$ , mevcut çözüm  $f(X_m)$  ve  $f(X^*)$  değerlerine eşitlenir.  $X_m$ 'ye ait komşu çözümler bir hareket meydana getirilerek ortaya çıkarılır. Çıkan bu çözümler, aday çözümlerdir. Aday çözümler arasından, tabu listesinde olmayan en iyi amaç fonksiyonu değerine sahip veya istek kriterini sağlayan aday çözüm  $X'_m$  mevcut çözüm  $X_m$  olarak seçilir. Eğer  $X_m$ ,  $X^*$ 'dan daha iyi bir çözümlerse  $X^*=X_m$  olur. Bu süreç verilen bir iterasyon sayısına kadar devam eder.

### **Başlangıç Çözüm**

Başlangıç çözümünde, görevler istasyonlara öncelik ilişkilerine dayanarak atanmaları sağlanır. Atama işlemi öncelik değerlerinin yanı sıra, görevlere ait pozisyon katsayıları (PK) dikkate alınarak yapılır. PK, görev sayısına eşit olup 0-1 arası değerler alır. Çözüm başlangıcından önce bu değerler rasgele olarak atanır. Uygun bir çözüm elde etmek amacı ile atama kısıtları göz önünde bulundurularak en yüksek PK değerine sahip olan görev veya görevler seçilir ve hâlihazırda açık olan istasyona atanması yapılır. Atama işleminden sonra, atanabilir görevler listesi yenilenerek, tüm görevler atanıncaya kadar süreç devam ettirilir. Bir istasyon çevrim zamanı aşılmadığı müddetçe, yeni bir istasyon açılmaz.

### **Komşuluk üretme**

$X_m$  mevcut çözümünden, bir hareket yardımı ile üretilen yeni çözümlere komşu çözümler denir. TAA için bu çalışma kapsamında swap operatörü kullanılmıştır. Bu operatör, seçilen bir görev ile diğer tüm görevlerin PK değerlerinin değişimi ile elde edilen çözümler sunar.  $n$  adet görev bulunan bir problemde, seçilen bir görev tüm komşuluklar  $n-1$  adettir.

### **İstek (Aspirasyon) kriteri ve tabu listesi**

İstek kriteri, eğer bir çözüm tabu listesinde ise ve bir hareket ile elde edilen çözüm mevcut en iyi çözümden daha iyi sonuç üretiyor ise, tabu listesinde olmasına bakılmaksızın bu hareketin yapılmasıdır.

Tabu listesi, daha önceden yapılan hareketlerin tekrar yapılmamasını sağlayan bir mekanizma olup, çalışma kapsamında iki boyutlu bir tabu listesi (TL) kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, iki görev TL yer alıyor ise, o anki iterasyon sayısı ile TL boyutunun toplamına eşittir. Tabu listesi boyutu  $\lceil \sqrt{n} \rceil$  olarak alınmıştır.



### Durdurma kriteri

Çalışma kapsamında durdurma kriteri iterasyon sayısı olarak alınmış ve görev sayısına eşitlenmiştir.

### Performans kriterleri

Sonuçların değerlendirilmesi amacı ile istenilen yönde iyileştirme yapılmasını sağlayan anlamlı sonuçlardır. Bu çalışmada, üç adet performans kriteri dikkate alınmıştır. Bunlar hattın etkinliği (HE), düzgünlük indeksi (DI) ve istasyon sayısı (IS)'dir. HE'nin en büyüklenmesi ile işçi sayısı azaltılabilir. Bununla beraber DI'nin en küçüklenmesi ile istasyonlar arasındaki iş yükü mümkün olduğunda eşit dağıtılır. IS'nin küçültülmesi ile de hat boyunca kullanılan istasyon sayısının küçültülmesi hedeflenir.  $f_1(HE)$  ve  $f_2(DI)$   $f_3(IS)$  kullanılan performans kriterleri olmak üzere, elde edilen bir çözüm için aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$TIS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{C} \right] \quad (3.61)$$

$$f_1(HE) = 100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{NS \cdot C} \quad (3.62)$$

$$f_2(DI) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{NS} (c - s_j)^2}{NS}} \quad (3.63)$$

$$f_3(IS) = NW \quad (3.64)$$

$$f(s) = \frac{f_1^{\max}(\text{HE}) - f_1(\text{HE})}{f_1^{\max}(\text{HE}) - f_1^0(\text{HE})} + \frac{f_2^{\min}(\text{DI}) - f_2(\text{DI})}{f_2^{\min}(\text{DI}) - f_2^0(\text{DI})} + \frac{f_3^{\min}(\text{IS}) - f_3(\text{IS})}{f_3^{\min}(\text{IS}) - f_3^0(\text{IS})} \quad (3.65)$$

### Uygun çözüm oluşturulması

Algoritmanın herhangi bir ayağında, aşağıdaki adımların izlenmesi ile uygun çözümler elde edilir. İst, atanabilir istasyonu,  $Z_k$ , k. operatörün bitiş süresi,  $\ddot{O}_i$ , i görevine ait öncüller kümesini, AL, atanabilir işler listesini,  $Z_i$ , i. görevin süresini,  $BZ_i$ , i. görevin başlama zamanını ve  $BiZ_i$ , i. görevin bitiş zamanını göstermektedir.

Adım 1: İst =1

Adım 2: AL belirle. (AL={i | tüm  $\ddot{O}_i$  görevleri atanmış ve atama kısıtlarını sağlıyor ise}), Adım 3'den gelinmiş ve AL= { } ise İst = İst -1 ve Adım 14'e git.

Adım 3: Şayet AL= { } ise İst = İst +1, Adım 2'ye git. Şayet AL  $\neq$  { } ise Adım 4'e git.

Adım 4: AL görevler kümesinden en büyük PK değerine ait görevi al.

Adım 5: Seçilen görev senkron iş ise eşlenik görevini de al ve Adım 10'a git. Değilse, devam et.

Adım 6: Şayet  $BiZ_h \leq Z_k$  ise ( $BiZ_h = \text{enb} \{ BiZ_h \mid h \in \ddot{O}_i \text{ ve mevcut istasyonda ise} \}$ ,  $k \in K$ ), Adım 8'e git.

Adım 7: Şayet bazı  $BiZ_h \leq Z_k$  ve bazı  $BiZ_h > Z_k$  ise ( $BiZ_h = \text{enb} \{ BiZ_h \mid h \in \ddot{O}_i \text{ ve mevcut istasyonda ise} \}$ ,  $k \in K$ ),  $Z_k = BiZ_h$  (öyle ki  $\forall BiZ_h > Z_k$ ) ve Adım 8'e git.

Adım 8: Eğer birbirine eşit enk  $Z_k$  değeri var ise (n), 0-1 arasında rasgele sayı üret, rasgele sayı 0-1/n arasında ise 1. enk  $Z_k$ , 1/n ile 2/n arasında ise 2. enk  $Z_k$ , ... (n-1)/n ile

1 arasında ise n. enk  $Z_k$  değerini al,  $BZ_i = \text{enk } Z_k$ . Değilse  $BZ_i = \text{enk } Z_k$ , Adım 9'a git.

Adım 9: Eğer  $BZ_i + Z_i \leq C_t$  ise i görevini İst istasyonunda, k operatörüne ata  $BiZ_i = BZ_i + Z_i$ , ve Adım 2'ye git. Değilse,  $\dot{I}st = \dot{I}st + 1$ , Adım 2'ye git.

Adım 10: Şayet  $BiZ_h \leq Z_k$  ise ( $BiZ_h = \text{enb} \{ BiZ_h \mid h \in (\ddot{O}_i, \ddot{O}_{i1})$  ve mevcut istasyonda ise},  $k \in K$ ), Adım 12'ye git.

Adım 11: : Şayet bazı  $BiZ_h \leq Z_k$  ve bazı  $BiZ_h > Z_k$  ise ( $BiZ_h = \text{enb} \{ BiZ_h \mid h \in (\ddot{O}_i, \ddot{O}_{i1})$  ve mevcut istasyonda ise},  $k \in K$ ),  $Z_k = BiZ_h$  (öyle ki  $\forall BiZ_h > Z_k$ ) ve Adım 12'ye git.

