



T.C.

ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MONTAJ HATTI Dengeleme Problemlerinde Çevrim Süresinin
Minimizasyonu İçin Yeni Yaklaşımlar: Paralel Görev Atama
ve Paralel İstasyon Oluşturma**

Hakan ALTUNAY

Prof. Dr. H. Cenk ÖZMUTLU

(Danışman)

DOKTORA TEZİ

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2017

Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Hakan ALTUNAY tarafından hazırlanan “Montaj Hattı Dengeleme Problemleri için Yeni Bir Yaklaşım: Paralel İstasyon Oluşturma” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. H. Cenk ÖZMUTLU

Başkan: Prof. Dr. H. Cenk ÖZMUTLU
Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi,
Yöneylem Araştırması Anabilim Dalı

İmza


Üye: Prof. Dr. Aydın SİPAHİOĞLU
Osmangazi Üniversitesi,
Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi,
Yöneylem Araştırması Anabilim Dalı

İmza



Üye: Doç. Dr. Fatih ÇAVDUR
Uludağ Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi,
Yöneylem Araştırması Anabilim Dalı

İmza



Üye: Yrd. Doç. Dr. Mehmet AKANSEL
Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi,
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



Üye: Yrd. Doç. Dr. Koray ALTUN
Bursa Teknik Üniversitesi,
Doğa Bilimleri, Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi,
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım


Prof. Dr. Ali BAYRAM

Enstitü Müdürü

22.12.2012 (Tarih)

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

/ /2017

İmza

Hakan ALTUNAY

ÖZET

Doktora Tezi

MONTAJ HATTI Dengeleme Problemlerinde Çevrim Süresinin Minimizasyonu İçin Yeni Yaklaşımlar: Paralel Görev Atama ve Paralel İstasyon Oluşturma

Hakan ALTUNAY

Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. H. Cenk ÖZMUTLU

Bu tez çalışmasında, montaj hattı dengeleme literatüründe henüz çok yeni teknikler olan paralel görev atama ve paralel istasyon oluşturma yaklaşımlarından yararlanılmıştır. Paralel görev atama yaklaşımı gereği, işlerin (görevlerin) bölünemezliği varsayımı korunarak, bazı görevlerin birden fazla istasyona atanabilmesine izin verilmektedir. Paralel istasyon oluşturma yaklaşımında ise birbirleri ile aynı ekipman ve donanıma sahip eş istasyonların, üretim hattının herhangi bir aşamasında birden fazla sayıda yer alabilmesine imkân tanınmaktadır. Bu yaklaşımlar, özellikle işlem süresi çevrim süresinden büyük görevlerin bulunduğu veya görev süreleri arasındaki farkın çok yüksek olduğu montaj hatlarında, çevrim süresinin düşürülerek üretim oranlarının istenilen seviyelere çıkarılmasında en etkili yöntemler arasındadır. Bununla birlikte, bu yaklaşımların; mevcut işgücü ve sürenin verimli kullanılması, atıl sürelerin minimize edilmesi, müşteri taleplerindeki dalgalanmalara ve üretim ortamında meydana gelebilecek olası aksaklıklara karşı zamanında önlem alınabilmesi gibi birçok avantajı mevcuttur.

Bu çalışmanın amacı, paralel görev atama ve paralel istasyon oluşturma yaklaşımlarından yararlanılarak geliştirilen matematiksel programlama modellerinin ve paralel istasyon oluşturma yaklaşımını temel alan sezgisel bir yöntemin, montaj hattı dengeleme problemlerinde uygulanabilirliğini göstermek ve bu yöntemlerin literatüre kazandırılmasını sağlamaktır. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde, önerilen sezgisel yöntem ve matematiksel modellere yönelik açıklamalara ayrıntılı olarak değinilmiştir. Bu çalışma kapsamında önerilen sınırlandırılmamış özellikteki modellerin montaj hattı felsefesine aykırı sonuçlar ürettiği belirlenmiştir. Bu sebeple, önerilen modellere ek olarak, görevler arası geçiş süreleri ve açılan her bir paralel istasyon için söz konusu olan ceza katsayısı değerlerini de içeren yeni matematiksel modellerin geliştirilmesi sağlanmıştır. Çalışmanın son aşamasında ise yapılan kapsamlı bir uygulama çalışması ile önerilen çözüm yöntemlerinin ürettikleri sonuçlar ve çözüm performansları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Paralel görev atama, paralel istasyon oluşturma, montaj hattı dengeleme, tamsayılı programlama, matematiksel modelleme, yöneylem araştırması

2017, xv + 214 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

NEW APPROACHES TO MINIMIZING CYCLE TIME IN ASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEMS: TASK PARALLELING AND STATION PARALLELING

Hakan ALTUNAY

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

Supervisor: Prof. Dr. H. Cenk ÖZMUTLU

This thesis utilizes the approaches of task paralleling and station paralleling, which have been recently developed in assembly line balancing literature. The task paralleling approach allows some tasks to be performed on more than one station, assuming that jobs (tasks) are indivisible. Station paralleling approach, on the other hand, is based on the existence of identical stations, having same equipment and hardware, at any stage on the assembly line. Both approaches are among the most effective methods for decreasing the cycle time and increasing the productivity up to the desired levels, especially in assembly lines, where task durations are larger than cycle time and processing times of tasks vary significantly. Furthermore, these approaches have many advantages in terms of productive use of available capacity and time, minimizing idle time and taking timely measures against customer demand fluctuations and potential disruptions in production.

The purpose of this study is to demonstrate the applicability of mathematical models and a heuristic method, which utilize task paralleling and station paralleling, in solving assembly line balancing problems, and make a contribution to literature. In the following sections, the heuristic method and proposed mathematical models are explained in detail. The proposed models with some unlimited parameters produced results that do not comply with assembly line philosophy. Therefore, in addition to present models, some new mathematical models with transition times between tasks and penalty coefficients for each new parallel station, were developed. In the last section of the study, the results of the proposed mathematical models are analyzed and compared, within a comprehensive case study.

Keywords: Task paralleling, station paralleling, assembly line balancing, integer programming, mathematical programming, operations research

2017, xv + 214 pages.

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Tez çalışmam ve doktora eğitimim boyunca bana her konuda destek olan, tanıdığım günden bu yana hayatımın her alanında kendime örnek aldığım tez danışmanım ve saygıdeğer Hocam, Prof. Dr. H. Cenk Özmutlu'ya saygı ve sevgilerimi sunarım.

