

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
MÜHENDİSLİK VE TEKNOLOĞİ YÖNETİMİ  
TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**PARALEL MONTAJ HATTI DENGELEME VE ÜRÜN ATAMA  
PROBLEMİ İÇİN YENİ MATEMATİKSEL MODELLER**

**HAZIRLAYAN**

**BURAK ATEŞ ŞEKER**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ANKARA - 2021**



**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
MÜHENDİSLİK VE TEKNOLOĞİ YÖNETİMİ  
TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**PARALEL MONTAJ HATTI DENGELEME VE ÜRÜN ATAMA  
PROBLEMİ İÇİN YENİ MATEMATİKSEL MODELLER**

**HAZIRLAYAN**

**BURAK ATEŞ ŞEKER**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TEZ DANIŐMANI**

**DR. ÖĞR. ÜYESİ TUSAN DERYA**

**ANKARA – 2021**

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Burak Ateş ŞEKER tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 11/ 01 / 2021

**Tez Adı:** Paralel Montaj Hattı Dengeleme ve Ürün Atama Problemi İçin Yeni Matematiksel Modeller

**Tez Jüri Üyeleri ( Unvanı, Adı - Soyadı, Kurumu )**

**İmza**

Prof. Dr. Yusuf Tansel İÇ, Başkent Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Tusan DERYA, Başkent Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ayyüce Aydemir KARADAĞ, Çankaya Üniversitesi

**ONAY**

Prof. Dr. Ömer Faruk ELALDI  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih : ... / ... / .....

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**  
**YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU**

Tarih: 11 / 01 / 2021

Öğrencinin Adı, Soyadı : Burak Ateş ŞEKER

Öğrencinin Numarası : 21820063

Anabilim Dalı : Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Programı : Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı : Dr. Öğr. Üyesi Tusan DERYA

Tez Başlığı : Paralel Montaj Hattı Dengeleme ve Ürün Atama Problemi İçin Yeni Matematiksel Modeller

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 38 sayfalık kısmına ilişkin, 22 / 01 / 2021 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %4'tür. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:

**ONAY**

Tarih: ... / ... / 20...

Dr. Öğr. Üyesi Tusan DERYA

## TEŐEKKÜR

Öncelikle bu çalıőmayı gerçekleőtirme ve sunma fırsatı verdiği için çok güzel ülkemize, sonrasında bu çalıőmayı yapmamda bütün bilgilerini bana aktaran ve yardımını hiç esirgemeyen Danıőman Hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Tusan DERYA'ya, her zaman yanımda olduğunu hissettiğim canım annem ve aileme, ayrıca çalıőmalarımda her daim beni destekleyen Griő Holding'e sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

## ÖZET

**Burak Ateş ŞEKER**

### **PARALEL MONTAJ HATTI Dengeleme ve ÜRÜN ATAMA PROBLEMİ İÇİN YENİ MATEMATİKSEL MODELLER**

**Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Bölümü**

**2021**

Bir nihai ürün oluşturan parçaların belirli bir sıra düzeninde birleştirilme işlemine montaj denilmektedir. Nihai ürün üretmek için yarı mamulün robotik kol, konveyör veya başka bir hareketli taşıma sistemi vasıtasıyla taşınarak montajın gerçekleştirildiği sistematik yapıya montaj hattı denilmektedir. Benzer veya farklı tipte ürün talebinin olduğu işletmelerde paralel olarak konumlandırılan düz montaj hatları kullanılabilir. Paralel olarak konumlandırılan birden fazla düz montaj hatlarının eş zamanlı dengelenmesine, Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemi (PMHDP) denilmektedir. PMHDP’nde her hatta üretilecek olan ürün belirlidir. Oysaki hatlarda üretilecek olan ürünler farklı şekilde belirlenirse, operatör sayısında azalmalar sağlanabilir veya çevrim süresi azaltılabilir. Bu tez kapsamında, montajı yapılacak olan ürünlerin hatlara atandığı PMHDP’nin bir uzantısı ele alınmıştır. Paralel Montaj Hattı Dengeleme ve Ürün Atama Problemi (PMHD-ÜAP) olarak isimlendirilen bu problemin amacı çevrim süresini enküçükmektir. PMHD-ÜAP’nin çözümü için istasyon odaklı ve operatör odaklı matematiksel modeller geliştirilmiştir. Geliştirilen istasyon odaklı ve operatör odaklı matematiksel modeller kaynaklarda iyi bilinen kıyaslama problemleri üzerinde performansları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, operatör odaklı matematiksel model daha etkin sonuçlar vermektedir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Paralel Montaj Hattı Dengeleme, Ürün Atama, Matematiksel Model

# **ABSTRACT**

**Burak Ateş ŞEKER**

## **NEW MATHEMATICAL MODELS FOR PARALLEL ASSEMBLY LINE BALANCING AND ASSIGNMENT OF PRODUCTS PROBLEMS**

**Başkent University, Institute Of Science And Engineering**

**Department Of Industrial Engineering**

**Engineering And Technology Management**

**2021**

Assembly is that parts which constitute end product are combined how they are neatly. Assembly line is what products are assembled by way of robotic system, conveyor, etc. More conventional assembly lines what arranges collaterally to another are able to be used in industrial enterprises which more different productions or more same productions are ordered. Parallel Assembly Line Balancing Problem (PALBP) is assembly lines which are collaterally balance simultaneously. Product which is produced is determined at every assembly lines. Number of operator is able to decrease or cycle time is able to decrease whereas products which are produced at the assembly lines are determined different type. In this study, PALBP's extent that products which are assembled at assembly lines are assigned is explained. Purpose of parallel assembly lines balancing and assignment of product problem (PALB-APP) is minimized cycle time. Station oriented mathematical model and operator oriented mathematical model are improved for solution of PALB-APP. Station oriented mathematical model and operator oriented mathematical model are compared on comparison problems that are known well in the sources. According to acquired solutions, operator oriented mathematical model is more efficient than station oriented mathematical model.

**KEYWORDS:** Parallel Assembly Line Balancing, Assignment Of Product, Mathematical Model



## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
ÇİZELGELER LİSTESİ .....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	v
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vi
1. GİRİŞ.....	7
2. MONTAJ HATTI.....	9
2.1. Üretim Sistemleri.....	9
2.1.1. Sürekli üretim .....	9
2.1.2. Kesikli üretim.....	10
2.1.3. Karma üretim.....	10
2.1.4. Proje tipi üretim.....	11
2.2. Montaj Hattı ve Temel Tanımlar.....	11
2.3. Montaj Hattı Dengeleme.....	13
2.3.1. Montaj hattı dengelemenin amaçları .....	14
2.3.2. Montaj hattı dengelemenin kısıtları .....	15
2.4. Montaj Hattı Çeşitleri.....	16
2.4.1. Geleneksel (düz) montaj hatları .....	16
2.4.2. U-tipi montaj hatları.....	18
2.4.3. Paralel montaj hatları .....	19
3. PARALEL MONTAJ HATTI DENGELEME VE ÜRÜN ATAMA PROBLEMİ. 22	
3.1. Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemi.....	22
3.2. Paralel Montaj Hattı Dengeleme için Literatür Araştırması.....	24
3.3. Ürün Atama Problemi .....	27
4. PMHD-ÜAP İÇİN MATEMATİKSEL MODELLER.....	31
4.1. PMHD-ÜAP İçin Operatör Odaklı Matematiksel Modeller .....	31
4.2. PMHD-ÜAP İçin İstasyon Odaklı Matematiksel Modeller.....	33
5.1. 2 Ürünlü Deneysel Çalışmalar Ve Sonuçları .....	37
5.2. 3 Ürünlü Deneysel Çalışmalar Ve Sonuçları .....	43
6. SONUÇ .....	46
7. KAYNAKLAR.....	

## ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 1. Çalışmada Kullanılan Problemler ve Görev Sayıları .....	37
Çizelge 2. 2 Hatlı PMHD-ÜAP İçin Çözümlerin Karşılaştırılması.....	38
Çizelge 3. 2 Hatlı PMHD-ÜAP İçin Problem Setlerinin Çözümleri.....	40
Çizelge 4. 3 Hatlı PMHD-ÜAP İçin Çözümlerin Karşılaştırılması.....	43
Çizelge 5. 3 Hatlı PMHD –ÜAP İçin Problem Setlerinin Çözümleri .....	45

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Öncelik Diyagramı .....	12
Şekil 2. Montaj Hattı Şeması.....	13
Şekil 3. Geleneksel (Düz) Montaj Hattı .....	17
Şekil 4. U-Tipi Montaj Hattı .....	18
Şekil 5. 2 Hatlı Paralel Montaj Hattı .....	20
Şekil 6. Örnek PMHDP Çalışması .....	23
Şekil 7. Örnek Ürünlerin Öncelik İlişkileri .....	28
Şekil 8. Ürünlerin Doğru Hatlara Atandığı Paralel Montaj Hatları.....	29
Şekil 9. Ürünlerin Doğru Hatlara Atanmadığı Paralel Montaj Hatları.....	30

## SİMGELER VE KISALTMALAR

PMHDP	Paralel montaj hattı dengeleme problemleri
PMHD-ÜAP	Paralel montaj hattı dengeleme ve ürün atama problemleri
PALBP	Parallel assembly line balancing problem
PALB-APP	Parallel assembly line balancing and assignment of product problem
ist.	İstasyon
op.	Operatör
max	maksimum
Enk.TZ.	En küçük çevrim süresi
$h$	hat numarası, $h=1, \dots, \bar{H}$ , $\bar{H}$ : en fazla hat sayısı
$p$	ürün numarası, $p=1, \dots, \bar{P}$ , $\bar{P}$ : ürün sayısı
$i, r, s$	görev numarası, $i=1, \dots, n_p$
$k$	istasyon numarası, $k=1, \dots, \bar{K}$ ; $\bar{K}$ : en fazla istasyon sayısı
$n_p$	$p$ ürününe ait görev sayısı
$n_{\max}$	ürünlere ait olan görev sayılarının en büyüğü
$(r,s) \in P_{hs}$	Bir öncelik ilişkisi; $h$ hattındaki $r$ görevi $s$ görevinden önce
$t_{pi}$	$p$ ürününe ait $i$ görevinin tamamlanma zamanı
$C$	Çevrim zamanı
$X_{hpik}$	1, eğer $h$ hattında montajı yapılacak olan $p$ ürününe ait $i$ görevi $k$ operatörüne atanmış ise; 0, aksi halde (operatör odaklı matematiksel model için)
$u_{hk}$	1, eğer $h$ hattındaki $k$ istasyonu kullanılmış ise; 0, aksi halde
$y_{hp}$	1, eğer $h$ hattında $p$ ürününün montajı yapılacak ise; 0, aksi halde
$Z_{h(h+1)k}$	1, eğer $h$ ve $h+1$ hatlarının komşu olan $k$ istasyonları arasında ortak işyeri kurulmuş ise; 0, aksi halde
$X_{hpik}$	1, eğer $h$ hattında montajı yapılacak olan $p$ ürününe ait $i$ görevi $k$ istasyonuna atanmış ise; 0, aksi halde (istasyon odaklı matematiksel model için)
$s$	saniye

# 1. GİRİŞ

Her geçen gün gelişen dünyamızda ihtiyaçların ve tüketimin artmasıyla daha fazla üretime ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple sanayi işletmelerinde yüksek talepler oluşmaktadır. Oluşan yeni talep miktarlarına cevap verebilmede işletmelerdeki mevcut sistemler yetersiz kalabilmektedir.

Üretim gerçekleştiren işletmelerde birbirinden farklı üretim sistemleri bulunmaktadır. Bunlardan biri; üretime sınıf atlatan kesikli bir seri üretim sistemi olan montaj hatlarıdır. Parçaların belirli bir düzende birleştirilip sonucunda bitmiş ürün elde edilen işleme montaj denir. Montaj hattı ise bitmiş ürün üretmek için yarı mamulün robotik kol, konveyör veya başka bir hareketli taşıma sistemi vasıtasıyla taşınarak montajın gerçekleştirildiği sistematik yapıdır. Artan talep miktarlarıyla işletmelerde bulunan montaj hatları yetersiz kalabilir ve işletmeler daha verimli çalışan montaj hatlarına ihtiyaç duyabilir. Her geçen gün yenilenen teknoloji, montaj hatlarındaki kaynakların daha etkin kullanılmasına olanak sağlamıştır. Aynı zamanda kaynakları verimli kullanmak için belirli performans ölçütlerini eniyilemeyi amaçlayan birçok montaj hattı dengeleme çalışması yapılmıştır.

Sanayi işletmelerinde kullanılan düz montaj hatlarının birbirlerine paralel olarak konumlandırılmasıyla paralel montaj hatları oluşmaktadır. Paralel olarak konumlandırılan montaj hatlarının eş zamanlı dengelenmesine Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemi (PMHDP) denir. Paralel montaj hatlarında eş zamanlı dengeleme çevrim süresini enküçükleyebilir, istasyon sayısını enküçükleyebilir veya operatör sayısını azaltabilir.

Paralel montaj hatlarında her hatta üretilecek olan ürünler bellidir. Ürünlerin farklı hatlarda üretilmesi ile çevrim süresi, istasyon sayıları veya operatör sayıları etkilenebilir. Montaj hatları eş zamanlı olarak dengelenirken ürünlerin atanacağı hatlar büyük önem arz eder. Bir başka açıdan yaklaşımla, paralel hatların eş zamanlı dengelenmesi çalışmaları ve ürün atama problemleri birlikte ele alınmalıdır.

Paralel Montaj Hattı Dengeleme ve Ürün Atama Problemi (PMHD-ÜAP) birbirine yürüme mesafesinde konumlandırılmış düz montaj hatlarının eş zamanlı olarak dengelendiği ve bu hatların her birinde montajı yapılacak olan ürünün belirlendiği problemdir. PMHD-ÜAP'nin amaçları çevrim süresini veya istasyon sayısını enküçüklemek olabilir. Çevrim süresinin enküçüklenmesi sanayi işletmelerinde üretim miktarını arttırır.

Bu tez çalışmasındaki amaç, paralel hatlarda üretilen ürünlerin doğru hatlara atanmasını sağlayarak eş zamanlı hat dengeleme çalışması yapmaktır. Ürünlerin hatlara

doğru Şekilde atanabilmesi için çevrim suresini enküçükleyecek Şekilde istasyon odaklı ve operatör odaklı matematiksel modeller önerilmiştir.

Bu tez çalışması altı bölümden meydana gelmektedir.

Birinci bölümde tez konusu problem genel hatlarıyla tanıtılıp, hat dengeleme temel kavramları verilmiştir.

ÇalıŐmanın ikinci bölümünde üretim sistemleri tanımlanmış ve montaj hattını ilgilendiren kavramların açıklamaları yapılmıştır. ÇalıŐmanın gerçekleştiği paralel montaj hattı hakkında detaya girilmiŐ ve montaj hattı dengelemenin tanımı, amaçları ve kısıtlarıyla verilmiştir.

nc bölümde, PMHDP için genel bilgiler verilmiştir. PMHDP için literatür araştırması yapılmıştır ve literatürden konu hakkında bilgiler verilmiştir. Yeni problemin tanımı yapılmış ve PMHDP'den farkları gösterilmiştir.

Dördüncü bölümde, PMHD-AP problemleri için iki farklı tipte matematiksel model önerilmiştir. Bu matematiksel modellerde amaç fonksiyonlarının en kk çevrim suresi olması gerektiği belirtilmiştir ve matematiksel modellerin tiplerine göre kısıtlar oluşturulmuştur.

Beşinci bölümde, matematiksel modellerde uygulanacak problem setleri oluşturulmuştur. Problem setleri montaj hatlarının sayısına göre belirlenmiştir. Matematiksel modeller hazırlanan problem setleri üzerinde iki ve üç paralel montaj hatlı sistemler için uygulanmıŐtır. Paralel montaj hatları için problemlerin zmleri elde edilmiştir ve tablo üzerinde açık karşılaştırmaları yapılmıştır.

Altıncı bölümde, çalışma baştan sona anlatılmıŐ ve kısa bir zet yapılmıştır. Konu ile ilgili genel bir değerlendirme yapılmıştır. ÇalıŐmanın amacına deđinilmiŐ ve doğru ürün atama konusunun önemi belirtilmiştir. Matematiksel modellerin sađlamıŐ olduğu zmler dođrulanmıŐtır. Uygulanan matematiksel modellerin sonuçları hakkında tartıŐılmıŐtır ve PMHD-AP için daha etkin çalışan matematiksel model açıklanmıŐtır.

## **2. MONTAJ HATTI**

### **2.1.Üretim Sistemleri**

Üretim birtakım kaynaklar kullanarak belli bir sistem içerisinde son ürün elde edilme biçimidir. Sadece bir malın dışında bir hizmetin de üretimi gerçekleştirilebilir. Üretim için, bir endüstriyel fabrikada meydana gelen otomobiller, herhangi bir tarım ürünü veya lokantalarda hazırlanan yemekler örnekleri verilebilir.