Adım 12: Tüm  $Z_k$  değerlerin artan şekilde sırala, en küçük  $Z_k$  değeri ile beraber ondan sonra gelen ilk  $Z_{k1}$  değerini al,  $BZ_i = Z_{k1}$  ve Adım 13'e git.

Adım 13: Eğer  $BZ_i + \text{enb} \{ Z_i, Z_{i1} \} \leq C_t$  ise i görevini İst istasyonunda, k operatörüne, i1 görevini aynı istasyonda k1 operatörüne ata  $BiZ_i = BZ_i + Z_i$ ,  $BiZ_{i1} = BZ_i + Z_{i1}$ , ve Adım 2'ye git. Değilse,  $\dot{I}st = \dot{I}st + 1$ , Adım 2'ye git.

Adım 14: Amaç fonksiyonu hesapla.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde, çok operatörlü montaj hattı dengeleme problemleri için Bölüm 3 kapsamında sunulan durumlar ve çözüm önerileri ele alınmıştır. İlk kısımda, iş yükü dağılımlarının göz önünde bulundurulduğu problem tipi için önerilen yöntem ile literatürde var olan yöntem arasında karşılaştırma yapılarak, sonuçların etkinliği sunulmuştur. Daha sonra kalifiye çok operatörlü montaj hattı dengeleme problemleri için sunulan matematiksel model sonuçları ile sezgisel yöntem sonuçları karşılaştırılarak, orta ve büyük boyutlu test problemleri üzerinde sezgisel yöntem sonuçları sunulmuştur. Son olarak çeşitli atama kısıtları altında çok operatörlü montaj hattı dengeleme problemleri için önerilen matematiksel model ile küçük boyutlu test problemleri üzerinde sonuçlar alınarak, önerilen TAA tabanlı meta sezgisel yöntemin etkinliği gösterilmiştir. Orta ve büyük boyutlu test problemleri üzerinde, TAA ile alınan sonuçlar rapor edilmiştir.

Matematiksel modeller C# programı ara yüzü kullanılarak, GUROBİ 6.0 versiyonu ile çözümler elde edilmiştir. Bununla birlikte sezgisel yöntemler yine C# programlama dili ile kodlanarak her iki yöntem de Core i7 3.40 GHz işlemcili, 8 GB Ram'e sahip bilgisayarda çalıştırılmıştır.

##### 4.1. İş Yükü Dengeli Çok-Operatörlü Montaj Hattı Dengeleme Problemleri ve Karşılaştırmalı Sonuçlar

Ortaya konan matematiksel model, Fattahi *et al.* (2011) tarafından sunulan model ile literatürde var olan 5 adet küçük boyutlu problem üzerinde karşılaştırma testi yapılmıştır. Test problemleri Merten (1967), Bowmen (1960), Jaeschke (1964), Jackson (1956), and Mansoor (1964) tarafından sunulan ve literatürde sıkça kullanılan küçük boyutlu problemlerdir. Karşılaştırmalar öncelikle montaj hattında bulunan operatör sayısı ikincil olarak istasyon sayısı ve üçüncül olarak da iş yükü denge farkları dikkate alınarak yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.1'de verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** İş yükü dengeli montaj hattı karşılaştırma sonuçları

Problem	Önerilen Model					Fattahi <i>et al.</i> (2011) Model			
	Görev Sayısı	Çevrim Zamanı	İşçi Sayısı	İstasyon Sayısı	İş Yüğü Farkı	İşçi Sayısı	İstasyon Sayısı	İş Yüğü Farkı	İşçi ve İstasyon Farkı
Merten	7	6	6	3	13	6	3	21	0
		7	5	3	10	5	3	10	0
		8	5	3	10	5	3	18	0
		10	3	3	2	3	3	2	0
		15	2	2	1	2	2	1	0
		18	2	1	1	2	1	7	0
Bowman	8	17	5	5	28	5	5	28	0
		21	5	4	28	5	4	28	0
		24	4	4	33	4	4	43	0
		28	3	2	10	3	2	10	0
		31	3	2	10	3	2	10	0
Jaeschke	9	6	8	6	29	8	6	35	0
		7	7	6	28	7	6	30	0
		8	6	5	21	6	5	31	0
		10	4	4	3	4	4	7	0
		18	3	2	24	3	2	30	0
Jackson	11	7	8	6	38	8	6	38	0
		9	6	4	22	6	4	32	0
		10	5	4	10	5	4	10	0
		13	4	3	10	4	3	10	0
		14	4	3	12	4	3	18	0
		21	3	2	14	3	2	20	0
Mansoor	11	45	5	3	22	5	3	112	0
		54	4	3	37	4	3	65	0
		63	3	2	6	3	2	6	0
		72	3	2	2	3	2	54	0
		81	3	2	56	3	2	76	0
Toplam Fark					480	Toplam Fark		752	

Bu çalışmada literatürde sıkça kullanılan 5 adet test problemi 27 farklı şekilde karşılaştırma testine tabi tutulmuştur. Tüm test problemlerinde öncelikli amaç fonksiyonu olan operatör ve istasyon sayıları eşit olmakla beraber 16'sında sunulan modelin daha dengeli iş yükü dağılımına sahip atama yaptığı gösterilmiştir. 11 adet test probleminde ise herhangi bir üstünlük sağlanamamıştır. Test sonuçlarına göre yapılan karşılaştırmada ortaya konulan model, toplam iş yükü denge farkını %36,17'lik bir iyileştirme ile 752'den 480'e düşürmüştür.

#### **4.2. Kalifiye Çok-Operatörlü Montaj Hattı Dengeleme Problemleri ve Karşılaştırmalı Sonuçlar**

Problemin NP-zor yapısından dolayı sunulan matematiksel model orta ve büyük boyutlu test problemlerinde en iyi sonuçlarını uygun zaman aralığında bulamamıştır. Bu nedenle çeşitli büyüklükteki test problemlerine uygun zamanlarda olurlu çözümler üretmek amacı ile sezgisel bir yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen sezgisel yöntemin etkinliğinin gösterilmesi maksadı ile küçük boyutlu test problemleri üzerinde matematiksel model çözümü ile karşılaştırılmış olup, Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Önerilen yöntemlerin sınanması amacı ile literatürde var olan 10 adet test problemi 57 farklı çevrim zamanı için test edilmiştir. Bunlardan 5 adet test problemi küçük boyutlu olup, toplam 27 farklı çevrim zamanı için sezgisel yöntem ve matematiksel model ile teste tabi tutulup, tamamında sezgisel yöntemin, matematiksel model ile hesaplanan en iyi değerlere ulaştığı görülmektedir.

Bundan dolayı, sezgisel model ile 4 adet orta boyutlu ve 1 adet büyük boyutlu test problemleri sonuçları ile beraber Çizelge 4.3 ve 4.4'de sunulmuştur.