Tez çalışmalarını süresince tüm tez izleme toplantılarına katılarak, daha iyi bir çalışma ortaya koymam konusunda bana destek olan değerli Hocalarım, Doç. Dr. Fatih Çavdur ve Yrd. Doç. Dr. Koray Altun'a saygı ve teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak da bugünlere gelmemde en fazla emeğe sahip olan ve haklarını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hakan ALTUNAY

/ /2017

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	5
2.1. Üretim Kavramı ve Üretim Yönetimi.....	5
2.2. Üretim Sistemleri.....	6
2.2.1. Üretim sistemlerinin sınıflandırılması.....	7
2.2.3. Seri üretim sisteminin temel gereklilikleri.....	13
2.2.4. Akış hatları.....	14
2.3. Montaj Hatları ve Montaj Hattı Dengeleme Problemi.....	16
2.4. Montaj Hattı Dengeleme Probleminin Amaçları.....	18
2.5. Montaj Hattı Dengeleme Problemlerine İlişkin Temel Kavramlar.....	19
2.6. Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinin Sınıflandırılması.....	24
2.6.1. Amaç tipi ve sayısına göre sınıflandırma.....	26
2.6.2. İşlem sürelerine göre sınıflandırma.....	27
2.6.3. Ürün veya model sayısına göre sınıflandırma.....	27
2.7. MHDP'nin Çözümünde Kullanılan Yöntemler.....	28
2.7.1. Matematiksel programlama.....	30
2.8. Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinde Paralellik Kavramı.....	36
2.8.1. Hat paralelliği kavramı.....	37
2.8.2. Görev paralelliği kavramı.....	39
2.8.3. İstasyon paralelliği kavramı.....	41
2.9. Literatür İnceleme Çalışmaları.....	43
2.9.1. Görev paralelliğinden yararlanılarak yapılan çalışmalar.....	44
2.9.2. İstasyon paralelliğinden yararlanılarak yapılan çalışmalar.....	45
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	51
3.1. Paralel Görev Atama Yaklaşımı.....	51
3.1.1. Paralel görev atamalı hat dengeleme modeli.....	51

3.2. Paralel İstasyon Oluşturma Yaklaşımı	56
3.2.1. Sınırlandırılmış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli	57
3.2.2. Sınırlandırılmamış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli	60
3.2.3. Paralel istasyon oluşturma sezgiseli	97
3.3. Önerilen Yaklaşımların Test Problemleri ile Karşılaştırılması	108
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	112
4.1. Uygulama Örneğinin Geleneksel Tip-II Problemi Olarak Çözülmesi	115
4.2. Uygulama Örneğinin Paralel Görev Atamalı Hat Dengeleme Modeli ile Çözülmesi	118
4.3. Uygulama Örneğinin Paralel İstasyon Oluşturma Yaklaşımı ile Çözülmesi	130
4.3.1. Sınırlandırılmış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözülmesi	130
4.3.2. Sınırlandırılmamış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözülmesi	138
5. SONUÇ	188
KAYNAKLAR	190
EKLER	198
ÖZGEÇMİŞ	211

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
i	Görevler
j	İstasyonlar
k	Aşamalar
N	Toplam görev sayısı
M	Toplam iş istasyonu sayısı
K	Toplam aşama sayısı
t_i	i . görevin işlem süresi
P_i	i . görevin öncüllerini içeren küme
$hmaks$	Montaj hattı boyunca (paralel istasyonlar da dâhil) kullanılabilir maksimum istasyon sayısı
G	Büyük bir sayı değeri
U	Paralel görev sayısının üst sınırı
F_w	Görevler arası geçiş süresini temsilen, bir istasyona atanmış fazladan her bir görev için dikkate alınan ceza katsayısı değeri
F_s	Bir aşamada yer alan her bir paralel istasyon için dikkate alınan ceza katsayısı değeri
C	Çevrim süresi
x_{ij}	$\begin{cases} 1, & i. \text{ görev, } j. \text{ istasyona atanırsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
y_i	$\begin{cases} 1, & i. \text{ görev birden fazla istasyona atanırsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
z_{ij}	$x_{ij} \cdot y_i$ (modelin doğrusallaştırılması için kullanılmıştır)
x_{ik}	$\begin{cases} 1, & i. \text{ görev } k. \text{ aşamaya atanırsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
y_{kj}	$\begin{cases} 1, & k. \text{ aşamada } j \text{ sayıda istasyon yer alıyorsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
Kısaltmalar	Açıklama
MHDP	Montaj Hattı Dengeleme Problemi
HDP	Hat Dengeleme Problemi
GMHDP	Genel Montaj Hattı Dengeleme Problemi
BMHDP	Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemi
DMHDP	Deterministik Montaj Hattı Dengeleme Problemi
SMHDP	Stokastik Montaj Hattı Dengeleme Problemi
BMHDP-I	Tip-I özellikteki Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemi
BMHDP-II	Tip-II özellikteki Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemi
PMHDP	Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemi
PGA	Paralel Görev Atamalı Hat Dengeleme Modeli
PİO	Sınırlandırılmamış Paralel İstasyon Oluşturmalı Hat Dengeleme Modeli
KY	Geleneksel Tip-II Modeli
MPL	Mathematical Programming Language

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Bir üretim sistemini oluşturan temel elemanlar	6
Şekil 2.2. Üretim sistemlerinin sınıflandırılması	8
Şekil 2.3. Üretim sistemlerinin üretim miktarı ve akışına göre sınıflandırılması	9
Şekil 2.4. Montaj hatlarının sınıflandırılması	14
Şekil 2.5. Üretilen ürünün tipi ve modeline göre montaj hatlarının sınıflandırılması	15
Şekil 2.6. 6 Görev ve 4 iş istasyonundan oluşan düz bir montaj hattı örneği	16
Şekil 2.7. Bir montaj hattının dengelenmemiş ve dengelenmiş hali	18
Şekil 2.8. 9 görevli bir probleme ait öncelik diyagramı.....	22
Şekil 2.9. Bir hat dengeleme probleminin girdi ve çıktıları.....	24
Şekil 2.10. MHDP'nin çözümünde yaygın olarak kullanılan yöntemler	29
Şekil 2.11. Geleneksel (düz) montaj hattı	37
Şekil 2.12. Paralel montaj hattı	38
Şekil 2.13. Görev paralelliği durumunun ifadesi için örnek problem.....	40
Şekil 2.14. Görev paralelliği durumunun gösterimi.....	40
Şekil 2.15. Örnek problemin görev paralelliğine izin verilmesi durumundaki çözümü .	41
Şekil 2.16. İstasyon paralelliği durumu	42
Şekil 3.1. 12 görevli örnek probleme ait öncelik diyagramı	66
Şekil 3.2. Örnek problemin geleneksel yaklaşım ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi.....	66
Şekil 3.3. Örnek problemin sınırlandırılmış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi	67
Şekil 3.4. Örnek problemin sınırlandırılmamış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi	68