Üretim sistemleri ise kaynakların kullanılarak son ürün elde edildiği üretim sürecini kapsayan sistemlerdir. Kullanılan üretim sistemlerinde kaynaklar her daim en verimli şekilde değerlendirilmelidir. Bu iki tanıma istinaden, üretimin gerçekleştirilmesi için sanayi tesislerinde hammadde ve işgücü bulunmalıdır. Bu iki etkenin birleşmesiyle beraber nihai ürün meydana gelecektir.

Üretim sistemleri genel olarak dört ana hususta incelenir.

- Sürekli üretim
- Kesikli üretim
- Karma üretim
- Proje tipi üretim

#### **2.1.1. Sürekli üretim**

Bir sanayi tesisinde, talebin çok olduğu bir üründe arzın da seri olması gerekmektedir. Buna istinaden, sürekli tip üretim çeşidi talebin çok olduğu durumlarda tesisteki teçhizatların bu talep için kullanılması durumudur. Bundan dolayı tesis içerisinde bulunan üretim hatları -montaj hatları da dahil- sadece bu tip ürünlerin üretilmesi için atanır. Bir nevi seri üretim olarak da isimlendirilebilir. Burada bir başka etken de müşteri taleplerinin sanayi tesisine sürekli olmasıdır. Eğer talep yüksek olursa ama tekrar edilmeyecekse bu durum sürekli üretim değildir. Ayrıca tesis içerisinde üretimin gerçekleştiği hatlarda düzenli işlem sırası vardır. Ürün üretildikten sonra stokta ürün olmayacaktır çünkü ürün üretilir üretilmez talebin karşılanması için talebi isteyen kurumlara gönderilecektir. Öte yandan hammadde stoğu ise fazla bulunmalıdır çünkü talep düzenli ve çok sayıda geldiği için bu talebin karşılanması gerekmektedir ve dolayısıyla bu talebin karşılanması için üretilecek ürünün gerekli hammaddelerinin sanayi tesisi stoğunda her daim bulunması gerekmektedir. Bu bilgiler dışında, sürekli aynı tip üretim yapılmasına istinaden işgücünde kalifiye ihtiyacı bulunmamaktadır. Eğer tesisteki hatlar tek bir ürün üretimi için tasarlanmışsa bu hatlar başka

bir ürün üretilmesine müsaade etmeyecektir. Dolayısıyla başka tip ürün üretilmesi istendiğinde hatlarda birtakım değişiklikler yapılmalıdır.

### **2.1.2. Kesikli üretim**

Bir sanayi tesisinde, farklı ürünlerin az sayıda üretilmesi durumudur. Sürekli üretimdeki gibi sürekli bir talep söz konusu değildir. Müşterilerin bu tip tesislerden farklı tipte ürün talepleri bulunmaktadır. Kesikli üretim yapan tesislere sürekli talep gelmemektedir. Bu tip tesislerde makineler farklı amaçlarla kullanılabilir. Hatlarda teçhizat konumu değiştirilebilir. Yani bir nevi üretimde esneklik mevcuttur. Bu tip üretimlerde işgücü kalifiye olmalıdır çünkü tesiste her seferinde farklı tipte ürün üretimi gerçekleştirilebilir. Ayrıca hammadde stoğu çok olmamalıdır.

Kesikli üretim iki başlık altında incelenebilir.

- Parti tipi üretim
- Siparişe göre üretim

#### **2.1.2.1. Parti tipi üretim**

Sürekli gelen bir talebin parti parti üretilme durumudur. Bu tip çalışma yapan sanayi tesislerinde ürünlerin tasarımı tamamlanmış ve standartlar belirlenmiştir. Örneğin, bin adet talep edilmiş bir ürünün yüzer yüzer üretilme şeklidir. Ürün tek partide tamamlanmamıştır. Dolayısıyla parti tipi kesikli üretim, sürekli üretim tipinden farklıdır.

#### **2.1.2.2. Siparişe göre üretim**

Talebin bütün parametrelerinin özel olarak istendiği, üretimin tamamen müşteri firma isteğine göre sağlandığı üretim şeklidir. Üretimde kullanılacak olan malzemenin müşteri tarafından belirlenmesi buna bir örnektir.

### **2.1.3. Karma üretim**

Hem sürekli üretim tipi hem de kesikli üretim tipini üretebilen üretim sistemidir. Talebe göre değişkenlik göstererek, talep eğer fazlaysa sürekli üretimin sağlanabildiği öte



yandan özel talebe göre üretimde yapılabilen üretim sistemidir. Dolayısıyla bu tip üretim yapabilen tesisler diğer tesislere göre daha donanımlıdır.

#### **2.1.4. Proje tipi üretim**

Proje tipi üretim sistemi, projeye bağlı olarak tek ürün üretilmesine olanak sağlayan üretim sistemidir. Bu tip üretim sisteminde talep çok değildir yani bir başka deyişle üretim adetleri azdır. Talepler ise müşteri tarafından özel parametreler verilerek istenmektedir. Tüm bunlara istinaden bu tip üretim sistemlerinde işgücü kesinlikle kalifiye olmalıdır. Günümüzde, özellikle savunma sanayi bu tip üretimler gerçekleştirmektedir.

### **2.2. Montaj Hattı ve Temel Tanımlar**

Montaj hattındaki temel tanımları aşağıdaki başlıklar altında özetleyebiliriz.

**Görev:** Üretim hattında yapılması gereken her birim işe yapılan tanımdır. Montaj hatlarında yapılacak olan bu görevler kesinlikle iş istasyonlarına atanmalı ve operatör tarafından gerçekleştirilmelidir. Görevler bitirilmeden montaj hattında üretim tamamlanmayacaktır. Görevlerin yapılması için gerekli olan tüm teçhizat operatöre sağlanmalıdır.

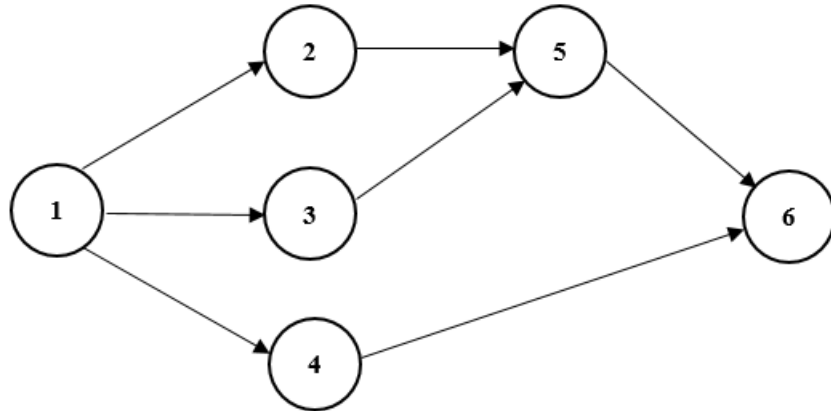
**Görev Süresi:** İş istasyonlarına atanan her bir işin tamamlanması gereken süredir. Mesela bir otomotiv sanayisinde bulunan bir montaj hattında otomobil aks parçasının montaj süresi üç saat olarak görülüyorsa, otomobil aks montaj görevinin süresi üç saat olarak belirlenmektedir.

**İş İstasyonu:** Montaj hatlarında verilen işlerin gerçekleştiği hat parçalarıdır. İş istasyonlarında birden fazla görev olabilir. Her istasyona görev atanmak zorunda değildir dolayısıyla her istasyona operatör de atanmak zorunda değildir fakat eğer istasyonda iş varsa o zaman o işi yapacak operatör istasyona atanmalıdır. Eğer iş istasyonunda görev bulunmazsa hattın tamamlanabilmesi için görevler diğer iş istasyonlarında tamamlanmalıdır.

**İstasyon Zamanı:** Bir iş istasyonu üzerinde yapılması gereken işlerin, o iş istasyonu üzerinde alacağı toplam süreye istasyon zamanı denir. İstasyon zamanı, o istasyona atanmış işlerin tamamlanacağı toplam süreden daha az olmamalıdır. Örnek vermek gerekirse, eğer istasyon üzerinde tamamlanması gereken üç görev varsa bu üç görevin tamamlanma süreleri toplanır ve bu üç görevin tamamlanacağı toplam süre istasyon zamanını verir.

**Çevrim Süresi:** Bir iş istasyonu içerisinde, atanan bütün görevlerin tamamlanma süresidir. Bir üretim hattında bütün görevler tanımlanan iş istasyonları üzerinde ve tanımlanan çevrim süresi içinde tamamlanmalıdır. Çevrim süresinden yola çıkılarak birçok bilgi elde edilebilir. Örneğin, bir sanayi işletmesinde çevrim süresinde bir ürün elde edildiği varsayılarak, vardiyada kaç adet ürün üretilbileceği hesaplanabilir.

**Öncelik Diyagramı:** Bir üretim hattında öncelik ilişkisi en önemli hususlardan biridir. Öncelik diyagramı hangi görevlerin hangi görevlerden önce olması gerektiğini belirten diyagramdır. Görevler arasında verimli bir üretim için düzenli bir sıra oluşturulur ve bu sıraya göre hatta hareket edilmelidir. Aşağıdaki şekil 1’de örnek bir öncelik ilişkileri diyagramı verilmiştir. Bu öncelik ilişkisi diyagramına göre 2,3 ve 4 numaralı görevlerin yapılabilmesi için 1 numaralı görevin bitirilmesi, 5 numaralı görevin yapılabilmesi için 2 ve 3 numaralı görevlerin bitirilmesi, 6 numaralı görevin yapılabilmesi için ise 4 ve 5 numaralı görevlerin bitirilmesi gerekmektedir. Hat ile ilgili bir çalışma olduğu zaman öncelik ilişkileri her daim göz önünde bulundurulmalıdır.

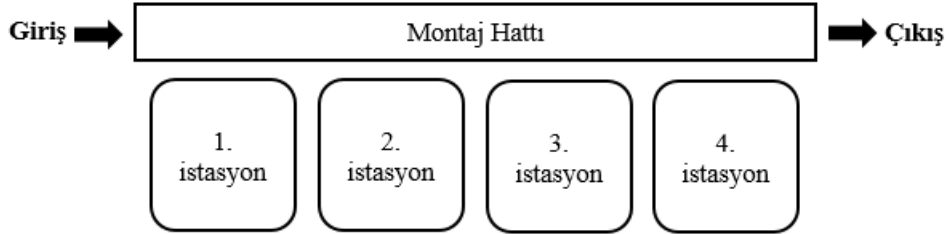


Şekil 1. Öncelik Diyagramı

**Montaj:** Montaj, alt montaj ürünlerinin, hammaddelerin veya işlenmiş mamullerin bir araya getirilerek nihai bir ürün elde edilmesi sürecidir [1]. Montaj yapılırken, öncelik ilişkisi göz önüne alınmalıdır. Öncelik ilişkisi dikkate alınmazsa üretimde birtakım sıkıntılar meydana gelebilecektir.

**Montaj Hattı:** Montaj hattı operasyonların icra edildiği, seri bir biçimde istasyonlara atandığı akış odaklı üretim sistemidir [2]. Montaj hatları tek taraflı ve çift taraflı olmak üzere belirtilirler. Hatta tek tarafın kullanılmasıyla tek taraflı, çift tarafın kullanılmasıyla çift taraflı montaj hatları olurlar. Montaj hatları birçok sanayi işletmesinde bulunmaktadır. Şekil 2’de örnek bir montaj hattı verilmiştir. Bu montaj hattında dört adet iş istasyonu bulunmaktadır.

Her bir iş istasyonuna bir operatör atanmıştır ve malzeme hareketli bir konveyör vasıtasıyla taşınmaktadır. Montaj hatlarında teknolojinin de gelişmesiyle beraber eski usül operatörlerin istasyonlar arasında malzeme taşıma işlemi yaptığı sistem geride kalmış olup artık hareketli bant sistemleri veya insansı robotlar yer almaktadır.



Şekil 2. Montaj Hattı Şeması

### 2.3. Montaj Hattı Dengeleme

Günümüz dünyasında montaj hatlarında öncelik ilişkisi dikkate alınarak, çevrim süresini en aza indirmek, operatör sayısını en aza indirmek, istasyon sayısını en aza indirmek, malzeme sayısını en aza indirmek ve maliyeti azaltmak çok önemli bir noktadadır. Bu bilgiler ışığında, çevrim süresi, operatör sayısı, malzeme sayısı, istasyon sayısı ve maliyetleri optimum düzeylerde tutarak montaj hatlarını en verimli şekilde çalıştırma işlemi montaj hattı dengeleme olarak adlandırılır. Montaj hattı dengeleme başka bir tanımla hatların çevrim süresi, istasyon sayısı, operatör sayısı ve maliyet gibi parametreleri göz önünde bulundurarak görevlerin hatlara en ideal biçimde tayin edilmesini sağlar.

Montaj hattı dengeleme kapsamında makine ve teçhizatın konumu da çok önemli bir yer alır. Montaj hattının dengelenmesi için makine ve teçhizatlar hattın yerleşim düzenine göre doğru konumlandırılmalıdır. Böylece doğru konumlandırılan makinelerde veya teçhizatlarda çalışan operatörler için montaj hattında olabildiğince az boş süre bırakılmış olacaktır ve verim artacaktır.

Kısaca montaj hattı dengeleme çevrim süresi, istasyon sayısı, maliyet ve operatör sayısı gibi performans ölçütlerini iyi yönde etkileyen bir çalışmadır.

Montaj hattı dengeleme çalışmaları yapılırken istasyonlara atanan görevler arasında öncelik ilişkilerine mutlaka dikkat edilmelidir. Ayrıca istasyonlara atanmış olan görevlerin süreleri yani bir nevi istasyon zamanları çevrim süresini kesinlikle aşmamalıdır. Başka bir deyişle eğer çevrim süresi 13 dakika ise istasyonlar üzerindeki görevlerin toplam süresi bir

başka deyişle istasyonlarda işlerin tamamlanma süresi 13 dakikayı geçmemelidir. Eğer geçerse bu montaj hattı dengelenmemiş demektir.

Montaj hattı dengeleme çalışmaları kapsamında yapı gereği (ağırlığı, boyu vs.) yerinden oynatılamayacak makineler hesaba katılmalıdır. Montaj hattında görevler kesinlikle bu makinelerin konumuna göre ayarlanmalıdır. Eğer bu tip makinelerin konumları hesaba katılmazsa montaj hattındaki üretimde öncelik ilişkisini de tehdit edebilecek büyük aksilikler meydana gelebilecektir. Tüm bunların yanında montaj hattının genişliği büyükse ve operatör hattın diğer ucuna ulaşamıyorsa burada da bir kısıt oluşmaktadır. Bu kısıta da konum kısıtı denilmektedir. Bu durum hattın durumu veya ürünün yapısına göre farklılık gösterebilir.

Montaj hatları günümüzde birçok endüstriyel fabrikada olup, otomotiv sanayi, havacılık sanayi, savunma sanayi, çelik sanayi vb. işletmelerde yer almaktadır. Bu tip sanayi işletmelerinde montaj hattı dengeleme çalışmaları üretim adetlerini arttırmak veya maliyeti azaltmak gibi amaçlarla sıklıkla yapılmaktadır. Bunların yanında montaj hattı dengeleme çalışmaları çalışan personeller arasındaki anlaşmazlığa, iş bölümü sistematik olarak dağıtılacağı için son verebilecektir.

Montaj hattı dengeleme çalışmasının sonucunda üretim adetleri arttırılabilecek ve makine arızaları gerçekleşmediği sürece sabit olarak üretim devam edebilecektir. Böylece verimli stok yönetimi için iyi bir zemin hazırlanabilecektir.

### **2.3.1. Montaj hattı dengelemenin amaçları**

Montaj hattı dengelemenin birden fazla amacı bulunmaktadır.

Montaj hattı dengelemenin ana amacı, gerekli maliyetlerde en fazla çıktı oranını alarak verimi arttırmaktır. Yani montaj hattı tasarımı endüstrinin önemli bir problemidir [3].

Montaj hattı dengeleme çalışması yapılmasının altında yatan en önemli sebep maliyeti en aza indirmektir. Maliyeti en aza indirmeye çalışmak aslında en aza indirilecek olan farklı parametreler hakkında da bilgi verecektir.

Kullanılan malzeme miktarını azaltmak montaj hattı dengelemenin amaçlarından biridir. Montaj hattı dengeleme çalışması yapılmış olan bir sistemde malzeme miktarı daha da azalacaktır ve sanayi kurumu israftan kurtulacaktır.

Montaj hattı dengeleme çalışmaları, sistemde kullanılan makinelerin, ekipmanların ve teçhizatların daha verimli çalışmasını sağlayacaktır. Gereksiz yere makine kullanımından kaçınılacak ve oluşacak olan enerji israfı da son bulacaktır.

Çevrim süresini en aza indirmek montaj hattı dengeleme çalışmalarının en önemli amaçlarından bir tanesidir. Çevrim süresi direkt olarak üretim sayısını etkiler. Ayrıca çevrim süresini en aza indirmek bu başlık altında açıklanan diğer parametreleri de doğrudan veya dolaylı yoldan etkiler.