**Çizelge 4.2.** Önerilen sezgisel yöntem ve MIP karşılaştırması

		Önerilen Sezgisel Yöntem					MIP		
Problem	Görevler	Ç. Zamanı	Toplam Takım	Maks. Takım	İstasyon Sayısı	Operatör Sayısı	İstasyon Sayısı	Operatör Sayısı	İst. ve Opt. Farkı
Merten	7	6	3	3	3	6	3	6	0
		7	3	3	3	6	3	6	0
		8	3	3	3	5	3	5	0
		10	3	3	3	5	3	5	0
		15	3	3	2	4	2	4	0
		18	3	3	1	3	1	3	0
Bowman	8	17	3	3	4	6	4	6	0
		21	3	3	4	6	4	6	0
		24	3	3	4	6	4	6	0
		28	3	3	3	4	3	4	0
		31	3	3	3	4	3	4	0
Jaeschke	9	6	3	3	7	8	7	8	0
		7	3	3	6	7	6	7	0
		8	3	3	6	7	6	7	0
		10	3	3	4	6	4	6	0
		18	3	3	2	4	2	4	0
Jackson	11	7	3	3	6	8	6	8	0
		9	3	3	4	6	4	6	0
		10	3	3	4	6	4	6	0
		13	3	3	3	5	3	5	0
		14	3	3	3	4	3	4	0
		21	3	3	2	4	2	4	0
Mansoor	11	45	3	3	4	6	4	6	0
		54	3	3	3	4	3	4	0
		63	3	3	3	4	3	4	0
		72	3	3	3	4	3	4	0
		81	3	3	2	4	2	4	0

**Çizelge 4.3.** Orta boyutlu test problemleri üzerinde sezgisel yöntem sonuçları

Problem	Görevler	Çevrim zamanı	Toplam Takım	Maks. Takım	Önerilen Sezgisel Yöntem	
					Toplam İstasyon Sayısı	Operatör Sayısı
Mitchell	21	14	5	4	8	14
		15	5	4	8	14
		21	5	4	5	12
		26	5	4	5	12
		35	5	4	3	10
		39	5	4	3	10
Heskia	28	138	5	4	5	11
		205	5	4	4	9
		216	5	4	3	9
		256	5	4	3	8
		324	5	4	3	7
		342	5	4	3	7
Sawyer	30	25	5	4	11	18
		27	5	4	11	17
		30	5	4	10	15
		36	5	4	7	13
		41	5	4	6	13
		54	5	4	5	9
Kilbridge	45	75	5	4	4	8
		57	6	4	10	14
		79	6	4	7	9
		92	6	4	7	8
		110	6	4	6	8
		138	6	4	5	7
		184	6	4	4	7

**Çizelge 4.4.** Büyük boyutlu test problemi üzerinde sezgisel yöntem sonuçları

Problem	Görevler	Çevrim zamanı	Toplam Takım	Maks. Takım	Önerilen Sezgisel Yöntem	
					Toplam İstasyon Sayısı	Operatör Sayısı
Tonge	70	176	7	4	22	30
		364	7	4	10	16
		410	7	4	10	16
		468	7	4	9	15
		527	7	4	8	14



### 4.3. Atama Kısıtlı Çok-Operatörlü Montaj Hattı Dengeleme Problemleri ve Karşılaştırmalı Sonuçlar

Problemin NP-zor yapısından dolayı sunulan matematiksel model orta ve büyük boyutlu test problemlerinde en iyi sonuçları uygun zaman aralığında bulamamıştır. Bu nedenle çeşitli büyüklükteki test problemlerine uygun zamanlarda olurlu çözümler üretmek amacı ile Tabu arama algoritması temelli bir meta-sezgisel bir yöntem geliştirilmiştir. Matematiksel model C# programı ara yüzü kullanılarak GUROBI 6.0 versiyonu ile çözümler elde edilmiştir. Bununla birlikte sezgisel yöntem yine C# programlama dili ile kodlanarak her iki yöntemde Core i7 3.40 GHz işlemcili, 8 GB Ram'e sahip bilgisayarda çalıştırılmıştır. Geliştirilen sezgisel yöntemin etkinliğinin gösterilmesi maksadı ile küçük boyutlu test problemleri üzerinde matematiksel model çözümü ile karşılaştırılmış olup, Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Ortaya konan atama kısıtlı çok operatörlü montaj hattı dengeleme problemine ait literatürde test problemlerine rastlanmamıştır. Matematiksel model ve sezgisel yöntemin etkinliklerinin sınanması amacı ile çok-operatörlü montaj hattı dengeleme problemlerinin en çok kullanıldığı 12 adet test problemi çeşitli çevrim zamanları altında ele alınmıştır. Bu test problemlerine Çizelge 4.5'de gösterildiği üzere senkron, pozitif ve negatif bölgeleme kısıtları olarak ele alınmıştır. Senkron görevler kümesinde bulunan  $\{a, b\}$  senkron olarak yapılacak görevleri temsil etmektedir. Burada a görevi ile b görevinin aynı istasyonda paralel bulunan operatörler tarafından eş zamanlı olarak montaja başlanacağını göstermektedir. Pozitif ve negatif bölgeleme kısıtları yine aynı şekilde  $\{a, b\}$  olarak gösterilmiş olup, a görevi eğer bir istasyona atanmış ise b görevinin de aynı istasyona atanması koşulu pozitif bölgeleme (PB), farklı istasyona atanması koşulu ise negatif bölgeleme (NB) kümelerinde sunulmuştur.

Çizelge 4.5. Senkron, PB ve NB'ye ait atama kısıtları

Problem	n	Senkron (görev, görev)	PB (görev, görev)	NB (görev, görev)
Arcus1	83	{3,7}, {19,15}, {14,25}, {32,29}, {74,75}	{27,69},{17,21}, {52,53},{71,73}, {8,77}	{7,8},{24,26},{32,37} , {71,77}, {42,43}
Arcus2	111	{39,83},{5,6}, {27,28},{70,71}, {92,93},{105,106}	{13,71},{23,32}, {72,74},{77,84}, {96,101}, {63,111}	{81,82},{90,91}, {28,29}, {42,52},{31,32}, {80,83}
Bowman	8	{4,5}	{6,7}	{1,6}
Heskiaoff	28	{15,26},{25,27}	{9,10},{26,27}	{10,11}, {24,25}
Jackson	11	{6, 7}, {8, 9}	{2, 3}	{7, 9}
Jaeschke	9	{7, 8}, {5, 6}	{2, 3}	{1, 2}
Kilbridge	45	{9,14},{37,41}, {26,28}	{36,38},{2,11}, {15,24}	{12,37}, {16,19},{11,36}
Mansoor	11	{2, 3}	{10, 11}	{1, 3}
Mertens	7	{2, 4}	{3, 5}	{1, 6}
Mitchell	21	{13,14}	{9,10}	{5, 8}, {17,19}
Sawyer	30	{15,21},{14,10}	{28,30},{11,14}	{1, 15},{17,18}
Tonge	70	{14,17}, {7,15},{21,22}, {41,69},{6,24}	{1,41},{64,67}, {35,62},{20,21}, {19,20}	{9,19},{57,69},{3,5}, {9,13}, {8,9}

Çizelge 4.6'da istasyon, en küçük ve en büyük uzaklık kısıtları aynı test problemleri üzerinde gösterilmiştir. İstasyon kısıtı, {a, b} olmak üzere a istasyon numarasını, b ise görevi temsil etmektedir. Burada b görevinin kesinlikle ilgili a istasyonuna atanması gerekliliğini göstermektedir. En küçük (Min Uzaklık) ve en büyük uzaklık (Max Uzaklık) ise görevler arasında bulunması istenen uzaklık kısıtlarını temsil etmektedir. {a, b, c} ile ifade edilen kısıtlarda a ve b görevleri göstermekle beraber c'de bu iki

görev arasında bulunması gerekli olan istasyon sayısını göstermektedir.

Bu açıklamalar doğrultusunda, test problemlerine ait tüm atama kısıtları Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da sunulduğu gibidir.