Şekil 3.5. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 0$)	74
Şekil 3.6. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 1$)	75
Şekil 3.7. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 2$)	75
Şekil 3.8. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 3$)	76
Şekil 3.9. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 5$)	76
Şekil 3.10. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 10$)	76
Şekil 3.11. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 15$)	77
Şekil 3.12. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 20$)	77
Şekil 3.13. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 25$)	78
Şekil 3.14. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 50$)	78
Şekil 3.15. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 100$)	79
Şekil 3.16. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 150$)	79
Şekil 3.17. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 200$)	80
Şekil 3.18. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 250$)	80
Şekil 3.19. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 300$)	80

Şekil 3.20. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 400$)	81
Şekil 3.21. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 500$)	81
Şekil 3.22. İş istasyonu başına düşen ortalama görev sayısının F_w parametresine göre değişimi	82
Şekil 3.23. Çevrim süresinin F_w parametresine göre değişimi.....	83
Şekil 3.24. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 0$)	87
Şekil 3.25. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 1$)	88
Şekil 3.26. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 2$)	89
Şekil 3.27. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 3$)	89
Şekil 3.28. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 5$)	90
Şekil 3.29. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 10$)	90
Şekil 3.30. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 15$)	91
Şekil 3.31. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 20$)	91
Şekil 3.32. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 25$)	91
Şekil 3.33. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 50$)	92
Şekil 3.34. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 100$)	92

Şekil 3.35. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 150$)	92
Şekil 3.36. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 200$)	92
Şekil 3.37. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 250$)	93
Şekil 3.38. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 300$)	93
Şekil 3.39. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 400$)	93
Şekil 3.40. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 500$)	93
Şekil 3.41. İş istasyonu başına düşen ortalama görev sayısının F_s parametresine göre değişimi	95
Şekil 3.42. Bir aşamadaki ortalama istasyon sayısının F_s parametresine göre değişimi	95
Şekil 3.43. Çevrim süresinin F_s parametresine göre değişimi.....	96
Şekil 3.44. F_s parametresine göre bütün ölçütlerdeki değişimin karşılaştırılmalı gösterimi	96
Şekil 3.45. Paralel istasyon oluşturma sezgiseli (PİOS) için akış şeması	100
Şekil 3.46. PİOS yöntemi için kullanılan örnek probleme ait öncelik diyagramı.....	101
Şekil 3.47. Örnek problemin PİOS ile çözümüne ilişkin elde edilen başlangıç çözümü	102
Şekil 3.48. PİOS yöntemi için kullanılan örnek probleme ait yeniden düzenlenen öncelik diyagramı.....	103
Şekil 3.49. Öncelik ilişkilerinin yeniden düzenlenmesi sonucunda elde edilen hat yerleşimi.....	103
Şekil 3.50. Parametrelerin değişimi sonucunda elde edilen yeni hat yerleşimi	104
Şekil 3.51. PİOS yöntemi için kullanılan örnek probleme ait yeniden düzenlenen öncelik diyagramı (2. iterasyon)	105

Şekil 3.52. Öncelik ilişkilerinin yeniden düzenlenmesi sonucunda elde edilen hat yerleşimi (2. iterasyon).....	105
Şekil 3.53. Parametrelerin değişimi sonucunda elde edilen yeni hat yerleşimi (2. iterasyon).....	106
Şekil 3.54. PİOS yöntemi için kullanılan örnek probleme ait yeniden düzenlenen öncelik diyagramı (3. iterasyon)	107
Şekil 3.55. Öncelik ilişkilerinin yeniden düzenlenmesi sonucunda elde edilen hat yerleşimi (3. iterasyon).....	107
Şekil 4.1. Uygulama örneğine ilişkin öncelik diyagramı	114
Şekil 4.2. Uygulama örneğinin Geleneksel Tip-II problemi olarak çözümü	117
Şekil 4.3. Uygulama örneğinin paralel görev atamalı hat dengeleme modeli ile çözümü (U ve çözüm süresi sınırlanmamış)	124
Şekil 4.4. Uygulama örneğinin paralel görev atamalı hat dengeleme modeli ile çözümü (1. senaryo).....	125
Şekil 4.5. Uygulama örneğinin paralel görev atamalı hat dengeleme modeli ile çözümü (2. senaryo).....	126
Şekil 4.6. Uygulama örneğinin paralel görev atamalı hat dengeleme modeli ile çözümü (3. Senaryo).....	127
Şekil 4.7. Uygulama örneğinin paralel görev atamalı hat dengeleme modeli ile çözümü (4. Senaryo).....	128
Şekil 4.8. Uygulama örneğinin paralel görev atamalı hat dengeleme modeli ile çözümü (5. Senaryo).....	129
Şekil 4.9. Uygulama örneğinin sınırlanmış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümü ($K=7, M=2$)	134
Şekil 4.10. Uygulama örneğinin sınırlanmış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümü ($K=7, M=3$)	135
Şekil 4.11. Uygulama örneğinin sınırlanmış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümü ($K=8, M=2$)	136

Şekil 4.12. Uygulama örneğinin sınırlandırılmış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümü ($K= 8, M= 3$)	137
Şekil 4.13. Uygulama örneğinin sınırlandırılmamış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi	139
Şekil 4.14. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 0$)	142
Şekil 4.15. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 1$)	144
Şekil 4.16. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 5$)	145
Şekil 4.17. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 10$)	146
Şekil 4.18. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 15$)	147
Şekil 4.19. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 20$)	148
Şekil 4.20. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 25$)	149
Şekil 4.21. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 30$)	150
Şekil 4.22. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 40$)	151
Şekil 4.23. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 50$)	152
Şekil 4.24. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 75$)	153
Şekil 4.25. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 100$)	154
Şekil 4.26. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 150$)	155