Montaj hattı dengeleme çalışmalarının amaçlarından biri de operatör sayısını en aza indirmektir. Operatörler istasyonlara verimli bir şekilde dağıtılacak ve bununla beraber hat verimliliği de artacaktır. Buna bağlı olarak operatörler arasındaki anlaşmazlıklar son bulacaktır. Bir başka açıdan bakılırsa operatör sayısı daha verimli kullanılacağı için operatör sayısında tasarrufa gidilebilecektir bu da doğrudan olarak maliyeti etkileyecek ve maliyette de tasarruf elde edilecektir.

İstasyon sayısını en aza indirmek burada bulunan amaçlardan bir diğeridir. İstasyon sayıları azaldıkça doğrudan olarak çevrim süresi de azalacaktır. Ayrıca istasyon sayıları azaldığı için o istasyonlara atanan operatör sayısı da azalacaktır. Böylece operatör sayısında da tasarruf olacaktır.

Bu amaçlar yanyana getirilerek montaj hatlarının optimum verim sağlanacak şekilde çalışması sağlanmalıdır. Bu amaçların her biri gerçekleştiğinde gereksiz denge kayıpları oluşmayacaktır.

### **2.3.2. Montaj hattı dengelemenin kısıtları**

Montaj hattı dengeleme çalışmaları yapılırken dikkat edilmesi gereken kısıtlar bulunmaktadır. Mutlaka bu kısıtlar göz önünde bulundurularak hat dengeleme çalışmaları gerçekleştirilmelidir.

İstasyonlardaki işlerin tamamlanacağı süre çevrim süresini kesinlikle aşmamalıdır. Bu görevlerin süreleri kesinlikle çevrim süresine bağlı olarak göz önünde bulundurulmalıdır.

Montaj hattı dengeleme çalışmaları yapılırken görevler arasındaki öncelik ilişkileri dikkate alınmalıdır. Bütün görevler verilen öncelik ilişkisi dyagramı göz önüne alınarak gerçekleştirilmelidir.

Üretim sahası içerisinde birtakım büyük makine ekipmanları ve teçhizatları büyüklüklerinden ötürü taşınamaz ve yer değiştirilemez. Bu durum sabit donanım kısıtının göz önünde bulundurulmasını sağlamalıdır. Yapılacak olan montaj hattı dengeleme çalışması yani montaj sistemi bu makinelerinin konumları göz önünde bulundurularak yapılmalıdır. Bu çalışma böylece verimi daha da arttıracaktır.

Ürünün yapısından dolayı ve hattın durumundan dolayı işçilerin hatlara müdahale edememe durumlarından kaynaklı konum kısıtları vardır [4]. Eğer hatta çalışan operatör kendi konumundan dolayı ve hattın genişliğinden dolayı bantta çalıştığı istasyonda müdahale edemediği konum varsa burada konum kısıtı vardır. Yapılacak olan çalışmalarda bu kısıt göz önüne alınmalıdır. Hatta hatlar bu durum göz önüne alınarak hattın genişliği operatörün müdahale edebilmesine göre belirlenmelidir. Operatör hatta çalışmış olduğu istasyonda her yere müdahale edebilmelidir.

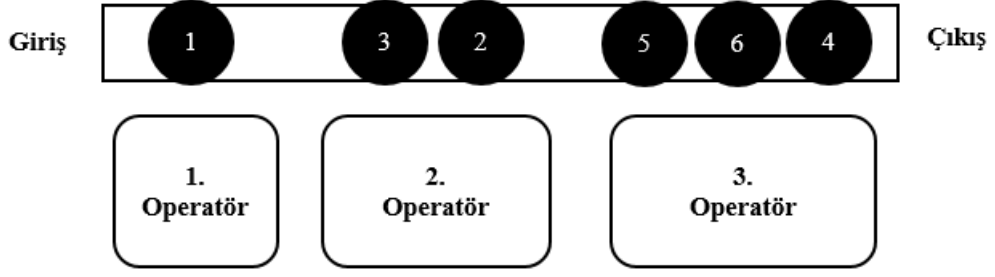
Ayrıca bu tip montaj hattı dengeleme çalışmalarında iş sağlığı ve güvenliği kesinlikle göz önüne alınmalıdır. Montajda kullanılacak olan bütün alet, ekipman ve teçhizat iş sağlığı ve güvenliği kuralları çerçevesinde operatörlere kullanılmalıdır.

## **2.4. Montaj Hattı Çeşitleri**

Montaj hatlarının yerleşim şekillerine göre değişkenlik göstererek birden fazla düzeni vardır. Bu montaj hattı düzenleri sanayi kuruluşu içerisindeki makinenin konumu, sanayi kuruluşunun alanı, makine ve ekipmanların konumları ve operatör sayıları gibi parametreler göz önüne alınarak oluşturulur. Yerleşim şekillerine göre montaj hatları, geleneksel (düz) montaj hatları, U-Tipi montaj hatları ve paralel montaj hatları şeklinde olmak üzere üç çeşitte incelenmektedir:

### **2.4.1. Geleneksel (düz) montaj hatları**

Geleneksel tipteki montaj hatları üretim tesislerinde en yaygın olarak kullanılan montaj hattı çeşididir. Ayrıca montaj hatları arasında en eskiye dayanan montaj hattı çeşididir. Geleneksel montaj hatlarında iş istasyonları seri bir şekilde birbiri ardına sıralanır. Bu tip montaj hatlarında ürün hattın başından hatta dahil edilecek ve aynı doğrultuda ilerleyerek hattın sonunda nihai ürün haline gelerek üretim prosesi tamamlanacaktır. Geleneksel montaj hattı için örnek şekil 3'te gösterilmiştir. Şekil 3'e göre, 6 görev açılan 3 istasyona uygun şekilde dağıtılmıştır. Birinci operatör, birinci istasyonda 1 numaralı görevi, ikinci operatör, ikinci istasyonda 3 ve 2 numaralı görevleri, üçüncü operatör ise üçüncü istasyonda 5, 6 ve 4 numaralı görevleri gerçekleştirmektedir. Şekil 3'te görüldüğü gibi görevler birbiri ardına sıralanmış istasyonlarda tamamlanmaktadır.



Şekil 3. Geleneksel (Düz) Montaj Hattı

Geleneksel montaj hatlarının birçok avantaj ve dezavantajı da bulunmaktadır.

Geleneksel montaj hatlarının avantajları:

- Basit bir sistemdir.
- Montaj akışı tek bir hatta gerçekleşir böylece montaj kolay olur.
- Hatlara dışarıdan gerçekleşmesi gereken müdahaleler daha kolaydır.
- Hatta transfer ve bant sistemlerinin kullanılabilirliği kolaydır.
- Maliyetler azalır.

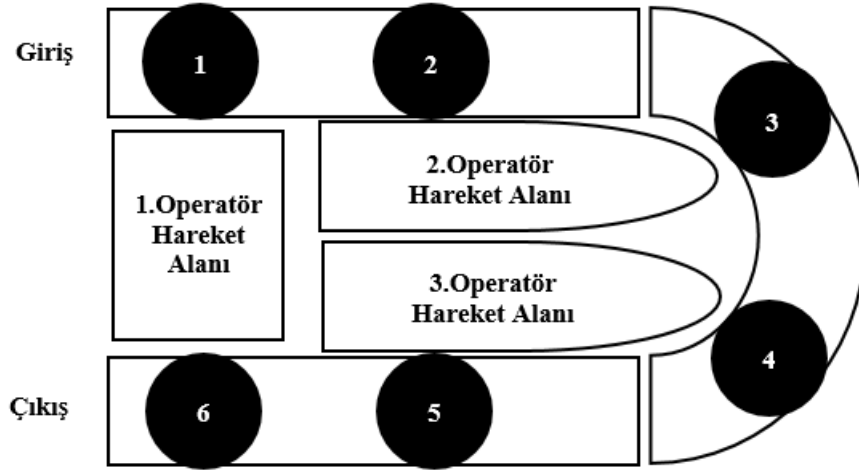
Geleneksel montaj hatlarının dezavantajları ise:

- Bir montaj prosesinde birçok görev olabilir. Bu birçok görev ise sonuç olarak birçok iş istasyonu doğurabilir. Bu iş istasyonları ise birbiri ardına seri olarak bir düz hat üzerinde yerleştiği zaman çok büyük yer kaplayabilirler ve bunun sonucunda geleneksel montaj hatlarında ciddi bir alan dezavantajı olabilir.
- Geleneksel montaj hatlarında operatörler birbiri ardına seri olarak dizilmiş iş istasyonlarında görev aldıklarında birbirleri arasında iletişim kurarken zorlanacaklardır. Bu durum geleneksel montaj hatlarına ek bir dezavantaj getirmektedir.

Geleneksel montaj hattına sahip sanayi kuruluşlarında montaj prosesi çok fazla görev ve çok fazla istasyonlarla oluşuyorsa bu sanayi kuruluşlarının çok uzun bir hattı kullanabilmek için yeterli alanı olmayabilir. Bu tip durumlarda bu tip hatlar üretim şekline göre belirlenmiş istasyonlar arasında bölünerek, bölünmüş istasyonlardan oluşan yeni düz hatlar alana farklı şekillerde yerleştirilebilir. Bu tip durumlarda ise hatlar arasındaki ürün transfer işlemleri konveyörler veya robotlar vasıtasıyla sağlanabilir. Bu durum geleneksel montaj hatlarında yeni bir dezavantaj yaratabilir.

## 2.4.2. U-tipi montaj hatları

Geleneksel montaj hatlarında oluşan alan dezavantajını ortadan kaldırmaya istinaden U-Tipi montaj hatları kullanılmaya başlamıştır. Ayrıca günümüz koşullarında üretim çeşitliliğinin artmasıyla beraber tam zamanlı üretim önemli bir üretim şekli olmuştur. Tam zamanlı üretim uygulanırken üretimin daha hızlı gerçekleşmesi gerekmektedir. Bu hususlar günümüzde U-Tipi montajın sanayi kuruluşları için önemli bir üretim şekli olduğunu göstermektedir. U-Tipi montaj hattının çalışma şekli şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. U-Tipi Montaj Hattı

U-Tipi montaj hatları şekil olarak U harfi şeklinde yerleştirilir. Şekil 4'te U-Tipi montaj hattındaki görevler birden altıya kadar numaralandırılmıştır. Burada operatörlerin U şeklinin içerisinde çalışması sağlanır. U-Tipi montaj hatlarında hat başlangıcı ve hat sonu aynı yöne doğrudur. U şeklinin üzerinde birbiri ardına yerleştirilmiş istasyonlarda, operatörler birden fazla istasyonlarda çalışabilirler. Ayrıca birden fazla istasyonlarda çalışan operatörler, yürüme mesafesinde olan istasyonlarda çalışabilirler. Örnek vermek gerekirse, hattın başında ve sonunda bir operatör çalışabilir. Şekil 4'e göre birinci operatör 1 ve 6 numaralı görevlerde, ikinci operatör 2 ve 3 numaralı görevlerde, üçüncü operatör ise 4 ve 5 numaralı görevlerde çalışmaktadır.

U-Tipi montaj hatlarında ayrıca iki adet U-Tipi birleştirilebilir. Birleştirilen U-Tiplerinde operatörler her iki hatta çalıştırılabilir. Bu iki U-Tipi bir konveyör sistemi veya başka bir transfer sistemiyle birleştirilebilir. Böylece U-Tipi montaj hatlarında istasyon sayısı arttırılabilir ve böylece daha çok görevli üretimler de gerçekleştirilebilir.

U-Tipi montaj hatları düz montaj hatlarıyla kıyaslandığında, alandan tasarruf edileceği için hat sayısı arttırılarak bununla paralel olarak üretim sayısı arttırılabilir. Ayrıca operatörler



birbiriyle karşılıklı olan istasyonlarda da çalışabileceğinden düz montaj hatlarına göre daha az operatöre ihtiyaç duyar. Bir diğer yandan ise tam zamanlı üretime geçiş sağlanacaktır.

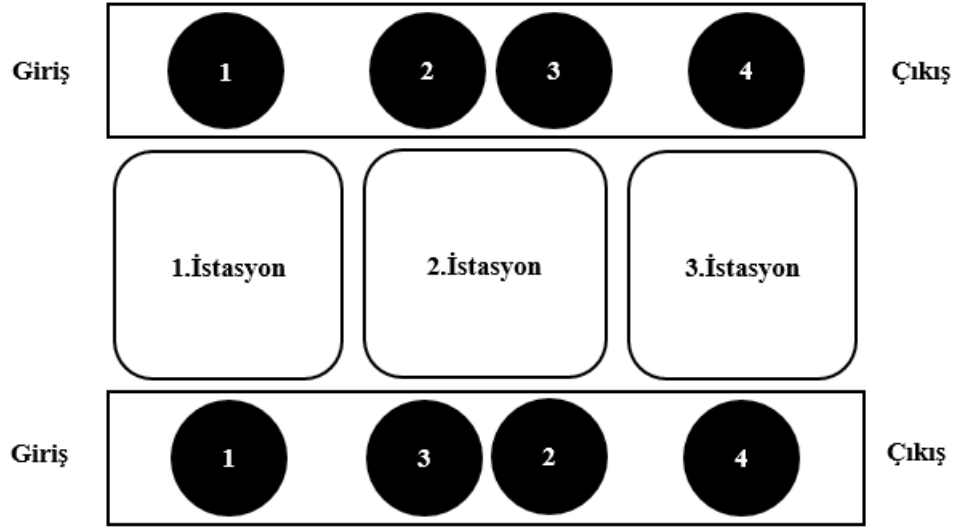
U-Tipi montaj hatlarında dikkat edilmesi gereken hususlardan bir tanesi, U-Tipi arasında karşı istasyonlarda çalışan bir operatörün karşı istasyona yürüme mesafesi ve süresi göz önüne alınmalıdır. Bu oluşacak süre çevrim süresine eklenmelidir. Dikkat edilmesi gereken hususlardan bir diğeri ise, U-Tipi hatlarda birden fazla istasyonda çalışan bir operatörün kalifiye olması gerekmektedir. Kalifiye olacak olan operatör bilgi seviyesine göre rahatlıkla iki veya daha fazla istasyonda çalışabilecektir.

Montaj ile üretim sağlayan birçok sanayi kuruluşunda günümüzde geleneksel tipte düz montaj hatları kullanılmaktadır. U-Tipi montaj hatlara geçilmek istendiği takdirde makine, teçhizat ve ekipmanların yeri değiştirilmek zorunda kalınabilir. Buna ek olarak hattın tasarımının da baştan değiştirilmesi gerekmektedir.

Operatörlerin iletişiminin daha kolay olması, çalışan iş operatörlerinin tüm iş akışını kendileri kontrol edebilmesi U-Tipi montaj hatlarının avantajlarından bir tanesidir. Bu durum iş bölümünü rahatlatacaktır. Ayrıca kullanılacak ekipman sayısını da azaltacaktır. U-Tipi montaj hatlarında alan tasarrufu gerçekleşir. Ek bir konveyör veya transfer sistemine gerek kalmaması U-Tipi montaj hatlarının avantajlarından bir diğeridir.

### **2.4.3. Paralel montaj hatları**

Paralel montaj hatları düz montaj hatlarının birbirine paralel olarak konumlandırılmasıyla oluşur. Şekil 5'te birbirine paralel olarak konumlandırılmış iki adet düz montaj hattı gösterilmiştir. Buna göre paralel konumlandırılmış iki montaj hattında dörder görev açılan üç istasyon içerisine dağıtılmıştır. Birbirine yürüme mesafesinde olan montaj hatlarında açılan istasyonlar çalışacak operatörler için ortak çalışma alanı oluşturmuştur. Bir başka deyişle birinci montaj hattının birinci istasyonunda çalışan bir operatör boş zamanı kaldığı için ikinci montaj hattının birinci istasyonunda çalışabilmektedir. Aynı durum ikinci ve üçüncü istasyonlar için de geçerlidir.



Şekil 5. 2 Hatlı Paralel Montaj Hattı

Paralel montaj hatları sanayide iki hususta kullanılmaktadır. Bu iki husus:

1. Birden fazla ürün üretilmesi istendiğinde,
2. Bir ürünün talebinin yüksek olmasına istinaden, üretimin hızlandırılması istendiğinde kullanılmaktadır.

Yukarıda belirtilen hususlara istinaden sanayi kuruluşlarında paralel montaj hatları geliştirilmiştir. Birden fazla ürün üretilmesi istendiğinde ve hat sayıları üretim kapasitesi için yetersiz olduğunda ek bir paralel montaj hattı kurulabilir. Burada dikkat edilmesi gereken husus üretilen ürünlerin birbirine benzer olmasıdır. Çünkü iki paralel montaj hattında kullanılacak olan ekipman, teçhizat ve makineler aynı olacaktır.

Paralel montaj hatlarında birbiriyle yürüme mesafesinde ve paralel olarak yerleştirilmek üzere, sanayi kuruluşunun alanı gözetilerek, ayrıca üretim kapasitesi baz alınarak ve ürün sayıları da dikkate alınacak şekilde birden fazla geleneksel (düz) montaj hatları yerleştirilebilir. Paralel montaj hatlarında hattın başından giren ürün hattın sonundan nihai ürün olarak çıkmaktadır. Dolayısıyla paralel montaj hatlarında herhangi bir transfer sistemi veya konveyöre gerek kalmadan üretim tamamlanabilir.