**Çizelge 4.6.** İstasyon, Min Uzaklık ve Max Uzaklık'a ait atama kısıtları

<b>Problem</b>	<b>n</b>	<b>İstasyon Kısıtları</b> <b>{istasyon, görev}</b>	<b>Min Uzaklık</b> <b>{(görev,görev),</b> <b>uzaklık}</b>	<b>Max Uzaklık</b> <b>{(görev,görev),</b> <b>uzaklık}</b>
Arcus1	83	{1,4},{3,22},{5,12}	{30,46,1},{55,66,1}, {10,20,1}	{27,69,4},{26,74,5}, {15,39,5}
Arcus2	111	{1,2},{1,1},{1,3}, {3,29},{4,32}, {5,50}	{9,32,1},{46,52,1},{82, 83,2},{4,5,1},{91,106, 2}	{1,2,1},{22,83,3}, {26,82, 3},{45,51,2},{72, 80,3}
Bowman	8	{1,1}	{7,8,1}	{1,2,2}
Heskiaoff	28	{2,20}	{8,13,1},{2,17,1}	{2,6,1},{1,20,1}
Jackson	11	{2,3}	{1,2,1}	{10,11,1}
Jaeschke	9	{2,2}	{4,5,1}	{1,2,2}
Kilbridge	45	{2,10},{1,12}	{12,37,1},{6,10,1}	{1,14,3}, {9,41,2}
Mansoor	11	{1,1}	{1,3,1}	{6,7,1}
Mertens	7	{1,2}	{5,7,1}	{1,2,2}
Mitchell	21	{3,21}	{8,13,1}	{5,6,2}
Sawyer	30	{1,2},{2,11}	{13,21,1},{9,26,2}	{2,6,2},{1,20,3}
Tonge	70	{1,1},{1,69},{2,2}	{8,11,1},{68,69,2}, {30,31,1}	{26,35,2},{19,57,3}, {6,12,4}

Çeşitli atama kısıtları altında incelenen çok operatörlü montaj hattı dengeleme problemi, literatürde yer alan ve en sık kullanılan 12 adet küçük, orta ve büyük boyutlu test problemi üzerinde çeşitli çevrim zamanları altında 74 farklı şekilde teste tabi

tutulmuştur. Öncelik olarak sezgisel yöntemin etkinliğinin gösterilmesi amacı ile 6 adet küçük boyutlu test problemleri üzerinde matematiksel modele ait en iyi sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bunun sonucunda sezgisel yöntemin tüm küçük boyutlu test problemleri üzerinde en iyi sonuç değerlerine ulaştığı görülüp, aynı zamanda sonuçlara ait LI, SI ve Suf (%) değerleri de verilmiştir.  $Suf(\%) = \frac{ist}{opt}$  denkleminde hesaplanıp, alan kullanım faktörü olarak literatürde yer almaktadır (Roshani *et al.* 2013). *ist*, hat boyunca açılan toplam istasyon sayısını, *opt* ise hatta kullanılan toplam operatör sayısını göstermektedir.

Bunun yanı sıra, orta ve büyük boyutlu problemlere ait TAA sonuçları Çizelge 4.8’de sunulmuştur. Bu sonuçlarda hat boyunca gerekli olan istasyon sayısı, istasyonlarda kullanılan toplam operatör sayısı ile beraber LI, SI ve Suf(%) değerleri de verilmiştir. Raporlanan sonuçlar literatürde düz montaj hattı için gerekli olan optimum istasyon sayıları ile karşılaştırılmıştır. Bu sayı, çok operatörlü montaj hattı dengeleme problemleri için hat boyunca kullanılan operatör sayısı için en iyi değer özelliği sağlamakla beraber atama kısıtlı çok operatörlü montaj hattı dengeleme problemleri için ise bir alt sınır teşkil etmektedir. Bu bilgi ışığında alınan sonuçlara bakıldığında kalın yazı ile gösterilen sonuçlarda en iyi değerlere ulaşıldığı görülmektedir. Bunun yanı sıra atama kısıtları altında gerekli olan ekstra operatör sayıları en küçük değerinin 1, en büyük değerinin ise 4 olduğu görülmektedir.

Bundan dolayı çeşitli atama kısıtları altında çok operatörlü montaj hattı dengeleme problemi, beraberinde getirdiği birçok atama kısıtı ile daha karmaşık bir yapıya sahip olduğu ve daha fazla istasyon veya operatöre ihtiyaç duyabileceği anlaşılmaktadır.

**Çizelge 4.7.** TAA ve model çözümü karşılaştırması

Problem Adı	Görev Sayısı	ÖNERİLEN MODEL ÇÖZÜM					TAA ÇÖZÜM			
		Ct	Optimum İstasyon	Operatör Sayısı	İstasyon	Operatör Sayısı	İstasyon	LE	SI	Suf(%)
Bowman	8	17	5	7	5	7	5	63,03	7,521	0,71
		20	5	6	5	6	5	62,5	9,246	0,83
		21	5	6	5	6	5	59,52	10,074	0,83
		24	4	6	5	6	5	52,08	13,032	0,83
		28	3	4	3	4	3	66,96	13,665	0,75
		31	3	4	3	4	3	60,48	15,851	0,75
Jackson	11	7	8	9	6	9	6	73,02	2,56	0,67
		9	6	8	5	8	5	63,89	3,905	0,63
		10	5	6	4	6	4	76,67	2,944	0,67
		13	4	6	4	6	4	58,97	6,137	0,67
		14	4	6	4	6	4	54,76	6,928	0,67
		21	3	5	3	5	3	43,81	11,991	0,60
Jaeschke	9	6	8	9	6	9	6	68,51	2,333	0,67
		7	7	8	6	8	6	66,07	2,894	0,75
		8	6	8	6	8	6	57,81	3,758	0,75
		10	4	6	4	6	4	61,67	4,301	0,67
		18	3	4	3	4	3	51,39	9,151	0,75
Mansoor	11	45	5	6	4	6	4	68,52	20,579	0,67
		48	4	5	4	5	4	77,08	19,924	0,80
		54	4	5	4	5	4	68,52	24,823	0,80
		62	3	4	3	4	3	74,59	29,107	0,75
		63	3	4	3	4	3	73,41	29,609	0,75
		72	3	4	3	4	3	64,23	35,485	0,75
		81	3	4	3	4	3	57,09	44,0539	0,75
94	2	4	3	4	3	49,21	54,048	0,75		
Mertens	7	6	6	6	3	6	3	80,55	1,354	0,50
		7	5	6	3	6	3	69,05	2,273	0,50
		8	5	6	3	6	3	60,42	3,24	0,50
		10	3	4	3	4	3	72,5	3,041	0,75
		15	2	3	2	3	2	64,44	5,656	0,67
		18	2	3	2	3	2	53,7	8,386	0,67
Mitchell	21	14	8	9	7	9	7	83,33	3,636	0,78
		15	8	9	7	9	7	77,78	4,321	0,78
		21	5	6	5	6	5	83,33	5,338	0,83
		26	5	6	5	6	5	67,31	12,747	0,83
		35	3	5	4	5	4	60	16,757	0,80
		39	3	5	4	5	4	53,84	19,121	0,80

**Çizelge 4.8.** TAA ile orta ve büyük boyutlu test problemi sonuçları

Problem Adı	Görev Sayısı	Ct	Optimum İstasyon	Operatör Sayısı	İstasyon	TAA ÇÖZÜM			
						Ek Operatör	LE	SI	Suf(%)
Arcus1		5048	16	17	12	1	88,22	807,268	0,71
		5853	14	15	12	1	86,23	1058,579	0,80
		6842	12	13	10	1	85,11	1392,098	0,77
		7571	11	12	8	1	83,33	1661,571	0,67
		8412	10	11	7	1	81,81	2152,628	0,64
		8898	9	10	7	1	85,08	1816,551	0,70
		10816	8	9	6	1	77,77	3261,141	0,67
Arcus2	111	5755	27	29	17	2	90,11	805,978	0,59
		8847	18	19	14	1	89,473	1446,819	0,74
		10027	16	17	12	1	88,23	1447,542	0,71
		10743	15	16	11	1	87,49	1643,919	0,69
		11378	14	15	11	1	88,12	1853,702	0,73
		17067	9	10	7	1	88,12	2782,103	0,70
Heskiaoff	28	138	8	8	5	0	92,75	15,041	0,63
		205	5	6	4	1	83,25	46,141	0,67
		216	5	5	3	0	94,81	12,727	0,60
		256	4	5	3	1	80	67,061	0,60
		324	4	4	3	0	79,01	109,313	0,75
		342	3	4	2	1	74,85	110,695	0,50
Kilbridge	45	57	10	11	8	1	88,03	11,897	0,73
		79	7	8	5	1	87,34	12,932	0,63
		92	6	7	4	1	85,71	21,837	0,57
		110	6	6	4	0	83,636	32,848	0,67
		138	4	5	3	1	80	37,836	0,60
		184	3	4	2	1	75	49,824	0,50
Sawyer	30	25	14	15	10	1	86,4	4,219	0,67
		27	13	14	9	1	85,71	5,358	0,64
		30	12	13	8	1	83,07	6,433	0,62
		36	10	10	7	0	90	6,855	0,70
		41	8	9	5	1	87,81	7,71	0,56
		54	7	7	4	0	85,71	10,875	0,57
		75	5	5	4	0	86,4	13,674	0,80
Tonge	70	176	21	25	18	4	79,77	50,752	0,72
		364	10	12	8	2	80,35	113,521	0,67
		410	9	11	7	2	77,82	141,884	0,64
		468	8	10	7	2	75	167,398	0,70
		527	7	9	5	2	74,01	197,649	0,56

## 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada ele alınan montaj hattı dengeleme problemi, her bir istasyonda eş zamanlı olarak aynı ürün üzerinde montaj işlemlerini yapan çeşitli sayıda operatörün bulunduğu bir hat dengeleme problemidir. Literatürde bu tip çok operatörlü montaj hattı dengeleme problemlerine ait çalışmalar son birkaç yıldır ele alınarak çeşitli çözüm önerileri sunulmuştur. Bu çalışma kapsamında, daha önceden çok operatörlü montaj hattı problemleri için ele alınmayan ancak literatürde ve gerçek hayat uygulamalarında karşımıza çıkan çeşitli durumlar ele alınarak, çözüm önerileri sunulmuştur.