Şekil 4.27. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 200$)	156
Şekil 4.28. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 250$)	157
Şekil 4.29. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 300$)	158
Şekil 4.30. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 400$)	159
Şekil 4.31. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 500$)	160
Şekil 4.32. İş istasyonu başına düşen ortalama görev sayısının F_w parametresine göre değişimi	161
Şekil 4.33. Bir aşamadaki ortalama istasyon sayısının F_w parametresine göre değişimi	162
Şekil 4.34. Çevrim süresinin F_w parametresine göre değişimi.....	163
Şekil 4.35. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 0$)	166
Şekil 4.36. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 1$)	167
Şekil 4.37. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 5$)	168
Şekil 4.38. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 10$)	169
Şekil 4.39. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 15$)	170
Şekil 4.40. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 20$)	171
Şekil 4.41. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 25$)	172

Şekil 4.42. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 30$)	173
Şekil 4.43. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 40$)	174
Şekil 4.44. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 50$)	175
Şekil 4.45. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 75$)	176
Şekil 4.46. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 100$)	177
Şekil 4.47. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 150$)	178
Şekil 4.48. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 200$)	179
Şekil 4.49. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 250$)	180
Şekil 4.50. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 300$)	181
Şekil 4.51. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 400$)	182
Şekil 4.52. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 500$)	183
Şekil 4.53. İş istasyonu başına düşen ortalama görev sayısının F_s parametresine göre değişimi	185
Şekil 4.54. Bir aşamadaki ortalama istasyon sayısının F_s parametresine göre değişimi	185
Şekil 4.55. Çevrim süresinin F_s parametresine göre değişimi.....	186
Şekil 4.56. Çevrim süresinin bir istasyondaki ortalama görev sayısına göre değişimi.	187
Şekil 4.57. Çevrim süresinin bir aşamadaki ortalama istasyon sayısına göre değişimi	187

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Şekil 2.7'deki öncelik diyagramına ilişkin öncelik matrisi	22
Çizelge 3.1. Test problemleri ve bu problemlerin özellikleri	109
Çizelge 3.2. Önerilen yaklaşımların test problemleri yardımıyla karşılaştırılması.....	110
Çizelge 4.1. Uygulama örneğine ilişkin görevler, görev süreleri (sn) ve öncelik ilişkileri	113
Çizelge 4.2. Uygulama örneğinin iki ayrı yaklaşım ile çözümüne ilişkin elde edilen sonuçların karşılaştırmalı analizi	120
Çizelge 4.3. Paralel görev atama yaklaşımına yönelik üretilen senaryolar ve elde edilen sonuçlar	121
Çizelge 4.4. Sınırlandırılmış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeline yönelik üretilen senaryolar	131
Çizelge 4.5. Paralel istasyon oluşturma yaklaşımı ile elde edilen optimum sonuçlar ..	132
Çizelge 4.6. Çözüm yaklaşımlarının karşılaştırılması	133

1. GİRİŞ

Günümüz rekabet koşullarında üretim kaynaklarının en etkin şekilde kullanılması işletmeler açısından oldukça önemli hale gelmiştir. İşgücü, sermaye, makine ve hammadde gibi kısıtlı kaynakların verimli kullanılması ile üretim maliyetlerinin önemli oranlarda azaltılması ve mevcut kapasiteden optimum yararın elde edilmesi, işletmelerin en önemli hedefleri arasında yer almaktadır. Bu hedeflere ulaşabilmek için de üretim sistemlerinin sürekli olarak gözden geçirilmesi ve gerekli düzenlenmelerin yapılması gerekmektedir (Derya 2012).

Tek bir ürünün veya imalat süreçleri birbirlerine benzeyen çok sayıda ürün grubunun yüksek miktarlarda üretildiği işletmelerde, kaynakların etkin kullanımına olanak tanıyan en önemli imalat sistemlerinden birisi de akış tipi üretim sistemidir. Montaj hatları ise akış tipi üretim sistemlerinin temel unsurlardandır. Bu hat sistemleri, standartlaştırılmış ürünlerin kaliteli bir şekilde imalatı konusunda yaygın olarak kullanılan üretim teknikleri arasındadır. Montaj hatları, çeşitli malzeme taşıma sistemleri ile birbirlerine bağlanmış istasyonların oluşturduğu bir tesis yerleşimi türüdür (Çerçioğlu ve ark. 2009).

Montaj hatları; başta otomotiv, elektronik ve beyaz eşya endüstrisi olmak üzere çok sayıda üretim sisteminin temelini oluşturmaktadır. Bir montaj hattı, iş parçalarının işgücü veya malzeme taşıma donanımı aracılığıyla hat boyunca kesintisiz olarak aktarıldığı, birbiri ardına sıralanmış bir dizi iş istasyonundan meydana gelmektedir. Her bir iş istasyonunda, son ürünü üretmek için her biri montaj işleminin bir parçası olan belirli operasyonlar tekrarlı ve eksiksiz bir şekilde gerçekleştirilir. Görevlerin istasyonlara atanması sürecinde ise; görevler arasındaki öncelik ilişkileri, çevrim süresi, istasyon sayısı ve görevler arasındaki bazı özel durumları içeren kısıtlar dikkate alınmaktadır. Herhangi bir ürün tipine ait imalat sürecinin en temel parçaları olarak tanımlanan görevlerin, işlem süreleri ve önceden düzenlenmiş kısıtlara bağlı olarak bir veya birden fazla amacı eniyileyecek şekilde ardışık olarak birbirine bağlanmış istasyonlara atanması işlemi de montaj hattı dengeleme problemi olarak adlandırılmaktadır. Yüksek verimlilikte bir üretim sistemini hedefleyen tüm işletmeler için hat dengeleme süreci kritik öneme sahiptir (Tunçel ve Topaloğlu 2013).

Bu tez çalışmasında da çok sayıda bilimsel çalışmaya konu olan ve önemi gün geçtikçe artan montaj hattı dengeleme problemi ele alınmıştır. Bu çalışmanın diğer çalışmalardan farkı ise ilerleyen bölümlerde ayrıntıları sunulan; paralel görev atama ve paralel istasyon oluşturma yaklaşımlarını içermesidir. Bu tez çalışmasında, montaj hattı dengeleme probleminin çözümünde çevrim süresinin minimizasyonuna yönelik olarak geliştirilen, paralel istasyon oluşturma ve paralel görev atama yaklaşımlarını temel alan matematiksel model önerileri sunulmuştur. Problemin çözümü için geliştirilen bu modellere ek olarak çalışmanın ilerleyen bölümlerinde paralel istasyon oluşturma yaklaşımını kullanan sezgisel bir yöntem önerisine de yer verilmiştir.