Paralel montaj hatları, düz montaj hatları ve U-Tipi montaj hatları harmanlanarak oluşturulmuştur. Düz montaj hatlarının birbirine paralel olarak konumlandırılmasıyla beraber sistematik olarak daha basit bir şekil alarak, U-Tipi montaj hatlarında olduğu gibi operatörlerin karşılıklı istasyonlarda çalışmasını sağlayarak hem düz hem de U-Tipi yerleşim şekillerinden birtakım avantajlar olarak oluşturulmuştur.

Paralel montaj hatlarında çalışacak olan operatörler çalıştığı istasyona ek olarak çalıştığı istasyona dik olan istasyonlarda çalışabilirler. Bu durumda operatörlerin kalifiye

olması gerekmektedir. Operatörlerin birden fazla istasyonda çalıştırılması durumunda operatör sayısında tasarrufa gidilebilecektir. Böylece paralel montaj hatları, düz montaj hatlarına nazaran daha tasarruflu bir durum kazanacaktır. Operatörün bir ikinci hatta bulunan dik istasyona yürümesi durumunda aynı U-Tipi montaj hatlarında olduğu gibi operatörlerin yürüme mesafesi dikkate alınmalı ve bu süre çevrim süresine eklenmelidir.

Paralel montaj hatları U-Tipi montaj hatları veya geleneksel (düz) montaj hatlarına göre aynı ürünlerin farklı hatlarda üretilebilmesi, her bir hat için farklı çevrim süreleri önerilebilmesi, operatörler arasındaki iletişim, ortak kaynak kullanımına istinaden boş zamanların azaltılarak hat verimliliğinin artırılması ve alet ve ekipman maliyetlerinin azaltılması gibi birçok avantaja sahiptir [5].

Bir sanayi kuruluşunda paralel montaj hatları kurulursa o tesiste üretim kapasitesi artırılabilir. Çünkü üretilen ürünler birden fazla hatta üretilebilir hale gelecektir. Başka bir açıdan bakılırsa iki farklı ürün iki farklı hatta üretilerek üretim kapasitesi artırılabilir. Ayrıca üretim kapasitesinin artırılmasıyla beraber nihai ürünün müşteriye ulaşması gereken termin süresi azaltılabilecektir veya üretim kapasitesinin artırılmasıyla müşteriye tedarik sayılarında artış sağlanabilecektir.

Paralel montaj hatlarının kullanıldığı tesislerde kalifiye olan bir operatör birden fazla hatta karşılıklı istasyonlarda çalışabileceği için kullanılan malzeme konusunda tasarrufa gidilebilecektir.

Son yıllarda montaj hattı bulunan üretim tesislerinde paralel montaj hatları kullanılmaktadır. Bu tip hatların kullanılma sebebi istasyon sayısını ve çevrim süresinin enküçüklenmek istenmesidir. Çevrim süresi ve istasyon sayıları azaltılabilirse üretim tesisi daha verimli şekilde çalışıyor olacaktır.

## **3. PARALEL MONTAJ HATTI Dengeleme ve Ürün Atama Problemi**

### **3.1. Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemi**

Birçok sanayi işletmesinde birden fazla geleneksel (düz) montaj hattı bulunmaktadır. Paralel montaj hatları, yürüme mesafesinde olacak şekilde birden fazla düz hattın birbirlerine paralel olarak konumlandırılmasıyla oluşur.

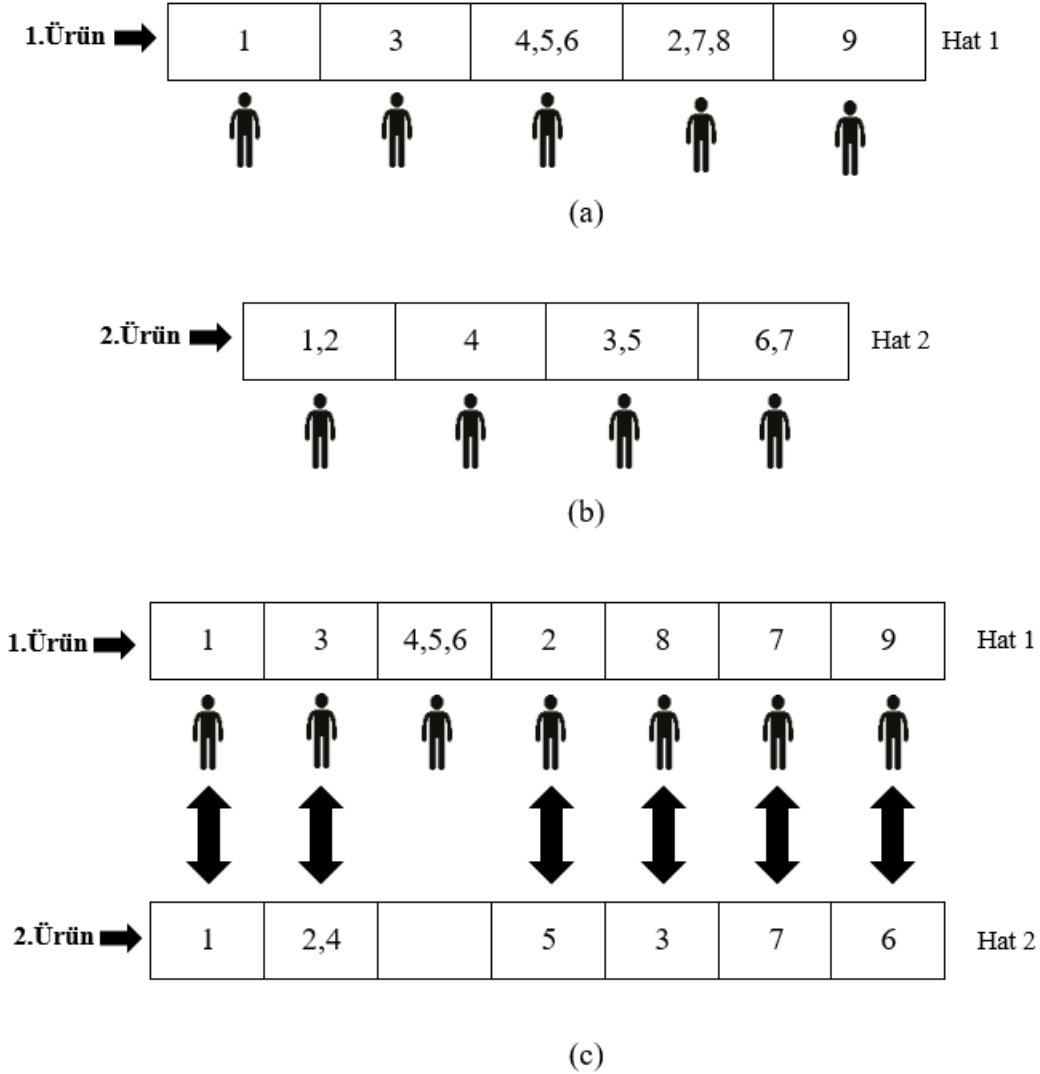
Paralel olarak konumlandırılan düz montaj hatlarının eş zamanlı dengelenmesine PMHDP denilmektedir. PMHDP’de operatör sayısı, maliyet, istasyon sayısı ve çevrim süresi gibi performans ölçütleri optimum şekilde kullanılmaya çalışılır. Bu çalışmada ise amaç PMHDP için çevrim süresinin enküçüklenmesidir.

PMHDP’de komşu hatların dikine istasyonlarındaki görevler ortak operatör vasıtasıyla gerçekleştirilebilir. Ortak operatör çalışabilmesi için paralel montaj hatları operatörlerin dikine yürüme mesafesinde olmalıdır. Böylece operatörler komşu hatların birbirine dik konumunda bulunan istasyonlarda ortak çalışabilecektir dolayısıyla PMHDP’de operatör sayısında azalmaya gidilebilecektir. Operatör sayısının azalması ile doğru orantılı olarak maliyet azalacaktır.

Üretim tesislerinde ürün talepleri arttığında, ürünlerin farklı hatlarda üretilmesi sağlanmaktadır. PMHDP’de ürünlerin atanacağı hatlar çok önemlidir. Ürünlerin doğru hatlara atanması, operatörlerin komşu hatlarda ve dik istasyonlarda ortak çalışmasını sağlayabilir ve istasyonlarda oluşan boş zamanları azaltabilir. Dolayısıyla çevrim süresinde enküçüklenme sağlanabilecektir. Ürünlerin doğru hatlara atanması sonucu üretim tesisinde arz-talep dengesi tutturulabilecektir.

Derya [4]’ya göre, montaj hatlarına atanan her ürünün çevrim süreleri birbirinden farklı olabilir. Konu ile ilgili, farklı çevrim sürelerine sahip iki ürün önerilmiştir. Ürünler iki hatta atanmış olup, birbirinden bağımsız olarak dengelenmiştir. Bağımsız dengelemeden kasıt, istasyonda boş zaman kalsa dahi operatörün komşu hatta ortak iş yapamamasıdır. Önerilen iki ürün iki paralel montaj hattında bağımsız olarak dengelenmiş ve sonuçları gösterilmiştir. Aynı iki ürün paralel montaj hatlarında ortak olarak da dengelenmiştir ve sonuçları gösterilmiştir. Gösterilen sonuçlara göre ortak hat dengeleme çalışmasında operatör sayısının bağımsız hat dengeleme çalışmasına göre daha az olduğu görülmüştür.

Şekil 6’da örnek bir PMHDP çalışması gösterilmiştir. Verilen örnek şekilde iki farklı montaj hattı vardır. Öncelikle iki hattın birbirinden bağımsız olarak dengelenmesi, sonrasında iki montaj hattının eş zamanlı olarak dengelenmesi incelenmiştir.



Şekil 6. Örnek PMHDP Çalışması

Şekil 6’da verilen örneğe göre, birbirine paralel olarak konumlandırılmış iki geleneksel (düz) hat bulunmaktadır. (a) ve (b) şekillerinde bağımsız dengelenmiş hatlar gösterilmiştir. (c) şeklinde ise ortak PMHDP çalışması gösterilmiştir.

Her ürünün üretilmesi sırasında görevleri arasındaki öncelik ilişkileri göz önünde bulundurulur. Hatlarda sırasıyla, birinci ürün için dokuz görev ve ikinci ürün için yedi görev bulunmaktadır. İstasyonlarda görevli olan operatörler komşu hatlarda ve bulunduğu istasyonlara dik izdüşümde bulunan istasyonlarda çalışabilmektedir.

Bağımsız olarak dengelenmiş (a) şekli ve birinci üründe dokuz görev beş istasyona uygun şekilde dağıtılmıştır. Beş istasyonda tamamlanacak tüm görevler için beş operatör boşta istasyon kalmayacak şekilde görevlendirilmiştir.

Bağımsız olarak dengelenmiş (b) şeklinde ve ikinci üründe ise yedi görev dört istasyona uygun şekilde dağıtılmıştır. Dört istasyonda tamamlanacak tüm görevler için dört operatör boşta istasyon kalmayacak şekilde görevlendirilmiştir.

(c) şeklinde birinci ve ikinci ürün iki montaj hattında ortak olarak dengelenmiştir. Paralel olarak konumlandırılmış iki montaj hattı açılmıştır. Birinci montaj hattında dokuz görev yedi istasyonda tamamlanırken, ikinci montaj hattında yedi görev altı istasyonda tamamlanmaktadır.

(c) şeklinde montaj hatlarının ortak olarak dengelenmesiyle operatörler ortak olarak kullanılabilir. İki ürünün bağımsız olarak dengelenmesiyle ((a) ve (b)) toplam dokuz operatör çalışırken, iki ürünün ortak dengelenmesiyle (c) yedi operatör çalışmaktadır. Gösterilen (c) şeklinde birinci, ikinci, dördüncü, beşinci, altıncı ve yedinci istasyonlarda ortak operatör çalıştırılmıştır. Üçüncü istasyonda ise tek operatör birinci montaj hattında görevlendirilmiştir çünkü ikinci montaj hattının üçüncü istasyonunda görev ataması yapılmamıştır.

PMHDP'nin kısıtları, her görevin bir istasyona atanması, görevlerin tamamlanma süresinin çevrim süresini aşmaması ve öncelik ilişkilerinin dikkate alınmasıdır. Eğer bu kısıtlar göz önünde bulundurulursa üretim kapasitesinin maksimum üretim düzeyine gelebilmesi sağlanabilecektir.

PMHDP çözülürken kullanılan malzeme miktarının en aza indirilmesi, makine kapasitelerinin ise en yüksek şekilde çalışması istenir. Bir makinede, üretilmesi gereken maksimum miktar üretilmelidir ve aynı zamanda üretimde kullanılan malzemenin en aza indirilmesi hedeflenmelidir.

### **3.2. Paralel Montaj Hattı Dengeleme için Literatür Araştırması**

Paralel montaj hatları, paralel durumdaki montaj hatlarının sayısından oluşan üretim sistemleri olarak kabul edilmektedir. Öngörülen çevrim süresi içerisinde her bir hat üzerinde bir ürün cinsine göre belirli sayıda ürün imal edilmesidir [6].

Çoğu üretim tesisi birden fazla montaj hattına sahiptir. Talep yeterli derecede yüksek olursa montaj hatlarını arttırmak mümkündür. Bu durum montaj hattını kısaltma avantajı sağlar ama bundan dolayı daha fazla teçhizat ve ekipman gerekebilir [7].

Birbirlerine yakın olarak konumlandırılan paralel montaj hatlarında operatörler yürüme mesafesinde olan ve çevrim süresini aşmamak koşulu ile komşu istasyonlarda çalışabilmektedir [8].

Paralel montaj hattı dengeleme problemleri hat üzerindeki işin veya ürünün sayısına göre iki ana sınıfta incelenir. Eğer ki hat üzerinde tek bir iş yapılıyorsa bu paralel montaj hattı dengeleme problemine tek modelli montaj hattı dengeleme problem denilmektedir. Eğer ki hat üzerinde aynı anda bir üründen fazla ürün montajı yapılıyorsa bu paralel montaj hattı dengeleme problemine çok modelli paralel montaj hattı dengeleme problem denilmektedir [9].

İki tip montaj hattı dengeleme problem bulunmaktadır. Bu problemlerden ilki, çevrim süresinin verilip iş istasyon sayısının enküçülenmek istenmesidir. Bu tip problemlerde sanayi kuruluşunun üretmesi gereken miktar dikkate alınarak üretimin gerçekleşeceği bir çevrim süresi belirlenmiştir. Böylece belirlenen bu çevrim süresi dahilinde istasyon sayısının minimize edilmesi istenmektedir. Problemlerden bir diğeri ise, istasyon sayısının verilip çevrim süresinin minimize edilmek istenildiği bir problemdir. Bu problem şeklinde, istasyon sayıları ve çalışacak operatör sayıları bellidir. Böylece bu kısıtlar altında oluşturulacak en küçük çevrim süresi belirlenmeye çalışılır [10].

Montaj hattı dengeleme problemlerinde maliyetler en aza indirilerek taleplerin en hızlı şekilde karşılanması hedeflenir. Montaj hattı dengeleme problemleri zorlu ve karmaşık problem sınıfına dahil olmaktadır. Problemin büyüklüğü arttıkça montaj hattı dengeleme çalışmalarında en iyi çözümü belirlemek zorlaşacaktır. Problem büyüklüğünü istasyonların biçimleri, görevlerin şekli ve problemdeki hat sayısı belirleyecektir [11].

Montaj hattı dengeleme problemlerinin çözümü için iki teknik grubu belirlenmiştir. Bu iki grup kesin çözüm yöntemleri ve sezgisel çözüm yöntemleri olarak ayrılmaktadır. Doğrusal programlama, tamsayı programlama, dinamik programlama, amaç programlama, en kısa yol tekniği, en uzun yol tekniği ve dal sınır algoritması kesin çözüm yöntemleri olarak belirlenirken, göreceli ağırlıklandırma, sezgisel dal sınır, değiş- tokuş, rassal örnekleme, etkileşimli bilgisayar programları, benzetim ve diğer yöntemler sezgisel çözüm yöntemleri olarak belirlenmiştir [12]

Hat dengelemesinin amacı, talep edilen üretim miktarını karşılayacak şekilde, görevlerin iş istasyonlarına atanması, bu iki husus yapılırken de atanan görevlerin operatörlere eşit biçimde dağıtılması ve iş istasyon sayısının en az sayıda tutulmaya çalışılmasıdır. Dolayısıyla görevler, iş istasyonuna atanacak şekilde gruplandırılmalıdır. Buna istinaden, üretimin hızlı ve görevlerin çok olduğu sistemlerde istasyonlar arasında olan

sürelerin minimum düzeyde tutulmasına çalışılır. Bunun sonucunda ise, boşa harcanmış olan süre azaltılmış ve kapasite daha etkin bir şekilde kullanılmış olur [13].