Bunlardan ilki operatörler arası iş yükü dengesini de göz önünde bulunduran, böylelikle hattın ve istasyon en küçüklenmesinin yanı sıra operatörlere olabildiğince eşit iş yükü dağılımının gerçekleştirildiği bir matematiksel model, çok operatörlü montaj hattı dengeleme problemleri için önerilmiştir. Önerilen modelin etkinliği, literatürde var olan çözüm önerisi ile test problemleri üzerinde karşılaştırmalar yapılarak gösterilmiştir.

Bununla beraber, teknolojinin de getirdiği imkanlar sayesinde karışık yapıya sahip ürünler üzerinde montaj işlemi gerçekleştiren operatörlerin çeşitli özelliklere sahip kalifiye elemanlar olması gerçek hayat uygulamalarında karşılaşılan durumlardandır. Bu tarz kalifiye operatörlerin bulunduğu çok operatörlü montaj hattı dengeleme problemleri için matematiksel model ile birlikte, sezgisel bir yöntem de önerilmiştir. Önerilen sezgisel yöntemin etkinliği küçük boyutlu test problemleri üzerinde sınanarak en iyi sonuçlar ürettiği raporlanmıştır.

Literatürde sunulan çözüm önerileri, bazı durumlarda gerçek hayat problemleri için uygulanabilir olmadığı bilinmektedir. Bunun en temel nedeni, üretim sırasında karşılaşılan bazı kısıtların göz ardı edilerek problemi daha basit şekli ile ele alınmasıdır. Bahsedilen durumu ortadan kaldırmak amacı ile bu çalışma kapsamında ele alınan bir diğer alt başlık, çok operatörlü montaj hatlarını çeşitli atama kısıtları altında ele alınmasıdır. Böylelikle, hat boyunca çeşitli nedenlerde dolayı oluşabilecek kısıtlar da

göz önünde bulundurularak, gerçek hayat problemleri için daha uygulanabilir hali ile ortaya konmuştur. Bu amaçla, problem için matematiksel model ve sezgisel bir çözüm önerisi sunulmuştur. Önerilen matematiksel modelin küçük boyutlu test problemleri üzerinde en iyi sonuçlara ulaştığı görülürken, orta ve büyük boyutlu test problemleri üzerinde etkisini kaybettiği görülmüştür. Bu amaçla önerilen sezgisel yöntemin etkinliği, matematiksel model ile elde edilen en iyi çözümler ile kıyaslanarak gösterilmiş, orta ve büyük boyutlu problemler üzerinden alınan sonuçları da raporlanmıştır.

Bu çalışma kapsamında, büyük boyutlu ürünlerin üretiminde ve istasyonlarda çok sayıda operatörün bulunduğu gerçek hayat uygulamalarında sıklıkla karşılaşılan problemlerin çözümleri için çeşitli önerilerde bulunulmuştur. İşletmeler açısından, özellikle otomotiv sanayinde, küçük iyileştirmelerin dahi büyük kazanımlar getirebileceği bilinmektedir. Bundan dolayı, sunulan çalışmanın işletmelere ekonomik anlamda katkı sağlayacağı dolayısı ile ülke ekonomisi içinde olumlu yönde etkisi olacağı düşünülmektedir.

Ayrıca yine gerçek hayat uygulamalarında, aynı istasyonda yapılan görevler içerisinde, bir görev tamamlandıktan sonra kendisinden sonra gelen görevlerin çeşitli hazırlıklar gerektirebileceği için hattın dengelenmesini etkileyecektir. Bu amaçla çok operatörlü montaj hattı dengeleme problemlerinin hazırlık zamanları ile ele alınmasına ihtiyaç vardır.

Bunun yanı sıra, gerçek hayat problemlerinde bazı amaçlar karar vericiler tarafından net bir şekilde belirlenebilirken, bazı amaçlar bu kadar rahat tanımlanamazlar. Bundan dolayı literatürde çeşitli amaçlar için çok operatörlü montaj hattı dengeleme problemlerine, bulanık veya gri modelleme ile çözüm önerileri sunulabilir.

Bununla beraber yapılan çalışma kapsamında ve literatürdeki çok operatörlü montaj hattı dengeleme problemleri şu ana kadar görev süreleri açısından deterministik yapıdadır. Oysa, gerçek hayat uygulamalarında bu verilerin belirli bir ortalama ve



standart sapma değerine bağlı olarak da ele alındığı bilinmektedir. Bu amaçla problemin stokastik programlama ile modellenebileceği literatürde görölen boşluklardandır.

Literatürde, işlem zamanlarında zaman veya pozisyona göre artan bir yapı göstermesi halinde bozulma, azalan bir yapı olması durumunda ise öğrenme olarak tanımlanmaktadır. Bu olgu, öğrenme ve bozulma etkisi olarak ifade edilmektedir. Montaj hattı dengeleme problemleri de yapısal olarak tekrarlı işlerin ardıl bir sıra ile yapılmasından dolayı, öğrenme ve bozulma etkilerinin sıkça görölebileceği problem tiplerindedir. Gerçek hayat uygulamalarında, iş gücüne dayalı çok operatörlü montaj hatlarının, bahsedilen öğrenme ve bozulma fonksiyonları altında ele alınması işlem süreleri ve dolayısı ile gerekli operatör ve istasyon sayının belirlenmesinde önemli rol oynayacaktır.

**KAYNAKLAR**

- Agrawal, S., Tiwari, M.K., 2008. A collaborative ant colony algorithm to stochastic mixed-model U-shaped disassembly line balancing and sequencing problem. *Int J Prod Res*, 46 (6), 1405–1429.
- Ağpak, K., Gokcen, H., 2007. A chance-constrained approach to stochastic line balancing problem. *Eur J Oper Res*, 180, 1098–1115.
- Ağpak, K., Zolfaghari, S., 2015. Mathematical models for parallel two-sided assembly line balancing problems and extensions. *International Journal of Production Research*, 53(4), 1242–1254.
- Akpinar, S., Bayhan, G.M., Baykasoglu, A. 2013. Hybridizing ant colony optimization via genetic algorithm for mixed-model assembly line balancing problem with sequence dependent setup times between tasks. *Appl Soft Comput*, 13, 574–589.
- Annarongsri, S., Limnararat, S., 2007. A hybrid tabu search method for assembly line balancing. *Proceedings of the 7th international conference on simulation (modelling and optimization) China*.
- Avikal, S., Jain, R., Mishra, P.K., Yadav, H.C., 2013. A heuristic approach for U-shaped assembly line balancing to improve labour productivity. *Comput Ind Eng*, 64, 895–90.
- Bagher, M., Zandieh, M., Farsijani, H., 2011. Balancing of stochastic U-type assembly lines: an imperialist competitive algorithm. *Int J Adv Manuf Technol*. 54, 271–285.
- Bai, Y., Zhao, H., Zhu, L., 2009. Mixed-model assembly line balancing using the hybrid genetic algorithm. *ICMTMA*, 3, 242–245.
- Barathwaj, N., Raja, P., Gokulraj, S., 2015. Optimization of assembly line balancing using genetic algorithm. *Journal of Central South University*, 22 (10), 3957–3969.
- Baybars, İ., 1986. A Survey of Exact Algorithms for the Simple Assembly Line Balancing Problem. *Management Science*, 32, 909–932.
- Baykasoglu, A., 2006. Multi-rule multi-objective simulated annealing algorithm for straight and U type assembly line balancing problems. *J Intell Manuf*, 17, 217–232.
- Baykasoglu, A., Dereli, T., 2009. Simple and U-type assembly line balancing by using an ant colony based algorithm. *Mathematical and Computational Applications*, 14 (1), 1–12.
- Baykasoglu, A., Ozbakir, L., 2007. Stochastic U-line balancing using genetic algorithms. *Int J Adv Manuf Technol*, 32, 139–147.
- Baykasoglu, A., Dereli, T., 2008. Two-sided assembly line balancing using an antcolony-based heuristic. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36, 582–588.
- Becker, C., Scholl, A., 2006. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168, 694–715.
- Becker, C., Scholl, A., 2009. Balancing assembly lines with variable parallel workplaces: Problem definition and effective solution procedure. *European*