Montaj hattı dengeleme konusu geniş bir literatüre sahip olmasına rağmen, paralel istasyon oluşturma ve paralel görev atama yaklaşımları henüz çok yeni ve bu alana büyük katkılar sağlayabilecek çözüm yöntemleri arasındadır. Bu alanda yapılan daha önceki çalışmalar da dikkate alınacak olursa; bu çözüm yaklaşımlarının yüksek verimlilikteki üretim hatlarının tasarlanması sürecinde oldukça önemli kazanımlar sağlayacağı açıkça görülmektedir. Bu çalışmada ele alınan paralel istasyon oluşturma ve paralel görev atama yaklaşımlarının montaj hatlarında uygulanması ile birlikte:

- i. Kaynakların ve mevcut sürenin etkin kullanımı sayesinde yüksek üretim oranlarına ulaşılması,
- ii. Atıl/kayıp sürelerin azaltılması ile daha dengeli hatların tasarlanması,
- iii. İşgücünün daha verimli kullanılması,
- iv. Olası arıza ve aksaklıklara karşı üretim sisteminin güvenilirliğinin ve esnekliğinin artırılması gibi kazanımların elde edilmesi amaçlanmaktadır.

Bu tez çalışmasında, montaj hattı dengeleme problemleri alanında yapılmış sınırlı sayıdaki araştırmada yer alan, paralel istasyon oluşturma ve paralel görev atama yaklaşımlarından yararlanılarak problemin çözümüne yönelik olan yeni yöntemlerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda geliştirilen sezgisel yöntem ve

matematiksel model önerileri çalışmanın ilerleyen bölümlerinde ayrıntılarıyla birlikte sunulmuştur.

Paralel görev atama ve paralel istasyon oluşturma yaklaşımlarının henüz çok yeni olması ve bu konudaki mevcut çalışmaların yetersizliği sebebiyle bu yaklaşımları temel alan yeni çözüm önerilerinin geliştirilmesi hat dengeleme alanı için oldukça önemlidir. Önceki çalışmalarda önerilen matematiksel programlama modellerinin istasyon sayısının ve/veya toplam maliyetin en küçüklenmesine yönelik olduğu görülmekle birlikte, üretim oranlarını doğrudan etkileyecek şekilde çevrim süresini minimize eden paralel görev atamalı ve paralel istasyon oluşturmali matematiksel modellere literatürde rastlanmamıştır. Literatürde yer alan bu boşluk, bu tez çalışmasının çıkış noktasını oluşturmaktadır. Sonuç olarak, bu yaklaşımları temel alarak geliştirilen çözüm yöntemlerinin hat dengeleme alanında yapılacak bundan sonraki çalışmalar için de kaynak teşkil etmesi beklenmektedir.

Bu tez çalışmasında ilk olarak, ele alınan hat dengeleme probleminin çözümü için çevrim süresinin minimizasyonunu hedefleyen matematiksel programlama modellerinin geliştirilmesi sağlanmıştır. Sonraki aşamada ise geliştirilen modellerdeki parametrelerin sınırlandırılmadığı durumlarda hat dengeleme felsefesine uygun olmayan sonuçların üretildiğinin tespit edilmesi ile birlikte; görevler arası geçişlerdeki süreleri ve açılan her bir paralel istasyon için söz konusu olan ceza katsayılarını da içerecek şekilde yeni modellerin ortaya konulması amaçlanmıştır. Bu modellere ek olarak, paralel istasyon oluşturma yaklaşımını temel alan sezgisel bir yöntem önerisi sunularak geliştirilen çözüm yöntemlerinin tanıtımı tamamlanmıştır. Son olarak da, MHDP literatürüne önemli katkılar sağlaması ve sonraki çalışmalara kaynak teşkil etmesi beklenen bu çözüm yöntemlerinin bir gerçek hayat problemi niteliğindeki kapsamlı bir uygulama çalışması ile desteklenmesi sağlanmıştır.

Çalışmanın Giriş ve Kaynak Araştırması bölümlerinde, montaj hattı dengeleme probleminin genel özelliklerine ve çözüm yöntemlerine değinilmesinin ardından, ilk kez bu tez araştırmasında ortaya konulan matematiksel modellere ve sezgisel bir yöntemle ilişkin açıklamalara Materyal ve Yöntem bölümünde yer verilmiştir. Yine bu bölümde, önerilen modellerin uygulanabilirliği bazı küçük boyutlu problemler üzerinde gösterilmiş

ve literatürden alınan örnek problemler yardımıyla modellerin test edilmesi sağlanmıştır. Çalışmanın son bölümünde ise kapsamlı bir sanayi uygulaması yapılarak önerilen modellerin ürettikleri sonuçlar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Üretim Kavramı ve Üretim Yönetimi