Paralel montaj hattı dengeleme, önceden tanımlanmış tek modelli ve çok modelli paralel montaj hatlarına göre, öncelik ilişkileri dikkate alınarak montaj görevlerinin hatlara optimum şekilde atanmasıdır. Tek modelli hat dengeleme çalışmaları iki problem tipiyle çözülebilir. Bu tiplerden ilki, üretilmesi istenen üretim miktarına göre minimize edilen istasyon sayısına görevlerin atanmasını içerir. İkinci tip ise, üretim miktarını maksimize ederek verilen istasyon sayısı içerisinde çevrim süresini minimize etmeye çalışmaktır [14].

Montaj hattı dengeleme çalışmaları iki ana başlık altında toplanır. Tip 1 sabit zamanda istasyon sayısının enküçüklenmesini amaçlarken, tip 2 sabit iş istasyonu sayısında çevrim süresini enküçüklemeyi amaçlamaktadır. Bu iki yöntem de hem tek modelli hem de çok modelli üretim şekillerinde kullanılabilir. Bu modellerin büyük çoğunluğunda, sanayi kuruluşlarında ekipmanların kullanımı ve üretim miktarını karşılayabilmek için yapılan montaj hattı dengeleme çalışmaları sunulur. Geleneksel hatlar düz hat boyunca sıralı olarak birleştirilen görevler ve iş istasyonlarını düzenler. Bugünlerde ürünler sadece tek modelli olarak değil az da olsa karmaşık modelli olarak da kullanılabilir. Bu durum karmaşık modellerde de az sayıda montaj operasyonlarına ihtiyaç duyar. Ama nihai ürün için düz hatlar montaj içerisinde popülerliğini korumaktadır [15].

Montaj hattı dengeleme, bazı kısıtlar ve performans parametreleri optimize edilirken görevlerin istasyonlara atanmasının problemi. Performans parametresi, operatörlerin her bir iş istasyonuna atanması varsayımıyla montaj hattı üzerinde kullanılan iş istasyonlarının sayısının enküçüklenmesidir. Montaj hattının temel kısıtları üç grupta incelenir. Birinci grup kısıtların atanmasıdır (her bir görev en azından bir iş istasyonuna atanmalıdır.). İkinci grup öncelik ilişkileri kısıtlarıdır. Üçüncü grup ise çevrim süresi kısıtlarıdır (Hiçbir iş istasyonunun süresi çevrim süresini geçmemelidir.) [16].

Montaj hatları iki ana grupta incelenir. Bu gruplar geleneksel montaj hatları ve U-Tipi montaj hatlarıdır [17].

Montaj hatları tek taraflı ve çift taraflı olmak üzere ikiye ayrılır. Tek taraflı montaj hatlarında hattın sadece tek tarafı kullanılırken (örneğin sadece sağ), çift taraflı montaj hatlarında hattın her iki tarafı da (örneğin hem sağ hem sol) kullanılabilir. Çift taraflı hatlar genelde yüksek hacimli üretimlerde (örneğin tır, otobüs vb.) kullanılır [18].

Paralel montaj hattı dengeleme hakkındaki birtakım çalışmalar, Kellegöz [19], Çil, Mete, Özceylan ve Ağpak [20], Tapkan, Özbakır ve Baykaşoğlu [21], Küçükkoç ve Zhang



[22], Küçükkoç ve Zhang [23], Özbakır, Baykaşoğlu, Görkemli ve Görkemli [24], Aguilar, Pastor ve Garcia-Villoria [25], Özcan [26] tarafından da gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca montaj hattı dengeleme çalışmaları ile ilgili çalışmalardan bazıları, Kaymaz [27], Uçar [28], İspir [29], Gökçen [30], Kuvvetli [31], Raj, Mathew, Jose ve Sivan [32], Öztürk, Tunalı, Hnich ve Örnek [33], Falkenauer [34], Dolgui ve Proth [35], Purnomo, Wee ve Rau [36], Boysen ve Bock [37], Nicosia, Pacciarelli ve Pacifici [38], Erel ve Gökçen [39], Gökçen [40], Madenoğlu [41], Ege, Azizoğlu ve Özdemirel [42] tarafından gerçekleştirilmiştir.

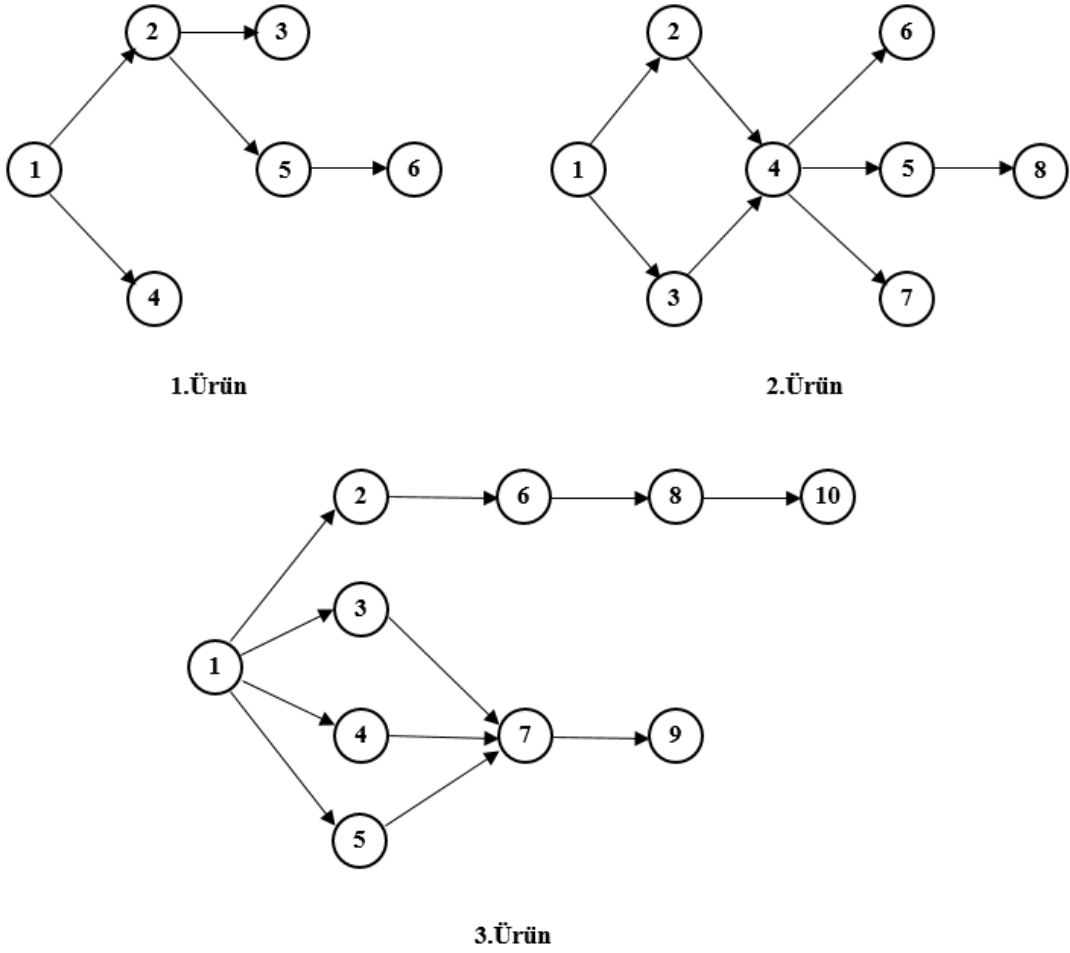
### 3.3. Ürün Atama Problemi

Üretim tesislerinde ihtiyaç dahilinde kurulan paralel montaj hatlarında doğru ürünlerin doğru hatlara atanması çok büyük önem teşkil eder. Paralel olarak konumlandırılmış montaj hatlarının eş zamanlı olarak dengelenmesine ek olarak ürünlerin doğru hatlara atanmasına yönelik PMHD-ÜAP oluşmaktadır. Ürünlerin doğru hatlara atanması iki amaç için kullanılmaktadır. Bu iki amaç tip-1 ve tip-2 olarak isimlendirilir. Tip-1 istasyon sayısının enküçüklenmesini sağlarken, tip-2 ise çevrim süresinin enküçüklenmesini sağlar. Bu çalışma tip-2'ye yönelik olarak yapılmıştır.

Ürünlerin doğru hatlara atanması ile, birbirine paralel iki montaj hattı arasında dik konumdaki istasyonlarda ortak operatör çalıştırılabilir. Montaj hatları arasında ortak operatör çalıştırılabilmesi için operatörlerin öncelikle bulunduğu istasyonlarda olan görevini yapması ve sonrasında proses sürecinde boş zamanı olması gereklidir.

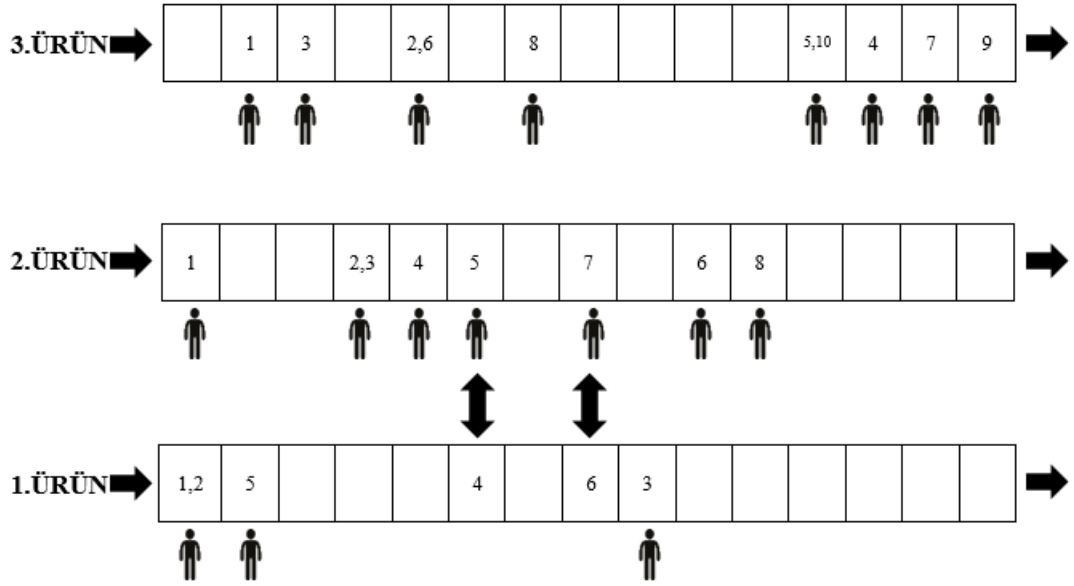
Ürünlerin hatlara atanması için kısıtlar bulunmaktadır. Örnek vermek gerekirse, birinci montaj hattının ikinci istasyonunda çalışan operatör ikinci montaj hattının üçüncü istasyonunda çalışmaktadır. Böyle bir durum meydana gelirse PMHDÜP içinde karmaşıklık meydana gelecektir. Ayrıca ikiden fazla olan montaj hatlarında birinci montaj hattında çalışan operatör üçüncü montaj hattında çalışmamaktadır. Böyle durum meydana gelirse birinci montaj hattında çalışan operatörün üçüncü montaj hattına yürümesi büyük zaman kaybettirecektir. Ürünlerin doğru hatlara atanmaması çevrim süresini ve istasyon sayısını direkt olarak etkileyebilir.

PMHD-ÜAP'nin önemi şekil 7, şekil 8 ve şekil 9'da anlatılmıştır. PMHD-ÜAP için 3 adet örnek ürün oluşturulmuştur. Şekil 7'de ürünlerin öncelik ilişkileri verilmiş olup, şekil 8'de eş zamanlı olarak dengelenerek ürünlerin doğru atandığı montaj hatları, şekil 9'da ürünlerin yanlış atandığı montaj hatları verilmiştir.



Şekil 7. Örnek Ürünlerin Öncelik İlişkileri

Şekil 7’de örneği sunulan ürünlerin görevleri arasındaki öncelik ilişkileri verilmiştir. Örneklere göre birinci ürün 6 görevden, ikinci ürün 8 görevden ve üçüncü ürün 10 görevden oluşmaktadır. Bu üç ürün, üç farklı montaj hattına atanacaktır ve her bir ürünün görevleri atandığı hatlarda tamamlanacaktır. Bu bilgiler ışığında, şekil 8’de ürünlerin doğru hatlara atandığı montaj hatları gösterilmiştir. Şekil 9’da ise aynı ürünlerin doğru hatlara atanmaması ve sonuçları gösterilmiştir.

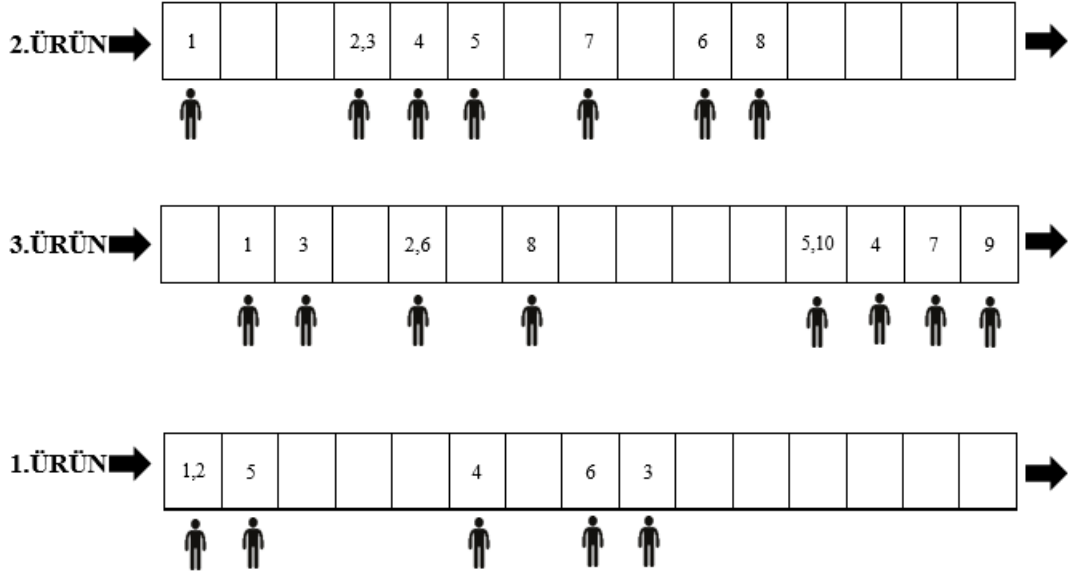


Şekil 8. Ürünlerin Doğru Hatlara Atandığı Paralel Montaj Hatları

Şekil 8’de gösterilen PMHDP’ye göre, üç ürün üç farklı montaj hattına atanmıştır ve PMHDP çalışması gerçekleştirilmiştir. PMHDP çalışmasının sonucu üçüncü ürün birinci montaj hattına, ikinci ürün ikinci montaj hattına ve birinci ürün üçüncü montaj hattına atanmıştır. Şekilde görüldüğü üzere, üçüncü ürün için birinci montaj hattında 2, 3, 5, 7, 12, 13, 14 ve 15 numaralı istasyonlar açılmıştır. İkinci ürün için ikinci montaj hattında 1, 4, 5, 6, 8, 10 ve 11 numaralı istasyonlar açılmıştır. Birinci ürün için ise üçüncü montaj hattında 1, 2, 6, 8 ve 9 numaralı istasyonlar açılmıştır.

Örneğe göre, yalnızca birinci ve ikinci montaj hatları ile ikinci ve üçüncü montaj hatları arasında ortak operatör kullanılabilir. Birinci ve üçüncü montaj hatlarında konumlarından ötürü ortak operatör kullanılamayacaktır.

Ürünlerin doğru hatlara atanmasının faydası şekil 8’de görüldüğü gibi, ikinci montaj hattı ve üçüncü montaj hattı arasında ortak operatör kullanılmasıdır. İkinci ve üçüncü montaj hatlarında 6 ve 8 numaralı istasyonlar birleştirilmiş ve bu iki istasyonda çalışan operatörler hem ikinci hem de üçüncü montaj hatlarında görev almaktadırlar. Kendi görevini tamamlayan operatörlerin PMHDP sonucu, kalan boş zamanında komşu hattaki görevleri tamamladığı görülmektedir. Birinci ve ikinci montaj hatları arasında PMHDP sonucu ortak operatör kullanılamamıştır. Birinci montaj hattındaki açılmış istasyonlarda çalışan operatörler sadece kendi hattındaki işleri yapmaktadırlar ve komşu hatta çalışmamaktadırlar.



Şekil 9. Ürünlerin Doğru Hatlara Atanmadığı Paralel Montaj Hatları

Şekil 9’da verilen örnekte, şekil 8’de kullanılan ürünler şekil 8’den farklı montaj hatlarına atanmıştır ve sonuçları incelenmiştir. Şekil 9’da yine üç farklı ürün üç farklı montaj hattına atanmıştır. İkinci ürün birinci montaj hattına, üçüncü ürün ikinci montaj hattına ve birinci ürün üçüncü montaj hattına atanmıştır. Şekilde görünen bilgilere göre, ikinci ürün için birinci montaj hattında 1, 4, 5, 6, 8, 10 ve 11 numaralı istasyonlar açılmıştır. Üçüncü ürün için ikinci montaj hattında 2, 3, 5, 7, 12, 13, 14 ve 15 numaralı istasyonlar açılmıştır. Birinci ürün için ise üçüncü montaj hattında 1, 2, 6, 8 ve 9 numaralı istasyonlar açılmıştır.