- Journal of Operational Research, 199, 359-374.
- Bowman, E.H. (1960). Assembly line balancing by linear programming. *Operations Research*, 8, 385–389.
- Boysen, N., Fliedner, M. and Scholl, A., 2007. A Classification of Assembly Line Balancing Problems. *European Journal of Operational Research*, 183 (2), 674–693.
- Boysen, N., Fliedner, M. and Scholl, A., 2009. Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique. *European Journal of Operational Research*, 192, 349–373.
- Boysen, N., Fliedner, M., 2008 A versatile algorithm for assembly line balancing. *Eur J Oper Res*, 184, 39–56.
- Buxey, G.M., Slack, N.D., Wild, R., 1973. Production flow line system design – A review. *AIIE Transactions*, 5, 37-48.
- Buyukozkan, K., Kucukkoc, I., Satoglu, S.I., Zhang, D.Z., 2016. Lexicographic bottleneck mixed-model assembly line balancing problem: Artificial bee colony and tabu search approaches with optimised parameters. *Expert Systems with Applications*, 50, 151-166.
- Cakir, B., Altiparmak, F., Dengiz, B., 2011. Multi-objective optimization of a stochastic assembly line balancing: a hybrid simulated annealing algorithm. *Comput Ind Eng*, 60, 376–384.
- Cevikcan, E., Durmusoglu, M.B., Unal, M.E., 2009. A team-oriented design methodology for mixed model assembly systems. *Computers and Industrial Engineering*, 56, 576-599.
- Cheshmehgaz, H.R., Desa, M.I., Kazemipour, F., 2012. A cellularrearranging of population in genetic algorithms to solve assemblyline balancing problem. *J Mech Eng Autom*, 2, 25–35.
- Chiang, W.C., 1999. The application of a tabu search metaheuristic to the assembly line balancing problem. *Annals of Operations Research*, 209-227.
- Chica, M., Cordon, O., Damas, S., Bautista, J., 2010. Multi-objective constructive heuristics for the 1/3 variant of the time and space assembly line balancing problem: ACO and random greedy search. *Inf Sci*, 180, 3465–3487.
- Chica, M., Cordon, O., Damas, S., Bautista, J., 2011. Including different kinds of preferences in a multi-objective ant algorithm for time and space assembly line balancing on different Nissan scenarios. *Expert Syst Appl*, 38, 709–720.
- Chica, M., Cordon, O., Damas, S., Bautista, J., 2012. Multiobjective memetic algorithms for time and space assembly line balancing. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25, 254–273
- Chong, K.E., Omar, M.K., Baker, N.A., 2008. Solving assembly line balancing problem using genetic algorithm with heuristic treated initial population. *Proceedings of the World Congress on Engineering*, ISBN:978-988-17012-3-7.
- Chutima, P., Olanviwatchai, P., 2010. Mixed model U shaped assembly line balancing problem with coincidence memetic algorithm. *Journal of Softw Eng Appl*, 3, 347–363.
- Corominas, A., Pastor, R., Plans, J., 2008. Balancing assembly line with skilled and unskilled workers. *Omega*, 36(6), 1126–1132.
- Cuoglu, I.S., Erel, E., Alp, A., 2009. Ant colony optimization for the single model U-type assembly line balancing problem. *International Journal of Production*

- Economics, 120, 287–300.
- Çerçioğlu, H., 2009. Stokastik paralel montaj hattı dengeleme problemi için yeni modeller. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Dar-El, E.m., Rubinovitch Y., 1979. MUST—a multiple solutions technique for balancing single model assembly lines, *Management Science* 25, 1105–1114.
- Deckro, R.F., Rangachari, S., 1990. A goal approach to assembly line balancing. *Comput Oper Res*, 17 (5), 509–521.
- Derya, T., 2012. Maliyet Tabanlı Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemleri: Yeni Modeller. Doktora Tezi, Fen Bilimler Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Dimitriadis, S.G., 2006. Assembly line balancing and group working: A heuristic procedure for workers' groups operating on the same product and workstation. *Computers and Operations Research*, 33, 2757–74.
- Erel, E., and Sarin, S.C., 1998. A survey of the assembly line balancing procedures. *Production Planning and Control*, 9, 414–434.
- Erel, E., Sabuncuoglu, I., Sekerci, H., 2005. Stochastic assembly line balancing using beam search. *Int J Prod Res*, 43 (7), 1411–1426.
- Fattahi, P., Roshani, A., Roshani, A., 2011. A mathematical model and ant colony algorithm for multi-manned assembly line balancing problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53, 363–378.
- Fattahi, P., Salehi, M., 2009. Sequencing the mixed-model assembly line to minimize the total utility and idle costs with variable launching interval. *Int J Adv Manuf Technol*, 45, 987–998.
- Gao, J., Sun, L., Wang, L., Gen, M., 2009. An efficient approach for type II robotic assembly line balancing problems. *Computers and Industrial Eng*, 56, 1065–1080.
- Gen, M., Tsujimura, Y., Li, Y., 1996. Fuzzy assembly line balancing using genetic algorithms. *Comput Ind Eng*, 31 (3/4), 631–634.
- Ghosh, S., Gagnon, R.J., 1989. A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems. *International Journal of Production Research*, 27, 637–670.
- Gokcen, H., Agpak, K., Gencer, C., Kizilkaya, E., 2005. A shortest route formulation of simple U-type assembly line balancing problem. *Appl Math Model*, 29, 373–380.
- Goncalves, J.F., Almeida, J.R.D., 2002. A hybrid genetic algorithm for assembly line balancing. *J Heuristics*, 8, 629–642.
- Gökçen, H., Agpak, K., 2006. A goal programming approach to simple U-line balancing problem. *Eur J Oper Res*, 171, 577–585.
- Gökçen, H., Erel, E., 1998. Binary integer formulation for mixed model assembly line balancing problem. *Comput Ind Eng*, 34 (2), 451–461.
- Hamta, N., Ghomi, S.M.T.F., Jolai, F., Shirazi, M.A., 2013. A hybrid PSO algorithm for a multi-objective assembly line balancing problem with flexible operation times, sequence-dependent setup times and learning effect. *Int J Prod Econ*, 141, 99–111.
- Haq, A.N., Zayaprakash, J., Rengarajan, K., 2006. A hybrid genetic algorithm approach to mixed-model assembly line balancing. *International J Adv Manuf Technol*, 28, 337–341.
- Hazir, O., Dolgui, A., 2013. Assembly line balancing under uncertainty: robust