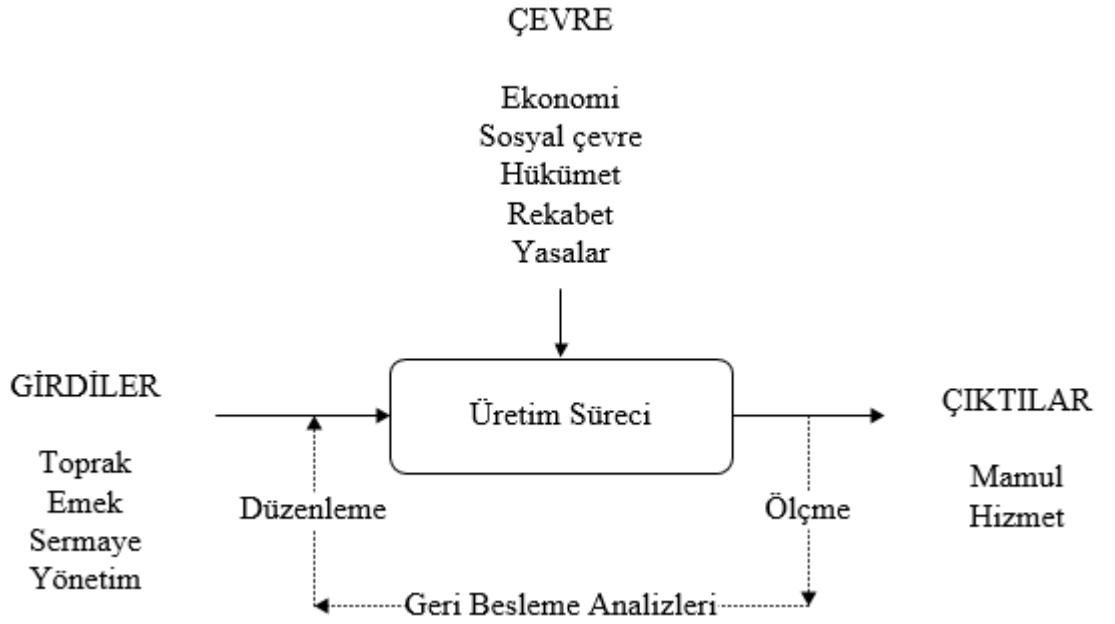
Üretim, mal ve/veya hizmet üretimi gerçekleştiren bütün işletmelerin temel faaliyetlerinden birisidir (Kobu 2014). Üretim kavramı, farklı bilim dalları açısından çeşitli biçimlerde tanımlanmaktadır. Ekonomistler konuya fayda yaratmak penceresinden bakarken, mühendislik bakış açısıyla üretim; fiziksel bir varlık üzerinde, onun değerini artıracak bir değişiklik yapmak veya hammadde ya da yarı mamulleri, kullanılabilir bir ürüne dönüştürmek şeklinde ifade edilmektedir (Ellwoods 1992; Erkut ve Baskak 1997). Üretim faaliyetinin temel amacı, herhangi bir ihtiyacı karşılamaya yönelik olarak bir ürün veya hizmetin ortaya çıkarılmasıdır. Üretimin amacına ulaşabilmesi için ise üretim bileşenlerinin ve kaynaklarının, istenen özellikte bir araya getirilmesi ve verimli bir şekilde kullanılması gerekmektedir. Bir işletmede üretime girdi olarak katılabilecek başlıca kaynaklar; hammadde, sermaye, işgücü ve bunları organize eden girişimcilerdir. Bu girdiler bir araya gelerek ürün veya hizmetin oluşmasına katkı sağlamaktadır. İşletmeler için asıl önemli olan ise söz konusu kaynakların; hedeflenen kalite ve sürede, olabilecek en düşük maliyetle bir araya getirilmesi; yani miktar, kalite, zaman ve maliyet parametrelerinin optimize edilmesidir (Özkan 2003).

Günümüzde hayat standartlarının yükselmesi ve dünya nüfusunun hızla artması gibi faktörler daha karmaşık ürünlerin büyük miktarlarda üretimini zorunlu kılmaktadır. Çok sayıda parçadan meydana gelen bu ürünlerin üretilmesi için ise gerekli olan hammadde ve yarı mamullerin, çeşitli kaynaklardan; istenilen süre, fiyat ve miktarlarda temin edilmesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra; her bir parçanın istenilen özelliklerde üretilmesi, işlenmiş parçaların gerekli yerlerde ve zamanda hazır bulundurulması ve tüm bu faaliyetlerin eldeki kaynaklardan en iyi şekilde yararlanılarak sınırlı süreler içerisinde gerçekleştirilmesi de oldukça önemlidir. Üretim faaliyetinin bir sonucu olarak ortaya çıkan bu sorunlar üretim yönetimi kavramının önemini ortaya koymaktadır. İşletmelerin günümüz piyasa koşullarına uyum sağlayabilmeleri açısından etkin bir üretim yönetimi sürecine sahip olmaları gerekmektedir (Baskak 1998).

Üretim yönetimi; işletmelerin sahip olduğu malzeme, makine ve işgücü kaynaklarının, belirli miktardaki ürünün istenilen kalite, zaman ve maliyetle üretilecek şekilde bir araya getirilmesidir. Ancak karmaşık üretim sistemlerinde bu unsurların tamamının dikkate alınarak sistemlerin yeniden düzenlenmesi zor bir süreci beraberinde getirmektedir. Bu zor sürecin üstesinden gelebilmek ve söz konusu dört unsurun en iyi değerlerini bulabilmek amacıyla bazı kantitatif yöntemlerden yararlanılması ise kaçınılmaz bir zorunluluktur (Kobu 2014).

2.2. Üretim Sistemleri

Üretim sistemleri, hammadde veya yarı mamullerin bir dönüşüm birimi aracılığıyla ürün haline getirildiği sistem olarak ifade edilmektedir (Gökçen 1994). Bir üretim sistemi, Şekil 2.1’de görüldüğü gibi; girdiler, üretim süreci, çıktılar, geri besleme analizleri ve çevre olmak üzere beş temel elemandan oluşmaktadır (Kobu 2014).



Şekil 2.1. Bir üretim sistemini oluşturan temel elemanlar

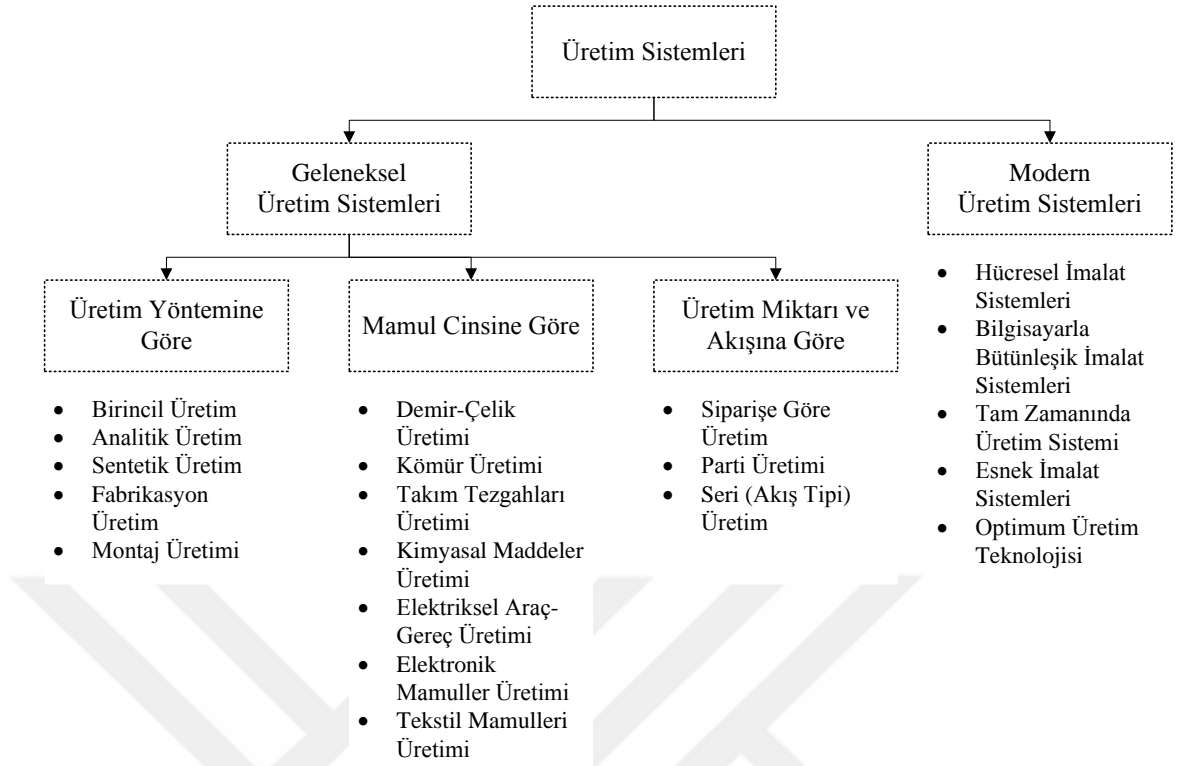
Girdiler, üretilen mamul veya hizmete göre değişkenlik gösterebilmektedir. Bir üretim probleminin çözümüne ilişkin genel amaç, üretim sisteminin karar değişkenleri olarak da bilinen girdi bileşenlerinin en uygun değerlerinin bulunmasıdır. Üretim süreci ise, bir