Şekil 8 ve şekil 9’da kullanılan ürünler aynı olmasına rağmen, şekil 9’da montaj hatları arasında ortak operatör kullanımı sağlanamamıştır. Şekil 8’de ikinci montaj hattına atanmış olan ikinci ürün, üçüncü montaj hattına atanmış olan birinci ürün ile ortak iş alanına sahipti ve operatörlerin kalan boş zamanıyla birlikte ortak kullanılabilmesi sağlanabilmişti. Şekil 9’da ise ürünlerin doğru hatlara atanmaması ile beraber ortak operatör kullanımı sağlanamamıştır. Dolayısıyla şekil 9’da verilen örnekte, ikinci ve üçüncü montaj hatları arasında ortak operatör kullanımı sağlanamamış ve toplamda iki operatör fazla çalıştırılmak zorunda kalmıştır. Başka bir şekilde açıklamak gerekirse, montaj hatlarına aynı ürünler atanmasına rağmen şekil 8’de verilen örnekte 18 operatör çalışırken, şekil 9’da verilen örnekte 20 operatör çalışmaktadır.

Bu çalışmada PMHD-ÜAP üzerine çalışılmıştır. En iyi çözümü bulabilmek için çevrim süresini enküçükleyecek istasyon odaklı ve operatör odaklı matematiksel modeller geliştirilmiştir.

## 4. PMHD-ÜAP İÇİN MATEMATİKSEL MODELLER

PMHD-ÜAP çözümü için birbirinden farklı yapıda olan operatör odaklı ve istasyon odaklı matematiksel modeller önerilmiştir. Görevlerin istasyonlara atandığı matematiksel model istasyon odaklı, görevlerin operatörlere atandığı matematiksel model ise operatör odaklı olarak isimlendirilmiştir. Önerilen matematiksel modellerin amacı ürünlerin doğru hatlara atanmasını sağlayarak çevrim süresini enküçükmektir.

### 4.1. PMHD-ÜAP İçin Operatör Odaklı Matematiksel Modeller

Operatör odaklı matematiksel modelde kullanılan notasyonlar ve parametrelerin açıklamaları aşağıda verilmiştir.

Notasyonlar:

$h$ : hat numarası,  $h=1, \dots, \bar{H}$ ,  $\bar{H}$ : hat sayısı

$p$ : ürün numarası,  $p=1, \dots, \bar{P}$ ;  $\bar{P}$ : ürün sayısı

$i, r, s$ : görev numarası,  $i=1, \dots, n_p$

$k$ : istasyon numarası,  $k=1, \dots, \bar{K}$ ;  $\bar{K}$ : istasyon sayısı

$n_p$ :  $p$  ürününe ait görev sayısı

$n_{max}$ : ürünlere ait olan görev sayılarının en büyüğü

$(r,s) \in P_{hs}$ : Bir öncelik ilişkisi;  $h$  hattındaki  $r$  görevi  $s$  görevinden önce tamamlanmalıdır

Parametreler:

$t_{pi}$ :  $p$  ürününe ait  $i$  görevinin tamamlanma zamanı

Değişkenler:

$C$ : Çevrim zamanı

$x_{hpik}$ : 1, eğer  $h$  hattında montajı yapılacak olan  $p$  ürününe ait  $i$  görevi  $k$  operatörüne atanmış ise; 0, aksi halde

$u_{hk}$ : 1, eğer  $h$  hattındaki  $k$  istasyonu kullanılmış ise; 0, aksi halde

$y_{hp}$ : 1, eğer  $h$  hattında  $p$  ürününün montajı yapılacak ise; 0, aksi halde

PMHD-ÜAP için operatör odaklı matematiksel model aşağıda verilmiştir:

$$Enk. TZ = C \quad (4.1.1)$$

(4.1.1) Amaç fonksiyonu, çevrim süresinin enküçülenmesidir.

$$\sum_{h=1}^{\bar{H}} \sum_{k=1}^{\bar{K}} x_{hpi k} = 1, \quad i = 1, \dots, n_p, \quad p = 1, \dots, \bar{P}; \quad (4.1.2)$$

(4.1.2) Her ürüne ait görevlerin (operasyonların) her birinin sadece bir hatta bulunan bir istasyona atanmasını sağlamaktadır.

$$\sum_{h=1}^{\bar{H}} \sum_{p=1}^{\bar{P}} \sum_{i=1}^{n_p} t_{pi} \times x_{hpi k} \leq c, \quad k = 1, \dots, \bar{K} \quad (4.1.3)$$

(4.1.3) Bir istasyonda çalışan bir operatörün toplam iş zamanının (istasyon zamanı) çevrim süresini aşmamasını sağlamaktadır.

$$\sum_{p=1}^{\bar{P}} \sum_{i=1}^{n_p} x_{hpi k} \leq n_{max} \times u_{hk}, \quad k = 1, \dots, \bar{K}, \quad h = 1, \dots, \bar{H}, \quad n_{max} = \max\{n_1, n_2, \dots, n_p\}; \quad (4.1.4)$$

$$\sum_{p=1}^{\bar{P}} \sum_{i=1}^{n_p} x_{hpi k} \geq u_{hk}, \quad k = 1, \dots, \bar{K}, \quad h = 1, \dots, \bar{H}; \quad (4.1.5)$$

(4.1.4) (4.1.5) Yukarıdaki iki kısıt birlikte çalışmaktadır. Birbirine paralel olarak konumlandırılmış montaj hatlarında hangi istasyonların açılması gerektiğini belirtmektedir. Diğer bir ifadeyle, açılan istasyonlara görev atamasına izin vermektedir.

$$u_{hk} + u_{(h+a)k} \leq 1, \quad k = 1, \dots, \bar{K}, \quad \bar{H} \geq 3, \quad h = 1, \dots, \bar{H} - 2, \quad a = 2, \dots, \bar{H} - h; \quad (4.1.6)$$

(4.1.6) Bir operatörün komşu olmayan istasyonlarda çalışmasını engellemektedir.

$$\sum_{h=1}^{\bar{H}} y_{hp} = 1, \quad p = 1, \dots, \bar{P}; \quad (4.1.7)$$

(4.1.7) Her ürünün sadece bir hatta atanmasını sağlamaktadır.

$$\sum_{p=1}^{\bar{P}} y_{hp} = 1, \quad h = 1, \dots, \bar{H}; \quad (4.1.8)$$

(4.1.8) Her hatta sadece bir ürünün montajının yapılması sağlanmaktadır.

$$\sum_{k=1}^{\bar{K}} x_{hpi k} \leq n_p \times y_{hp}, \quad i = 1, \dots, n_p, \quad p = 1, \dots, \bar{P}, \quad h = 1, \dots, \bar{H}; \quad (4.1.9)$$

(4.1.9) Her hatta sadece bir ürünün montajının yapılması sağlanmaktadır.

$$\sum_{k=1}^{\bar{K}} x_{hpk} \geq y_{hp}, \quad i = 1, \dots, n_p, \quad p = 1, \dots, \bar{P}, \quad h = 1, \dots, \bar{H}; \quad (4.1.10)$$

(4.1.10) Yukarıda verilen iki kısıt birlikte çalışmaktadır. Bu iki kısıt, her ürüne ait görevlerin, sadece o ürünün montajının gerçekleştirildiği hatta atanması sağlanmaktadır.

$$\sum_{h=1}^{\bar{H}} \sum_{k=1}^{\bar{K}} k \times x_{hprk} \leq \sum_{h=1}^{\bar{H}} \sum_{k=1}^{\bar{K}} k \times x_{hpsk}, \quad \forall (r, s) \in P_{hs}, \quad p = 1, \dots, \bar{P}; \quad (4.1.11)$$

(4.1.11) Bu kısıt, ürünlere ait olan görevlerin arasındaki öncelik ilişkilerinin ihlal edilmemesini sağlamaktadır.

$$x_{hpk}, u_{hk}, y_{hp} \in \{0,1\}, \quad i = 1, \dots, n_h, \quad k = 1, \dots, \bar{K}, \quad h = 1, \dots, \bar{H} \quad (4.1.12)$$

(4.1.12) Matematiksel modelde bulunan karar değişkenlerinin 0 veya 1 değerini almasını sağlamaktadır.

## 4.2. PMHD-ÜAP İçin İstasyon Odaklı Matematiksel Modeller

İstasyon odaklı matematiksel model için parametreler ve notasyonlar operatör odaklı matematiksel model ile aynıdır.

$z_{h(h+1)k}$ : 1, eğer  $h$  ve  $h+1$  hatlarının komşu olan  $k$  istasyonları arasında ortak işyeri kurulmuş ise; 0, aksi halde

$x_{hpk}$ : 1, eğer  $h$  hattında montajı yapılacak olan  $p$  ürününe ait  $i$  görevi  $k$  istasyonuna atanmış ise; 0, aksi halde

Yukarıdaki kısıtların tanımları sırasına göre aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır. Buna göre:

$$Enk.TZ = C \quad (4.2.1)$$

(4.2.1) Amaç fonksiyonu, çevrim süresinin enküçüklenmesidir.

$$\sum_{h=1}^{\bar{H}} \sum_{k=1}^{\bar{K}} x_{hpk} = 1, \quad i = 1, \dots, n_p, \quad p = 1, \dots, \bar{P}; \quad (4.2.2)$$

(4.2.2) Her ürüne ait görevlerin (operasyonların) her birinin sadece bir hatta bulunan bir istasyona atanmasını sağlamaktadır.

$$\sum_{p=1}^{\bar{p}} \sum_{i=1}^{n_p} t_{pi} \times x_{hpi k} + \sum_{p=1}^{\bar{p}} \sum_{i=1}^{n_p} t_{pi} \times x_{(h+1)pi k} \leq c + M(1 - Z_{h(h+1)k}), \quad k = 1, \dots, \bar{K}, \quad h = 1, \dots, \bar{H} - 1; \quad (4.2.3)$$

(4.2.3) Bu kısıt, paralel olarak konumlandırılmış hatların komşu olan istasyonlarında çalışan ortak bir operatör olduğunda, bu operatörün iş zamanının çevrim süresinin aşılmamasını sağlamaktadır.

$$\sum_{p=1}^{\bar{p}} \sum_{i=1}^{n_p} t_{pi} \times x_{hpi k} \leq c, \quad k = 1, \dots, \bar{K}, \quad h = 1, \dots, \bar{H}; \quad (4.2.4)$$

(4.2.4) Bir istasyonda çalışan bir operatörün toplam iş zamanının (istasyon zamanı) çevrim süresini aşmamasını sağlamaktadır.

$$\sum_{p=1}^{\bar{p}} \sum_{i=1}^{n_p} x_{hpi k} \leq n_{max} \times u_{hk}, \quad k = 1, \dots, \bar{K}, \quad h = 1, \dots, \bar{H}, \quad n_{max} = \max\{n_1, n_2, \dots, n_p\} \quad (4.2.5)$$

$$\sum_{p=1}^{\bar{p}} \sum_{i=1}^{n_p} x_{hpi k} \geq u_{hk}, \quad k = 1, \dots, \bar{K}, \quad h = 1, \dots, \bar{H}; \quad (4.2.6)$$

(4.2.5) (4.2.6) Yukarıdaki iki kısıt birlikte çalışmaktadır. Birbirine paralel olarak konumlandırılmış montaj hatlarında hangi istasyonların açılması gerektiğini belirtmektedir. Diğer bir ifadeyle, açılan istasyonlara görev atamasına izin vermektedir.

$$z_{h(h+1)k} + z_{(h+1)(h+2)k} \leq 1, \quad \bar{H} \geq 3, \quad h = 1, \dots, \bar{H} - 2, \quad k = 1, \dots, \bar{K} \quad (4.2.7)$$

(4.2.7) Bir operatörün komşu olmayan istasyonlarda çalışmasını engellemektedir.

$$\sum_{h=1}^{\bar{H}} y_{hp} = 1, \quad p = 1, \dots, \bar{P}; \quad (4.2.8)$$

(4.2.8) Her ürünün sadece bir hatta atanmasını sağlamaktadır.

$$\sum_{p=1}^{\bar{P}} y_{hp} = 1, \quad h = 1, \dots, \bar{H}; \quad (4.2.9)$$

(4.2.9) Her hatta sadece bir ürünün montajının yapılması sağlanmaktadır.

$$\sum_{k=1}^{\bar{K}} x_{hpi k} \leq n_p \times y_{hp}, \quad i = 1, \dots, n_p, \quad p = 1, \dots, \bar{P}, \quad h = 1, \dots, \bar{H}; \quad (4.2.10)$$



$$\sum_{k=1}^{\bar{K}} x_{hpk} \geq y_{hp}, \quad i = 1, \dots, n_p, \quad p = 1, \dots, \bar{P}, \quad h = 1, \dots, \bar{H}; \quad (4.2.11)$$

(4.2.10) (4.2.11) Yukarıda verilen iki kısıt birlikte çalışmaktadır. Bu iki kısıt, her ürüne ait görevlerin, sadece o ürünün montajının gerçekleştirildiği hatta atanması sağlanmaktadır.

$$\sum_{h=1}^{\bar{H}} \sum_{k=1}^{\bar{K}} k \times x_{hprk} \leq \sum_{h=1}^{\bar{H}} \sum_{k=1}^{\bar{K}} k \times x_{hpsk}, \quad \forall (r, s) \in P_{hs}, \quad p = 1, \dots, \bar{P}; \quad (4.2.12)$$

(4.2.12) Bu kısıt, ürünlere ait olan görevlerin arasındaki öncelik ilişkilerinin ihlal edilmemesini sağlamaktadır.

$$z_{h(h+1)k} \leq u_{hk}, \quad h = 1, \dots, \bar{H} - 1, \quad k = 1, \dots, \bar{K}; \quad (4.2.13)$$

$$z_{h(h+1)k} \leq u_{(h+1)k}, \quad h = 1, \dots, \bar{H} - 1, \quad k = 1, \dots, \bar{K}; \quad (4.2.14)$$

(4.2.13) (4.2.14) Bu iki kısıt birlikte çalışmaktadır. Bu kısıtlar, u ve z değişkenleri arasında bağlantıyı kurmaktadır. Paralel olarak konumlandırılmış hatların komşu iki istasyonunun açılması halinde, bu istasyonlarda ortak operatörün çalışmasına izin vermektedir.

$$\sum_{h=1}^{\bar{H}} \sum_{k=1}^{\bar{K}} u_{hk} + \sum_{h=1}^{\bar{H}-1} \sum_{k=1}^{\bar{K}} z_{h(h+1)k} = K; \quad (4.2.15)$$

(4.2.15) Tüm hatlarda açılan istasyonlarda çalışan operatör sayısını bir değere sabitlemektedir.

$$u_{hk} + u_{(h+1)k} \geq u_{h(k+1)}, \quad k = 1, \dots, \bar{K} - 1, \quad h = 1, \dots, \bar{H} - 1; \quad (4.2.16)$$

$$u_{hk} + u_{(h+1)k} \geq u_{(h+1)(k+1)}, \quad k = 1, \dots, \bar{K} - 1, \quad h = 1, \dots, \bar{H} - 1; \quad (4.2.17)$$

(4.2.16) (4.2.17) Bu iki kısıt grubu birlikte çalışarak, kendinden önceki istasyon açılmadan bir sonrakinin açılmasına izin vermemektedir. Diğer bir ifadeyle, hatların aralarında boş istasyonların oluşmasını engellemektedir.

$$x_{hpk}, z_{h(h+1)k}, u_{hk} \in \{0,1\}, \quad i = 1, \dots, n_p, \quad h = 1, \dots, \bar{H}, \quad k = 1, \dots, \bar{K}; \quad (4.2.18)$$

(4.2.18) Matematiksel modelde bulunan karar değişkenlerinin 0 veya 1 değerini almasını sağlamaktadır.