- optimization models and exact solution method. *Computer and Ind Eng*, 65, 261–267.
- Helgeson, W.B., Salvesson, M.E., Smith, W.W., 1954. How to balance an assembly line. Technical Report, Carr Press, New Caraan, Conn.
- Hoffmann, T.R., 1963. Assembly line balancing with a precedence matrix. *Management Science*, 9, 551–562.
- Hwang, R, Katayama, H., 2009. A multi-decision genetic approach for workload balancing of mixed-model U-shaped assembly line systems. *International Journal of Production Research*, 47(4), 3797-3822.
- Jackson, J.R. (1956). A computing procedure for a line balancing problem. *Management Science*, 2, 261–272.
- Jaeschke, G. (1964). Eine allgemeine Methode Zur Losung Kombinatoriischer Probleme. *Ablauf-Plan Forsch*, 5,133–153.
- Johnson, R.V., 1991. Balancing assembly lines for teams and work groups. *International Journal of Production Research*, 29(6), 1205-1214.
- Kao, H.H., 2010. An optimal algorithm for type-I assembly line balancing problem with resource constraint. *Afr J Bus Manag*, 4 (10), 2051–2058.
- Kazemi, A., Sedighi, A., 2013. A cost-oriented model for balancing mixed-model assembly lines with multi-manned workstations. *International Journal of Services and Operations Management*, 16(3), 289-309.
- Kellegöz, T., Toklu, B., 2012. An efficient branch and bound algorithm for assembly line balancing problems with parallel multi-manned workstations. *Computers & Operations Research*, 39, 3344–3360.
- Kellegöz, T., Toklu, B., 2015. A priority rule-based constructive heuristic and an improvement method for balancing assembly lines with parallel multi-manned workstations. *International Journal of Production Research*, 53(3), 736-756.
- Kellegöz, T., 2011. Paralel Çok İşçili Montaj Hattı Dengeleme Problemleri İçin Yeni Çözüm Yaklaşımları. Doktora Tezi, Fen Bilimler Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Kellegöz, T., 2016. Assembly line balancing problems with multi-manned stations: a new mathematical formulation and Gantt based heuristic method. *Annals of Operations Research*, DOI: 10.1007/s10479-016-2156-x
- Kilinci, O., Bayhan, G.M., 2006. A Petri net approach for simple assembly line balancing problems. *Int J Adv Manuf Technol*, 30, 1165–1173.
- Kim, Y.K., Kim, J.Y., Kim, Y., 2006. An endosymbiotic evolutionary algorithm for the integration of balancing and sequencing in mixedmodel U-lines. *Eur J Oper Res*, 168, 838–852.
- Kim, Y.K., Kim, Y., Kim, Y., 1996. Genetic algorithms for assembly line balancing with various objectives. *Comput Ind Eng*, 30 (3), 397– 409.
- Kim, Y.K., Kim, Y., Kim, Y.J., 2000. Two-sided assembly line balancing: a genetic algorithm approach. *Production Planning and Control*, 11, 44–53.
- Kim, Y.K., Song, W.S., Kim, J.H., 2009. A mathematical model and a genetic algorithm for two-sided assembly line balancing. *Computers and Operations Researches*, 36, 853–865.
- Kucukkoc, I., Zhang, D.Z., (2015). A mathematical model and genetic algorithm-based approach for parallel two-sided assembly line balancing problem. *Production Planning and Control*, 26 (11), 874-894.

- Lai, L.K.C., Liu J.N.K. 2009. ALBO: an assembly line balance optimization model using ant colony optimization. Fifth International Conference on Natural Computation Tianjian, China.
- Lapierre, S.D., Ruiz, A., 2004. Balancing assembly lines: an industrial case study. *The Journal of the Operational Research Society*, 55, 589–597.
- Lapierre, S.D., Ruiz, A., Soriano, P., 2006. Balancing assembly lines with tabu search. *European Journal of Operational Research*, 168, 826–837.
- Levintin, G., Rubinovitz, J., Shnits, B., 2006. A genetic algorithm for robotic assembly line balancing. *Eur J Oper Res*, 168, 811–825.
- Lopez, C.E., 2014. Unbalanced Workload Allocation in Large Assembly Lines. Yüksek Lisans Tezi, Department of Industrial and Systems Engineering Kate Gleason College of Engineering, Rochester Institute of Technology, Amerika Birleşik Devletleri, New York.
- Mamun, A.A., Khaled, A.A., Ali, S.M., Chowdhury, M.M., 2012. A heuristic approach for balancing mixed-model assembly line of type I using genetic algorithm. *Int J Prod Res*, 50, 5106–5116.
- Mansoor, E.M. (1964). Assembly line balancing-An Improvement on the Ranked Positional Weight Technique. *Journal of Industrial Engineering*, 15, 73–77.
- McMullen, P.R., 1998. JIT sequencing for mixed-model assembly lines with setups using Tabu Search. *Production Planning and Control: The Management of Operations*, 9 (5), 504–510.
- McMullen, P.R., Frazier, G.V., 1998. Using simulated annealing to solve a multi-objective assembly line balancing problem with parallel workstations. *Int J Prod Res*, 36 (10), 2717–2741.
- McMullen, P.R., Tarasewich, P., 2003. Using ant techniques to solve the assembly line balancing problem. *IIE Trans*, 35, 605–617.
- McMullen, P.R., Tarasewich, P., 2006. Multi-objective assembly line balancing via a modified ant colony technique. *International Journal of Production Research*, 44 (1), 27–42.
- Merten, P. (1967). Assembly line balancing by partial enumeration. *Ablauf- und planungsforschung*, 8, 429–433.
- Narayanan, S., Panneerselvam, R., 2000. New efficient set of heuristics for assembly line balancing. *Int J Manag Syst*, 16 (3), 287–300.
- Nearchou, A.C., 2008. Multi-objective balancing of assembly lines by population heuristics. *International Journal of Production Economics*, 46(8), 2275–2297.
- Nearchou, A.C., 2011. Maximizing production rate and workload smoothing in assembly lines using particle swarm optimization. *International Journal of Production Economics*, 129(2), 242–250.
- Nourmohammadi, A., Zandieh, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., 2013. An imperialist competitive algorithm for multi-objective U-type assembly line design. *J Comput Sci*, 4, 393–400.
- Ozbakir, L., Baykasoglu, A., Gorkemli, B., Gorkemli, L. 2011. Multiple-colony ant algorithm for parallel line balancing problem. *Appl Soft Comput*, Volume 11 (3), 3186–3198.
- Ozcan, U., 2010. Balancing stochastic two-sided assembly lines: a chance-constrained piecewise-linear, mixed integer program and a simulated annealing algorithm. *Eur J Oper Res*, 205:81–97.