katma değer yaratmak amacı ile girdilerin bir mamul veya hizmete dönüştürülmesini sağlayan bileşendir. Hammadde veya yarı mamul üzerinde fiziksel veya kimyasal bir değişim gerçekleştirmek; bir mamulün bir yerden bir yere taşınması, depolanması veya kalite kontrol için muayene edilmesi işlemlerinden her birisi, üretim sürecinde uygulanabilecek faaliyetlere birer örnektir. Üretim sisteminin çıktıları ise bir mamul veya hizmet niteliğinde olabilmektedir. Mamuller somut olarak değerlendirilebilen ve ölçülebilen varlıkları, hizmet ise üretildiği anda tüketilen ve ölçümü nispeten zor olan çıktıları temsil etmektedir. Üretim sisteminin bir parçası olan geri besleme analizleri kullanılarak da çıktılar üzerinde ölçme ve değerlendirme işlemleri uygulanmaktadır. Bu analizlerin sonuçlarına göre üretim sistemi üzerinde bazı düzeltici ve önleyici kararlar alınabilmektedir. Üretim sisteminin çevre elemanı ise, kontrol edilemeyen bazı değişkenleri kapsamaktadır. Bu değişkenlerin varlığı bilinmesine rağmen sisteme olan etkileri belirlenemez ve bu etkiler kontrollü olarak değiştirilemez. Bu sebeple çevre faktörü üretim analizlerinde risk bileşeni olarak değerlendirilmektedir (Kobu 2014).

2.2.1. Üretim sistemlerinin sınıflandırılması

Üretim yönetiminde karşılaşılan problemlerin karmaşıklığı, üretim sistemlerinin belirli ölçütlere göre sınıflandırılmasını kaçınılmaz hale getirmiştir. Bu sayede, üretim sistemlerinin daha iyi analiz edilmesi ve üretim problemlerine daha etkin çözüm üretilmesi sağlanmıştır (Tanrıtanır 1990).

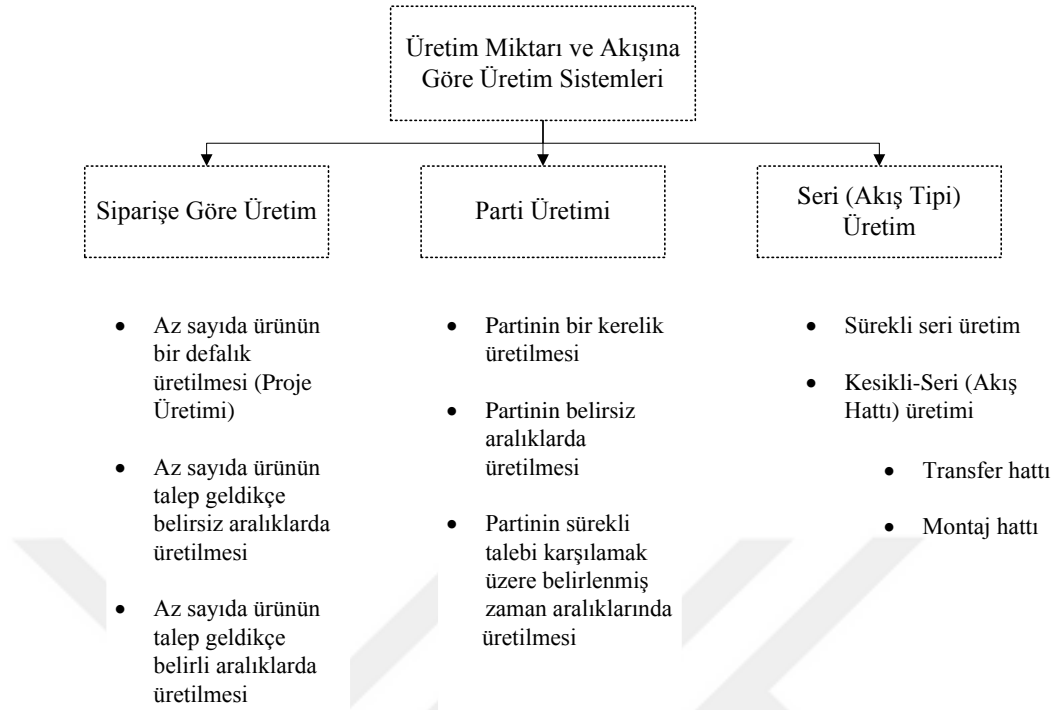
Üretim sistemlerini kesin çizgilerle birbirinden ayırmak mümkün olmasa da; ürün çeşidi, üretim miktarı, üretim yöntemi ve üretimin akışı gibi bazı özellikler dikkate alınarak üretim sistemleri arasında belirli sınıflandırmalar yapılabilmektedir (Şekil 2.2). Örneğin, Tanyaş ve Baskak (2003) üretim sistemlerini; geleneksel üretim sistemleri ve çağdaş (modern) üretim sistemleri olmak üzere iki ana başlık altında incelemişlerdir. Kobu (2014) ise kökeni çok eski yıllara dayanan geleneksel üretim sistemlerini; üretim yöntemleri, üretilen mamul cinsi, üretim miktarı ve akışı gibi üç ayrı ölçüte göre sınıflandırmaktadır.