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tez konusu olan problem literatürde daha önceden çalışılmadığı için, deneysel çalışma yapılacak problem setleri bulunmamaktadır. Bu nedenle, hat dengeleme literatüründe çok iyi bilinen problem setleri kullanılarak, yeni kıyaslama problemleri üretilmiştir. PMHD-ÜAP'nin çözümü için önerilen matematiksel modellerin, bu kıyaslama problemleri üzerinde performans karşılaştırmaları yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılmış olan problemlerin isimleri aşağıda belirtilmiştir:

- Merten
- Jaeschke
- Jackson
- Roszieg
- Sawyer
- Kilbridge
- Hahn
- Tonge
- Wee-Mag
- Lutz2
- Lutz3
- Mukherje

Bu problemler boyutlarına göre küçük, orta veya büyük boyutlu problemler olarak sınıflandırılırlar. Bu boyut sınıflandırması ise görev sayılarına göre gerçekleştirilmiştir. Endüstri mühendisliği veritabanında kullanılabilen bu problemlerin görev sayıları aşağıdaki çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Çalışmada Kullanılan Problemler ve Görev Sayıları

<b>Problem Adı</b>	<b>Görev Sayısı</b>
<b>Merten</b>	6-7
<b>Jaeschke</b>	8-9
<b>Jackson</b>	10-11
<b>Roszieg</b>	24-25
<b>Sawyer</b>	28-30
<b>Kilbridge</b>	43-45
<b>Hahn</b>	51-53
<b>Tonge</b>	66-70
<b>Wee-Mag</b>	71-75
<b>Lutz2</b>	87-89
<b>Lutz3</b>	87-89
<b>Mukherje</b>	90-94

Bu çalışmada iki hatlı PMHD-ÜAP'den Merten, Jaeschke, Jackson, Roszieg, Sawyer, Kilbridge, Wee-Mag, Lutz2, Lutz3 ve Mukherje kullanılmıştır. İki hatlı problem setlerinde, tabloda görev sayıları görülen problem setlerinden Merten, Jaeschke, Jackson, Roszieg küçük boyutlu, Sawyer, Kilbridge, Wee-Mag orta boyutlu, Lutz2, Lutz3 ve Mukherje ise büyük boyutlu olarak belirlenmiştir. Üç hatlı problem setlerinde ise, Merten, Jaeschke, Jackson, Roszieg ve Sawyer küçük boyutlu olarak; Kilbridge, Hahn ve Tonge orta boyutlu olarak; Lutz2, Lutz3 ve Mukherje büyük boyutlu olarak belirlenmiştir. Wee-Mag ise hem orta boyutlu problemlerde hem büyük boyutlu problemlerde kullanılmıştır.

### 5.1. 2 Ürünlü Deneysel Çalışmalar Ve Sonuçları

İki hatlı PMHD-ÜAP setlerinin üretilmesinde Merten, Jaeschke, Jackson, Roszieg, Sawyer, Kilbridge, Wee-Mag, Lutz2, Lutz3 ve Mukherje kullanılmıştır. Önerilen matematiksel modeller için CPLEX programından destek alınmıştır. Deneysel çalışmalar, 8 çekirdekli ve 1GB RAM özelliklerine sahip bilgisayarda 21600 saniye süre sınırı verilerek yapılmıştır.

İki hatlı PMHD-ÜAP'lerinden 72 set üretilmiştir. Problem setleri, küçük boyutlu problemler küçük boyutlu problemlerle, orta boyutlu problemler orta boyutlu problemlerle

ve büyük boyutlu problemler büyük boyutlu problemlerle eşleştirilerek oluşturulmuştur. Bu problem setleri üzerinde, önerilen operatör odaklı ve istasyon odaklı matematiksel modellerin performansları karşılaştırılmıştır. Elde edilen çözümlerin özeti çizelge 2’de verilmiştir. Çözümlerin ayrıntıları ise çizelge 3’te gösterilmiştir.

Çizelge 2. 2 Hatlı PMHD-ÜAP İçin Çözümlerin Karşılaştırılması

	<i>Problem Sayısı (Adet)</i>	<i>Çözüm Sayısı (Adet)</i>	<i>Ortalama Çözüm Süresi (s)</i>
<i>Operatör Odaklı</i>	72	67	157,216
<i>İstasyon Odaklı</i>	72	60	137,96

Çözdürülmüş olan bu problemlerde çözümlerde görülen amaç fonksiyonu, hem operatör odaklı çözümler için hem de istasyon odaklı çözümler için aynı olmalıdır. Bu çalışmada çözdürülmüş olan problemlerin çözümlerindeki amaç fonksiyonları birbirleriyle aynı çıkmıştır.

Çizelge 2’ye göre, 72 adet iki hatlı PMHD-ÜAP’den operatör odaklı olarak 67 adet çözülmüş olup ortalama çözüm süresi 157,216 saniye olarak belirtilmiştir. Yine 72 adet iki hatlı PMHD-ÜAP istasyon odaklı olarak 60 adet çözülmüştür ve ortalama çözüm süresi 137,96 saniye olarak belirtilmiştir. İstasyon odaklı çözüm yöntemi, problemleri, ortalama daha kısa sürede çözmüş görünmektedir. Fakat bunun sebebi, 54. set olan problem istasyon odaklı olarak çözülemezken operatör odaklı olarak çözülebilmektedir (Çizelge 3). Operatör odaklı 54. set olan problemin çözümü tam 6981,26 saniye sürmüştür. Yani bir nevi, operatör odaklı olan 54. set olan problemin çözümü 6981,26 saniye boyunca sürdüğü için ortalama süresi istasyon odaklı çözümlere göre daha yüksek çıkmıştır. İki hatlı olarak operatör odaklı olarak çözdürülmüş 67 adet problemin toplam çözüm süresi toplam 10533,45 saniye sürmüştür. İki hatlı istasyon odaklı olarak çözdürülmüş 60 adet problemin çözüm süresi ise toplam 8277,62 saniye sürmüştür.

İki hatlı problemlere ait tüm çözümler Çizelge 3’te gösterilmiştir. Çizelge 3’te verilen çözümlere göre, birinci sütunda problem setinin numarası belirtilmiştir. İkinci sütun ve üçüncü sütunda, problem setleri oluşturulurken kullanılmış kıyaslama problemlerinin isimleri sırasıyla gösterilmiştir. Dördüncü ve beşinci sütunlarda, kıyaslama problemlerinin kaç görevden meydana geldiği sırasıyla gösterilmiştir. Altıncı sütun, çözüm için problem

setlerinde belirlenmiş olan istasyon sayısını belirtmektedir. Yedinci ve dokuzuncu sütun problem setlerinin çözümüyle bulunan amaç fonksiyonlarını gösterirken, sekizinci ve onuncu sütun, problem setlerinin elde edilen çözüm sürelerini göstermektedir.

Çizelge 3. 2 Hatlı PMHD-ÜAP İçin Problem Setlerinin Çözümleri

SET	1.ÜRÜN	2.ÜRÜN	1.ÜRÜNÜN GÖREV SAYISI	2.ÜRÜNÜN GÖREV SAYISI	BELİRLENEN İSTASYON SAYISI	MINC-OPERATÖR		MINC-İSTASYON	
						Amaç Fonksiyonu	Çözüm Süresi	Amaç Fonksiyonu	Çözüm Süresi
SET-1	MERTEN	JAESCHKE	7	9	7	10	0,23	10	1,83
SET-2	MERTEN	JACKSON	7	11	7	11	0,22	11	10,84
SET-3	MERTEN	ROSZIEG	7	25	9	18	0,31	18	26,92
SET-4	JAESCHKE	JACKSON	9	11	8	11	0,25	11	18,98
SET-5	JAESCHKE	ROSZIEG	9	25	9	19	0,45	19	43,7
SET-6	JACKSON	ROSZIEG	11	25	9	20	0,95	20	92,48
SET-7	MERTEN	JAESCHKE	6	8	6	10	0,17	10	1,03
SET-8	MERTEN	JACKSON	6	10	6	11	0,16	11	0,31
SET-9	MERTEN	ROSZIEG	6	24	6	25	0,23	25	2,91
SET-10	JAESCHKE	JACKSON	8	10	7	11	0,17	11	12,61
SET-11	JAESCHKE	ROSZIEG	8	24	9	17	0,45	17	20,78
SET-12	JACKSON	ROSZIEG	10	24	9	19	0,5	19	86,08
SET-13	MERTEN	JAESCHKE	7	9	7	10	0,17	10	1,87
SET-14	MERTEN	JACKSON	7	11	7	11	0,22	11	11,66
SET-15	MERTEN	ROSZIEG	7	25	8	20	0,36	20	17,77
SET-16	JAESCHKE	JACKSON	9	11	8	11	0,25	11	19,86
SET-17	JAESCHKE	ROSZIEG	9	25	8	21	0,31	21	14,72
SET-18	JACKSON	ROSZIEG	11	25	9	20	0,98	20	92,63
SET-19	MERTEN	JAESCHKE	6	8	6	10	0,17	10	1,06
SET-20	MERTEN	JACKSON	6	10	6	11	0,14	11	1,31
SET-21	MERTEN	ROSZIEG	6	24	7	21	0,27	21	2,14
SET-22	JAESCHKE	JACKSON	8	10	7	11	0,19	11	12,63
SET-23	JAESCHKE	ROSZIEG	8	24	7	22	0,27	22	15,41
SET-24	JACKSON	ROSZIEG	10	24	8	21	0,34	21	44,55
SET-25	MERTEN	JAESCHKE	7	9	7	10	0,17	10	1,84

SET	1.ÜRÜN	2.ÜRÜN	1.ÜRÜNÜN GÖREV SAYISI	2.ÜRÜNÜN GÖREV SAYISI	BELİRLENEN İSTASYON SAYISI	MINC-OPERATÖR		MINC-İSTASYON	
						Çözüm Süresi	Amaç Fonksiyonu	Amaç Fonksiyonu	Çözüm Süresi
SET-26	MERTEN	JACKSON	7	11	7	11	0,22	11	10,95
SET-27	JAESCHKE	ROSZIEG	9	25	8	21	0,31	21	14,39
SET-28	JACKSON	ROSZIEG	11	25	10	18	0,39	18	591,39
SET-29	MERTEN	ROSZIEG	7	25	7	22	0,31	22	10,33
SET-30	JAESCHKE	JACKSON	9	11	8	11	0,25	11	19,19
SET-31	MERTEN	JAESCHKE	6	8	6	10	0,17	10	1,03
SET-32	MERTEN	JACKSON	6	10	6	11	0,16	11	1,3
SET-33	MERTEN	ROSZIEG	6	24	7	21	0,3	21	2,16
SET-34	JAESCHKE	JACKSON	8	10	7	11	0,19	11	12,7
SET-35	JAESCHKE	ROSZIEG	8	24	8	20	0,33	20	11,33
SET-36	JACKSON	ROSZIEG	10	24	10	17	0,77	17	638,47
SET-37	SAWYER	KILBRIDGE	30	45	24	55	2,69	55	5,19
SET-38	SAWYER	WEEMAG	30	75	29		Çözülemedi		Çözülemedi
SET-39	KILBRIDGE	WEEMAG	45	75	25	83	30,19		Çözülemedi
SET-40	SAWYER	KILBRIDGE	28	43	29	55	2,44	55	4,97
SET-41	SAWYER	WEEMAG	28	71	29	63	129,45		Çözülemedi
SET-42	KILBRIDGE	WEEMAG	43	71	25	80	30,22		Çözülemedi
SET-43	SAWYER	KILBRIDGE	30	45	19	55	1,36	55	6,03
SET-44	SAWYER	WEEMAG	30	75	28	66	72,06		Çözülemedi
SET-45	KILBRIDGE	WEEMAG	45	75	23	90	38,36		Çözülemedi
SET-46	SAWYER	KILBRIDGE	28	43	19	55	1,78	55	1,22
SET-47	SAWYER	WEEMAG	28	71	41		Çözülemedi		Çözülemedi
SET-48	KILBRIDGE	WEEMAG	43	71	36		Çözülemedi		Çözülemedi
SET-49	SAWYER	KILBRIDGE	30	45	17	55	1,53	55	4,09
SET-50	SAWYER	WEEMAG	30	75	40	46	1754,44		Çözülemedi

SET	1.ÜRÜN	2.ÜRÜN	1.ÜRÜNÜN GÖREV SAYISI	2.ÜRÜNÜN GÖREV SAYISI	BELİRLENEN İSTASYON SAYISI	MINC-OPERATÖR		MINC-İSTASYON	
						Amaç Fonksiyonu	Çözüm Süresi	Amaç Fonksiyonu	Çözüm Süresi
SET-51	KILBRIDGE	WEEMAG	45	75	35	Çözülemedi	Çözülemedi	55	1,95
SET-52	SAWYER	KILBRIDGE	28	43	17	55	1,17	55	1,95
SET-53	SAWYER	WEEMAG	28	71	40	Çözülemedi	Çözülemedi	55	1,95
SET-54	KILBRIDGE	WEEMAG	43	71	35	57	6981,26	74	394,56
SET-55	LUTZ2	LUTZ3	89	89	57	74	108,36	74	394,56
SET-56	LUTZ2	MUKHERJE	89	94	59	171	156,5	171	257,19
SET-57	LUTZ3	MUKHERJE	89	94	46	171	27,39	171	860,86
SET-58	LUTZ2	LUTZ3	87	87	57	74	89,19	74	381,17
SET-59	LUTZ2	MUKHERJE	87	90	59	171	53,08	171	159,13
SET-60	LUTZ3	MUKHERJE	87	90	46	171	43,47	171	96,67
SET-61	LUTZ2	LUTZ3	89	89	55	74	78,86	74	429,69
SET-62	LUTZ2	MUKHERJE	89	94	57	171	72,58	171	81,44
SET-63	LUTZ3	MUKHERJE	89	94	44	171	47,78	171	166,06
SET-64	LUTZ2	LUTZ3	87	87	55	74	114,47	74	264,33
SET-65	LUTZ2	MUKHERJE	87	90	57	171	51,66	171	309,56
SET-66	LUTZ3	MUKHERJE	87	90	44	171	59,63	171	83,31
SET-67	LUTZ2	LUTZ3	89	89	53	74	43,91	74	240,61
SET-68	LUTZ2	MUKHERJE	89	94	56	171	102,27	171	170,01
SET-69	LUTZ3	MUKHERJE	89	94	43	171	137,13	171	960,41
SET-70	LUTZ2	LUTZ3	87	87	53	74	144,77	74	259,73
SET-71	LUTZ2	MUKHERJE	87	90	56	171	126,45	171	1199,25
SET-72	LUTZ3	MUKHERJE	87	90	43	171	17,67	171	71,03



### 5.2.3 Ürünlü Deneysel Çalışmalar Ve Sonuçları

Üç hatlı problem setlerinin üretilmesinde, Merten, Jaeschke, Jackson, Roszieg, Sawyer, Kilbridge, Hahn, Tonge, Wee-Mag, Lutz2, Lutz3 ve Mukherje kullanılmıştır. Önerilen matematiksel modeller için CPLEX programından destek alınmıştır. CPLEX programında deneysel çalışmalar çözdürülürken, iki hatlı problem setlerinde girilen değerler girilmiştir.

Üç hatlı PMHD-ÜAP'lerinden 36 set üretilmiştir. Problem setleri, küçük boyutlu problemler küçük boyutlu problemlerle, orta boyutlu problemler orta boyutlu problemlerle ve büyük boyutlu problemler büyük boyutlu problemlerle eşleştirilerek oluşturulmuştur. Bu problem setleri üzerinde, önerilen operatör odaklı ve istasyon odaklı matematiksel modellerin performansları karşılaştırılmıştır. Elde edilen çözümlerin özeti çizelge 4'te gösterilmiştir. Ayrıntılı çözümler ise çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 4. 3 Hatlı PMHD-ÜAP İçin Çözümlerin Karşılaştırılması

	<i>Problem Sayısı (Adet)</i>	<i>Çözüm Sayısı (Adet)</i>	<i>Ortalama Çözüm Süresi (s)</i>
<i>Operatör Odaklı</i>	36	36	289,223
<i>İstasyon Odaklı</i>	36	31	2853,225

Çizelge 4'e göre, 36 adet 3 hatlı PMHD-ÜAP'den operatör odaklı olarak 36 adet, istasyon odaklı olarak 31 adet çözdürülmüştür. Problemler çözdürülürken amaç fonksiyonları çevrim sürelerinin en küçüklenmesidir. Problemler çözüldükten sonra amaç fonksiyonları için hem operatör odaklı hem de istasyon odaklı çözümlerde aynı sonuçlar elde edilmiştir. Çözdürülen problemlerden operatör odaklı olanların çözüm süresi ortalama 289,223 saniyedir. İstasyon odaklı olarak çözdürülen problemlerin ise çözüm süresi ortalama 2853,225 saniyedir. Operatör odaklı matematiksel modelde çözdürülen problemlerden çözüm süresi toplamı 10412,02 saniyeyken, istasyon odaklı olarak çözdürülen problemlerden çözüm süresi toplamı 88449,97 saniyedir.

Üç hatlı problemlere ait tüm çözümler Çizelge 5'te gösterilmiştir. Çizelge 5'te verilen çözümlere göre, birinci sütunda problem setinin numarası belirtilmiştir. İkinci sütun, üçüncü sütun ve dördüncü sütunda, problem setleri oluşturulurken kullanılmış kıyaslama

problemlerinin isimleri sırasıyla gösterilmiştir. Beşinci, altıncı ve yedinci sütunlarda, kıyaslama problemlerinin kaç görevden meydana geldiği sırasıyla gösterilmiştir. Sekizinci sütun, çözüm için problem setlerinde belirlenmiş olan istasyon sayısını belirtmektedir. Dokuzuncu ve onbirinci sütun problem setlerinin çözümüyle bulunan amaç fonksiyonlarını gösterirken, onuncu ve onikinci sütun, problem setlerinin elde edilen çözüm sürelerini göstermektedir.