- Ozcan, U., Cercioglu, H., Gokcen, H., Toklu, B. 2009. A tabu search algorithm for the parallel assembly line balancing problem. *G.U. J Sci* 22 (4), 313–323.
- Ozcan, U., Cercioglu, H., Gokcen, H., Toklu, B. 2010. Balancing and sequencing of parallel mixed-model assembly lines. *International Journ Prod Res*, 48 (17), 5089–5113.
- Ozcan, U., Gokcen, H., Toklu, B., 2010. Balancing parallel two-sided assembly lines. *Int J Prod Res*, 48 (16), 4767–4784.
- Ozcan, U., Kellegoz, T., Toklu, B., 2011. A genetic algorithm for the stochastic mixed-model U-line balancing and sequencing problem. *Int J Prod Res*, 49 (6), 1605–1626.
- Ozcan, U., Toklu, B., 2009. A new hybrid improvement heuristic approach to simple straight and U-type assembly line balancing problems. *J Intell Manuf*, 20, 123–136.
- Ozcan, U., Toklu, B., 2009. Multiple-criteria decision-making in twosided assembly line balancing: a goal programming and a fuzzy goal programming models. *Comput Oper Res* 36, 1955–1965.
- Özcan, U., Toklu, B., 2009. Balancing of mixed-model two-sided assembly lines. *Computers and Industrial Engineering*, 57, 217-227.
- Ponnambalam, S.G., Aravindan, P., Naidu, G.M., 2000. A multiobjective genetic algorithm for solving assembly line balancing problem. *Int J Adv Manuf Technol*, 16, 341–352.
- Purnomoa, H.D., Wee H., Raua, H., 2013. Two-sided assembly lines balancing with assignment restrictions. *Mathematical and Computer Modelling*, 57, 189–199.
- Quyên, N.T.P., Chen, J.C., Yang, C.L., 2016. Hybrid genetic algorithm to solve resource constrained assembly line balancing problem in footwear manufacturing. *Soft Computing*, DOI 10.1007/s00500-016-2181-3.
- Rachamadugu, R. and Talbot, B., 1991. Improving the equality of workload assignments in assembly lines. *International Journal of Production Research*, 29(3), 619- 633.
- Rashid MFF, Hutabarat W, Tiwari A., 2011. A review on assembly sequence planning and assembly line balancing optimization using soft computing approaches. *International Journal of Advance Manufacturing Technologies*, 59, 335– 349.
- Rekiek, B., Dolgui, A., Delchambre, A., Bratcu, A., 2002. State of art of optimization methods for assembly line design. *Annual Reviews in Control*, 26, 163-174.
- Roshani, A. and Giglio, D., 2015a. A simulated annealing approach for multi-manned assembly line balancing problem type II. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 2299–2304.
- Roshani, A. and Giglio, D., 2015b. A mathematical programming formulation for cost-oriented multi-manned assembly line balancing problem. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 2293–2298.
- Roshani, A. and Giglio, D., 2016. Simulated annealing algorithms for the multi-manned assembly line balancing problem: minimising cycle time. *International Journal of Production Research*, DOI: 10.1080/00207543.2016.1181286.
- Roshani, A., Roshani, A., Roshani, A., Salehi, M., Esfandyari, A., 2013. A simulated annealing algorithm for multi-manned assembly line balancing problem. *Journal of Manufacturing Systems*, 32, 238–247.
- Roshani, A., Fattahi, P., Roshani, A., Salehi, M., Roshani, A., 2012. Cost oriented two-

- sided assembly line balancing problem: a simulated annealing approach. *Int J Comput Integr Manuf*, 25, 680–715.
- Rubinnovitz, J., Levitin, G., 1995. Genetic algorithm for assembly line balancing. *Int J Prod Econ*, 41 (1), 343–354.
- Sabuncuoglu, I., Erel, R., Tanyer, M., 2000. Assembly line balancing using genetic algorithm. *J Intell Manuf*, 11, 295–310.
- Salveson, M.E., 1955. The assembly line balancing problem. *The Journal of Industrial Engineering*, 6(3), 18-25.
- Sawyer JFH (1970) Line balancing. Machinery and Allied Products Institute, Washington, DC.
- Scholl, A. and Becker, B., 2006. State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168, 666-693.
- Scholl, A., 1999. Balancing and sequencing assembly lines. 2. Baskı., Springer Verlag Co., Newyork, 1-288.
- Scholl, A., Fliedner, M., Boysen, N., 2010. Absalom: Balancing Assembly Lines with Assignment Restrictions. *European Journal of Operational Research*, 200 (3): 688–701.
- Scholl, A., Klein, R., 1997. SALOME: a bidirectional branch and bound procedure for assembly line balancing. *INFORMS Journal on Computing*, 9, 319-334.
- Scholl, A., Voß, S., 1996. Simple assembly line balancing-Heuristic approaches. *Journal of Heuristics*, 2, 217- 244.
- Seyed-Alagheband, S.A., Ghomi, S.M.T.F., Zandieh, M., 2011. A simulated annealing algorithm for balancing the assembly line type II problem with sequence-dependent setup times between tasks. *Int J Prod Res*, 49 (3), 805–825.
- Shtub, A., Dar-El, E.M., 1989. A methodology for the selection of assembly systems. *International Journal of Production Research*, 27, 175-186.
- Simaria, A.S., Vilarinho, P.M. 2009. 2-ANTBAL: an ant colony optimization for balancing two-sided assembly lines. *Comput Ind Eng*, 56 (2), 489–506.
- Simaria, A.S., Vilarinho, P.M., 2004. A genetic algorithm based approach to the mixed-model assembly line balancing problem of type II. *Comput Ind Eng*, 47 (4), 391–407.
- Sivasankaran, P., Shahabudeen, P., 2013. Modelling hybrid single model assembly line balancing problem. *Udyog Pragati*, 37, 26–36.
- Sivasankaran, P. and Shahabudeen, P. 2014. Literature review of assembly line balancing problems. *International Journal of Advance Manufacturing Technologies*, 73, 1665–1694.
- Sivasankaran, P., Shahabudeen, P., 2013. Genetic algorithm for concurrent balancing of mixed-model assembly lines with original task times of models. *Intell Inf Manag*, 5, 84–92.
- Su, P., Lu, Y., 2007. Combining genetic algorithm and simulation for the mixed-model assembly line balancing problem. *ICNC*, 4, 314–318. Third International Conference on Natural Computation (ICNC 2007).
- Tapkan, P., Ozbakir, L., Baykasoglu, A., 2012. Modeling and solving constrained two-sided assembly line balancing problem via bee algorithms. *Appl Soft Comput*, 12, 3343–3355.
- Thangavelu, S.R., Shetty, C.M., 1971. Assembly line balancing by zero-one integer



- programming. *IIE Trans*, 3 (1), 61–68.
- Triki, H., Mellouli, A., Hachicha, W., Masmoudi, F., 2016. A hybrid genetic algorithm approach for solving an extension of assembly line balancing problem. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 29 (5), 504-519.
- Tsujimura, Y., Gen, M., Kubota, E. 1995. Solving fuzzy assembly-line balancing problem with genetic algorithm. *Comput Ind Eng*, 29 (1– 4), 543–547.
- Uddin, M.K., Lastra, J.L.M., 2011. *Assembly Line Balancing and Sequencing. Assembly Line - Theory and Practice*, Publisher: InTech.
- Wang, H.S., Che, Z.H., Chiang, C.J., 2012. A hybrid genetic algorithm for multi-objective product plan selection problem with ASP and ALB. *Expert Syst Appl*, 39, 5440–5450.
- Widyadana, G.A., 2009. Multi-objective model for balancing U-type assembly line with permanent and temporary workers. *Jurnal Teknik Industri*, 11 (1), 33–42.
- Wu, E.F., Jin, Y., Bao, J.S., Hu, X.F., 2008. A branch-and-bound algorithm for twosided assembly line balancing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39: 1009-1015.
- Xiongwen, Q., Qifu, Fan., 2011. Solving Multi-manned Assembly Line Balancing Problem by a Heuristic-mixed Genetic Algorithm. *4th International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*, 3, 320-323.
- Xu, W., Xiao, T., 2008. Mixed model assembly line balancing problem with fuzzy operation times and drifting operations. *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference (IEEE)* 1752–1760.
- Yağmahan, B., Emel, E., 2015. Mixed-model assembly line balancing with smoothing approach based on tabu search algorithm. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30(1), 57-69.
- Yu, J., Yin, Y., 2010. Assembly line balancing based on an adaptive genetic algorithm. *Int J Adv Manuf Technol*, 48, 347–354.
- Yuan, B., C. Zhang, Shao. X., 2015. A Late Acceptance Hill-climbing Algorithm for Balancing Two-sided Assembly Lines with Multiple Constraints. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 26(1), 159-168.
- Zacharia, P.T., Nearchou, A.C., 2012. Multi-objective fuzzy assembly line balancing using genetic algorithm. *J Intell Manuf*, 23 (3), 615-627.
- Zacharia, P.T., Nearchou, A.C., 2013. A meta-heuristic algorithm for the fuzzy assembly line balancing type-E problem. *Comput Oper Res*, 40, 3033–3044.
- Zhang, Z., Cheng, W., Cheng, Y., Liang, J. 2008. A novel ant colony optimization algorithm for U-shaped line balancing problem. *ICNC*, 7, 455–459, Fourth International Conference on Natural Computation.

## ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında Erzurum'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Erzurum'da tamamladı. 2009 yılında Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimini tamamladı. 2009 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2010 yılında Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümüne Araştırma Görevlisi olarak atandı ve 2010-2016 yılları arasında, Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümünde çalıştı. Halen Bayburt Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümünde görevine devam etmektedir.