Çizelge 5. 3 Hatlı PMHD –ÜAP İçin Problem Setlerinin Çözümleri

SET	1.ÜRÜN	2.ÜRÜN	3.ÜRÜN	1.ÜRÜNÜN GÖREV SAYISI2.ÜRÜNÜN GÖREV SAYISI3.ÜRÜNÜN GÖREV SAYISIBELİRLENEN İSTASYON SAYISI			MINC-OPERATÖR		MINC-İSTASYON		
				Amaç Fonksiyonu	Çözüm Süresi	Amaç Fonksiyonu	Çözüm Süresi	Amaç Fonksiyonu	Çözüm Süresi		
SET-1	JAESCHKE	ROSZIEG	SAWYER	9	25	30	19	30	1,17	30	4,53
SET-2	JACKSON	ROSZIEG	SAWYER	11	25	30	19	30	1,2	30	11
SET-3	MERTEN	JAESCHKE	ROSZIEG	7	9	25	15	13	2,03	13	15,69
SET-4	MERTEN	ROSZIEG	SAWYER	6	24	28	19	25	4,45	25	39,41
SET-5	JAESCHKE	JACKSON	ROSZIEG	8	10	24	17	13	0,47	13	9,11
SET-6	JAESCHKE	ROSZIEG	SAWYER	8	24	28	19	25	4,03	25	52,17
SET-7	JACKSON	ROSZIEG	SAWYER	10	24	28	19	25	11,83	25	82,06
SET-8	MERTEN	JAESCHKE	SAWYER	6	8	28	15	25	2,17	25	10,77
SET-9	MERTEN	ROSZIEG	SAWYER	6	24	28	21	25	2,69	25	29,56
SET-10	MERTEN	JAESCHKE	ROSZIEG	7	9	25	15	13	2,05	13	15,61
SET-11	MERTEN	JAESCHKE	ROSZIEG	6	8	24	9	20	0,86	20	2692,38
SET-12	KILBRIDGE	HAHN	TONGE	45	53	70	40	1775	47,31	1775	328,05
SET-13	KILBRIDGE	TONGE	WEE-MAG	45	70	75	80	156	322,78	156	1206,48
SET-14	HAHN	TONGE	WEE-MAG	53	70	75	88	1775	543,44	1775	2958,22
SET-15	KILBRIDGE	HAHN	WEE-MAG	45	53	75	76	1775	186,05	1775	1503,09
SET-16	KILBRIDGE	HAHN	TONGE	43	51	66	40	1775	53,72	1775	127,42
SET-17	KILBRIDGE	TONGE	WEE-MAG	43	66	71	90	156	189,05	156	6131,03
SET-18	HAHN	TONGE	WEE-MAG	51	66	71	88	1775	235,5	1775	1666,02
SET-19	KILBRIDGE	HAHN	WEE-MAG	43	51	71	43	1775	45,09	1775	299,16
SET-20	KILBRIDGE	HAHN	TONGE	43	51	66	35	1775	62,81	1775	178,63
SET-21	KILBRIDGE	TONGE	WEE-MAG	43	66	71	87	156	522,91	156	8423,83
SET-22	HAHN	TONGE	WEE-MAG	51	66	71	75	1775	177,38	1775	1013,84
SET-23	KILBRIDGE	HAHN	WEE-MAG	43	51	71	71	1775	94,38	1775	3789,84
SET-24	KILBRIDGE	HAHN	TONGE	43	51	66	35	1775	62,58	1775	173
SET-25	KILBRIDGE	TONGE	WEE-MAG	43	66	71	85	156	547,84	156	15639,94
SET-26	HAHN	TONGE	WEE-MAG	51	66	71	85	1775	228,7	1775	5828,58
SET-27	LUTZ2	LUTZ3	MUKHERIE	89	89	94	81	171	657,14	171	9117,97
SET-28	WEE-MAG	LUTZ2	LUTZ3	71	87	87	94	74	1612,7	74	ÇÖZÜLEMEDİ
SET-29	WEE-MAG	LUTZ2	MUKHERIE	71	87	90	96	171	695,47	171	ÇÖZÜLEMEDİ
SET-30	LUTZ2	LUTZ3	MUKHERIE	87	87	90	81	171	186,7	171	ÇÖZÜLEMEDİ
SET-31	LUTZ2	LUTZ3	MUKHERIE	89	89	94	79	171	1447,09	171	5411,13
SET-32	LUTZ2	LUTZ3	MUKHERIE	87	87	90	79	171	838,56	171	ÇÖZÜLEMEDİ
SET-33	LUTZ2	LUTZ3	MUKHERIE	89	89	94	76	171	501,17	171	3955,17
SET-34	LUTZ2	LUTZ3	MUKHERIE	87	87	90	76	171	254,78	171	ÇÖZÜLEMEDİ
SET-35	LUTZ2	LUTZ3	MUKHERIE	89	89	94	73	171	515,92	171	6724,72
SET-36	LUTZ2	LUTZ3	MUKHERIE	87	87	90	73	171	350	171	11011,56

## 6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, PMHD-ÜAP ele alınmıştır. PMHDP-ÜAP'nin çözümü için, operatör odaklı ve istasyon odaklı matematiksel modeller geliştirilmiştir. Önerilen matematiksel modellerin, yeni üretilen kıyaslama problemleri kullanılarak performansları karşılaştırılmıştır. Performans karşılaştırmaları, ortalama çözüm süreleri ve elde edilen optimal çözüm sayısı üzerinden yapılmıştır.

İki hatlı problem setlerinin çözümüne göre, operatör odaklı matematiksel model 72 adet problem setinden 67 tanesini ortalama 157,216 saniyede çözebilirken, istasyon odaklı matematiksel model 72 adet problem setinden 60 tanesini 137,96 saniyede çözebilmiştir. Üç hatlı problem setlerinin çözümüne göre, operatör odaklı matematiksel model 36 adet problem setinden 36 tanesini ortalama 289,223 saniyede çözebilirken, istasyon odaklı matematiksel model 36 adet problem setinden 31 tanesini 2853,225 saniyede çözebilmiştir. İki hatlı problem setlerinde istasyon odaklı matematiksel model süre olarak daha iyi görünse dahi adet açısından operatör odaklı matematiksel modele nazaran daha geride kalmıştır. Operatör odaklı matematiksel modelin ortalama çözüm süresinin istasyon odaklı matematiksel modelin ortalama çözüm süresine göre daha uzun sürmesinin sebebi, istasyon odaklı matematiksel modelin çözemediği bir problemi, uzun sürede de olsa çözebilmiş olmasıdır. Dolayısıyla, operatör odaklı matematiksel model hem ortalama çözüm süresi hem de elde edilen çözüm adedi açısından istasyon odaklı matematiksel modele göre daha etkin görünmektedir.

Bu tez kapsamında, PMHD-ÜAP için önerilen matematiksel modeller, üretilen problemlerin en iyi çözümlerini elde edebilmiş olsa da, daha büyük boyutlu problemler için sezgisel algoritmalar geliştirilebilir. Bu çalışmada, PMHDÜAP'nin Tip-2 türü çalışılmış olup, Tip-1 türü ilerleyen çalışmalarda ele alınabilir.

## 7. KAYNAKLAR

- [1] G. A. Suer, "Designing Parallel Assembly Lines" *Computers & Industrial Engineering*, vol. 35, pp. 467-470, 1998.
- [2] N. Boysen, M. Fliedner, A. Scholl, "A Classification Of Assembly Line Balancing Problems" *European Journal Of Operational Research*, vol. 183(2007), pp. 674-693, 2006.
- [3] B. Rekiek, A. Delchambre, A. Dolgui, A. Bratcu, "Assembly Line Design: A Survey" *15<sup>th</sup> Triennial World Congress On International Federation Of Automatic Control*, pp. 155-166, Barcelona, Spain, 2002.
- [4] T. Derya, "Maliyet Tabanlı Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemleri: Yeni Modeller" PhD. Thesis, Dept. Industrial Eng., Gazi Univ., Ankara, Turkey, 2012.
- [5] H. Cercioglu, U. Ozcan, H. Gokcen, B. Toklu, "Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemleri İçin Bir Tavlama Benzetimi Yaklaşımı" *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 24(2), pp. 331-341, 2009.
- [6] N. Ismail, G. R. Esmailian, M. Hamed, S. Sulaiman, "Balancing Of Parallel Assembly Lines With Mixed-Model Product" *International Proceedings Of Economics Development And Research*, vol. 6(2011), pp. 120-124, 2011.
- [7] H. Gokcen, K. Agpak, R. Benzer, "Balancing Of Parallel Assembly Lines" *International Journal Of Production Economics*, vol. 103(2006), pp. 600-609, 2005.
- [8] G. Selbeş, "Paralel Montaj Hattı Dengeleme ve İşçi Atama Problemi İçin Yeni Matematiksel Modeller" M.S. Thesis, Dept. Industrial Eng., Baskent Univ., Ankara, Turkey, 2019.
- [9] O. Kilincci "Simple Assembly Line Balancing Problem: A Petri Net Approach" PhD. Thesis, Dept. Industrial Eng., Dokuz Eylul Univ., Izmir, Turkey, 2003.

- [10] A. Doğan, “Savunma Sanayiinde Bulanık İşlem Zamanlı Geleneksel Montaj Hattı Dengeleme Çalışması” M.S. Thesis, Dept. Industrial Eng., Kirikkale Univ., Kirikkale, Turkey, 2015.
- [11] B. Muzoglu, “Paralel Karışık Modelli Montaj Hattı Dengeleme Problemi Ve Bir İşletmede Uygulaması” M.S. Thesis, Dept. Industrial Eng., Gazi Univ., Ankara, Turkey, 2014.
- [12] S. Ghosh, R. J. Gagnon, “A Comprehensive Literature Review And Analysis Of The Design, Balancing And Scheduling Of Assembly Systems” *International Journal Of Production Research*, vol. 27(4), pp. 637-670, 1989.
- [13] M. Uzmen, “Montaj Hattı Dengeleme” M.S. Thesis, Dept. Industrial Eng., Istanbul Technical Univ., İstanbul, Turkey, 1990.
- [14] S. J. Hu, J. Ko, L. Weyand, H. A. ElMaraghy, T. K. Lien, Y. Koren, H. Bley, G. Chryssolouris, N. Nasr, M. Shpitalni, “Assembly System Design And Operations For Product Variety” *CIRP Annals- Manufacturing Technology*, vol. 60(2011), pp. 715-733, 2011.
- [15] W. Grzechca, “Assembly Line Balancing Problem With Reduced Number Of Workstations” *Proceedings Of The 19<sup>th</sup> World Congress The International Federation Of Automatic Control*, pp. 6180-6185, Cape Town, South Africa, 2014.
- [16] Y. Kara, Y. Atasagun, “Assembly Line Balancing With Resource Dependent Task Times: An Application To Parallel Assembly Lines” *7<sup>th</sup> International Federation Of Automatic Control Conference On Manufacturing Modelling, Management And Control*, pp. 845-850, Saint Petersburg, Russia, 2013.
- [17] H. Gokcen, K. Agpak, R. Benzer, “Balancing Of Parallel Assembly Lines” *International Journal Of Production Economics*, vol. 103(2006), pp. 600-609, 2005.
- [18] U. Ozcan, B. Toklu, “Balancing Of Mixed –Model Two-Sided Assembly Lines” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 57(2009), pp. 217-227, 2008.

- [19] T. Kellegoz, "Paralel Çok İşçili Montaj Hattı Dengeleme Problemleri İçin Yeni Çözüm Yaklaşımları" PhD. Thesis, Dept. Industrial Eng., Gazi Univ., Ankara, Turkey, 2011.
- [20] Z. A. Cil, S. Mete, E. Ozceylan, K. Agpak, "A Beam Search Approach For Solving Type II Robotic Parallel Assembly Line Balancing Problem" *Applied Soft Computing*, vol. 61, pp. 129-138, 2017.
- [21] P. Tapkan, L. Ozbakir, A. Baykasoglu, "Bee Algorithms For Parallel Two-Sided Assembly Line Balancing Problem With Walking Times" *Applied Soft Computing*, vol. 39, pp. 275-291, 2016.
- [22] I. Kucukkoc, D. Z. Zhang, "Mixed-Model Parallel Two-Sided Assembly Line Balancing Problem: A Flexible Agent-Based Ant Colony Optimization Approach" *Computers & Industrial Engineering*, vol. 97, pp. 58-72, 2016.
- [23] I. Kucukkoc, D. Z. Zhang, "Type-E Parallel Two-Sided Assembly Line Balancing Problem: Mathematical Model And Ant Colony Optimisation Based Approach With Optimised Parameters" *Computers & Industrial Engineering*, vol. 84, pp. 56-69, 2015.
- [24] L. Ozbakir, A. Baykasoglu, B. Gorkemli, L. Gorkemli, "Multiple-Colony Ant Algorithm For Parallel Assembly Line Balancing Problem" *Applied Soft Computing*, vol. 11(3), pp. 3186-3198, 2011.
- [25] H. Aguilar, A. Garcia-Villoria, R. Pastor, "A Survey Of The Parallel Assembly Lines Balancing Problem" *Computers & Operations Research*, vol. 124, 2020.
- [26] U. Ozcan, "Balancing Stochastic Parallel Assembly Lines" *Computers & Operations Research*, vol. 99, pp. 109-122, 2018.
- [27] E. Kaymaz, "Montaj Hattı Dengelemede Yeniden İşleme İstasyonlarının Paralel Görevler İçin Kullanılması ve Bir Uygulama" M.S. Thesis, Dept. Industrial Eng., Uludag Univ., Bursa, Turkey, 2017.

- [28] E. Ucar, "Mixed-Model Two-Sided Assembly Line Balancing" M.S. Thesis, Dept. Industrial Eng., Middle East Technical Univ., Ankara, Turkey, 2010.
- [29] A. Ispir, "Montaj Hattı Dengeleme Algoritmalarının Karşılaştırılması" M.S. Thesis, Dept. Industrial Eng., Cukurova Univ., Adana, Turkey, 1999.
- [30] H. Gokcen, "Tek Model Montaj Hattı Dengeleme Metotları Ve Bir Uygulama" M.S. Thesis, Dept. Industrial Eng., Gazi Univ., Ankara, Turkey, 1989.
- [31] Y. Kuvvetli, "Karma Modelli Montaj Hattı Dengeleme Ve İşgücü Atama Problemi İçin Yeni Bir Yaklaşım" M.S. Thesis, Dept. Industrial Eng., Cukurova Univ., Adana, Turkey, 2010.
- [32] V. Raj, J. Mathew, P. Jose, G. Sivan, "Optimization Of Cycle Time In An Assembly Line Balancing Problem" *Global Colloquium in Recent Advancement and Effectual Researches in Engineering, Science and Technology*, vol. 25(2016), pp. 1146-1153, 2016.
- [33] C. Ozturk, S. Tunali, B. Hnich, A. Ornek, "Cyclic Scheduling Of Flexible Mixed Model Assembly Lines With Parallel Stations" *Journal Of Manufacturing Systems*, vol. 36(2015), pp. 147-158, 2014.
- [34] E. Falkenauer, "Real-world Line Balancing of Very Large Products" *7<sup>th</sup> International Federation Of Automatic Control Conference On Manufacturing Modelling, Management And Control*, pp. 1732-1737, Saint Petersburg, Russia, 2013.
- [35] A. Dolgui, J.M. Proth, "Assembly Line Balancing: Conventional Methods And Extensions" *7<sup>th</sup> International Federation Of Automatic Control Conference On Manufacturing Modelling, Management And Control*, pp. 43-48, Saint Petersburg, Russia, 2013.
- [36] H. D. Purnomo, H.M. Wee, H. Rau, "Two-Sided Assembly Lines Balancing With Assignment Restrictions" *Mathematical And Computer Modelling*, vol. 57(2013), pp. 189-199, 2011.



- [37] N. Boysen, S. Bock, "Scheduling Just-In-Time Part Supply For Mixed-Model Assembly Lines" *European Journal Of Operational Research*, vol. 211(2011), pp. 15-25, 2011.
- [38] G. Nicosia, D. Pacciarelli, A. Pacifici, "Optimally Balancing Assembly Lines With Different Workstations" *Discrete Applied Mathematics*, vol. 118(2002), pp. 99-113, 2001.
- [39] H. Gokcen, E. Erel, "Binary Integer Formulation For Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem" *Computers & Industrial Engineering*, vol. 34, pp. 451-461, 1998.
- [40] H. Gokcen, "Karışık Modelli Deterministik Montaj Hattı Dengeleme Problemleri İçin Yeni Modeller" PhD. Thesis, Dept. Industrial Engineering, Gazi Univ., Ankara, Turkey, 1994.
- [41] F. S. Madenoglu, "Çift Taraflı Montaj Hattı Dengeleme Problemine Yeni Bir Çözüm Yaklaşımı" M.S. Thesis, Dept. Industrial Eng., Erciyes Univ., Kayseri, Turkey, 2009.
- [42] Y. Ege, M. Azizoglu, N. E. Ozdemirel, "Assembly Line Balancing With Station Paralleling" *Computers & Industrial Engineering*, vol. 57(2009), pp. 1218-1225, 2009.