Şekil 2.2. Üretim sistemlerinin sınıflandırılması

Üretim sistemlerine ilişkin çeşitli ölçütler kullanılarak çok farklı sınıflandırmalar uygulansa da bunlardan en çok kullanılanı, üretim miktarı ve akışına göre yapılan sınıflandırmadır (Gökçen 1994). Şekil 2.2’den de görüleceği üzere, üretim miktarı ve akışına göre üretim sistemleri; siparişe göre üretim, parti üretimi, seri (akış tipi) üretim olmak üzere üç ayrı grupta incelenmektedir. Bu tez çalışmasında da üretim sistemlerinin üretim miktarı ve akışına göre sınıflandırılması konusunda ayrıntılara yer verilmiştir.

Şekil 2.3’te de üretim sistemlerinin, üretim miktarı ve akışına göre sınıflandırılmasını özetleyen bir görsele yer verilmiştir (Gökçen 1994). Bu görselede de belirtildiği gibi üretim sistemleri, üretim miktarı ve akışına göre genel olarak; siparişe göre üretim, parti üretimi ve seri (akış tipi) üretim olmak üzere 3 sınıfa ayrılmaktadır (Şekil 2.3). İlerleyen paragraflarda da siparişe göre üretim, parti üretimi ve seri üretim hakkında ayrıntılara değinilmiştir.



Şekil 2.3. Üretim sistemlerinin üretim miktarı ve akışına göre sınıflandırılması

Siparişe göre üretim tipinde; zaman, miktar ve kalite bakımından özel olarak talep edilen, çeşitlilik düzeyi yüksek ürünlerin, küçük miktarlarda üretimi söz konusudur. Ürün çeşitliliği ve düşük üretim miktarı, üretimde sürekliliği engelleyerek tekrarı en aza indirmektedir. Siparişe göre üretim sisteminde çok çeşitli işlemleri yapabilen çok amaçlı tezgâhlar kullanılmaktadır (Gökçen 1994). Bunun bir sonucu olarak da farklı tezgâhlarda çalışacak çok yönlü işgücüne ihtiyaç duyulmaktadır. Üretilen malın çeşidinin sürekli değişmesi, işçilerin farklı iş özellikleri konusundaki bilgi ve tecrübe seviyelerinin yüksek olmasını ve daha fazla inisiyatif almalarını gerektirmektedir. Siparişe göre üretim sisteminde; talep yapısındaki değişkenlik, yüksek ara stok miktarı ve denetim güçlüğü gibi problemlerle sıklıkla karşılaşmaktadır (Tanrıtanır 1990).

Sipariş tipi üretimde, üretim miktarı düşük olmasına rağmen müşteriye özel taleplerin karşılanması amacıyla zengin ürün çeşitliliği mevcuttur. Bu üretim sistemi için verilebilecek en güzel örnek terziydir. Çünkü bir terzi, sipariş tipi üretim sisteminin bir özelliği olarak, her müşterinin ölçüsünü, talep ettiği renk ve kumaş tipini dikkate alarak müşteriye özel bir üretim gerçekleştirmektedir (Çerçioğlu 2009).

Sipariş üretimi, imalat sürelerinin özellikleri dikkate alındığında üç grupta incelenmektedir:

- i. Az miktarda ürünün yalnızca bir defa üretilmesi,
- ii. Az miktarda ürünün talep edildikçe, düzensiz aralıklarda üretilmesi,
- iii. Az miktarda ürünün belirli aralıklarda periyodik olarak üretilmesi.

Yalnızca bir defa üretilen ürünler için üretim tekniği, alet ve planlama bakımından uzun dönemli bir planlamaya gerek duyulmamaktadır. Ancak belirli aralıklarla veya düzensiz olarak üretimi tekrarlanan ürünler için işlem planlaması ve kontrol faaliyetlerinin düzenlenmesi gerekmektedir. Siparişe göre üretim tipinde, makine ve işgücü kapasitesinden yararlanma oranları oldukça düşüktür. Siparişlerin çeşitliliği aynı zamanda üretim ortamındaki yığılmaların artmasına da sebep olmaktadır (Kobu 2014).

Üretim sistemleri için yapılan bazı sınıflandırmalarda Proje üretimi (Proje tipi üretim) ayrı bir grup olarak değerlendirilmektedir. Proje üretimi, özel bir ihtiyaca yönelik olarak belirli bir ürün çeşidinden sınırlı sayıda imalatın gerçekleştirildiği üretim sistemi olarak ifade edilebilmektedir. Proje tipi üretim sistemi özellikleri itibariyle sipariş tipi üretim sistemine oldukça benzemektedir. En önemli farklılıklarından birisi ise imalatı yapılacak ürüne ait malzeme veya ana parçaların sabit bir konumda yer alması, işgücü ve makine kaynaklarının ise proje bölgesine taşınması gerekliliğidir. Bunun en önemli sebebi de imalatı söz konusu ürünlerin gemi, uçak gibi büyük hacimli ürünler olmasıdır. Kobu (2014)'ya göre Proje tipi üretim, belirli bir mamulün yalnızca bir kez ve istenilen özelliklerde üretilmesi bakımından sipariş tipi üretime benzemektedir. Ancak proje tipi üretimde akış kavramı söz konusu olmadığı için, bu üretim tipi ayrı bir sınıf olarak değerlendirilmelidir (Kobu 2014). Genel kanı ise bu görüşün tersi yönündedir. Birçok bilim insanına göre proje üretimi, siparişe göre üretim tipinin özel bir halidir.

Parti tipi üretim, belirli bir siparişi veya sürekli olarak oluşan talebi karşılamak amacıyla benzer ya da aynı cins ürünlerin belirli miktarlardaki partiler halinde üretilmesidir. Parti tipi üretimi diğerlerinden ayıran en önemli özellik, bir parti bitmeden diğer partinin üretimine geçilememesidir. Bu üretim tipinin bir başka özelliği ise, talebin sürekli yapıda olmasına rağmen sipariş tipi üretimde olduğu kadar değişken özellikte olmamasıdır (Gökçen 1994).

Parti tipi üretim sisteminde, bir parti ürünün üretimi tamamlandıktan sonra kullanılan tezgâhlar ve diğer araçlar, gerekli ayarlamalar yapıldıktan sonra, diğer partinin üretiminde de kullanılmaktadır. İşgücü, makine ve teçhizatın planlanmasındaki zorluk seviyesi, parti büyüklüğü ve sipariş periyodunun sıklığına bağlıdır. Parti hacmi büyüdükçe ve üretim periyotları belirginleştikçe, üretim planlama ve kontrol teknikleri daha olumlu sonuçlar vermektedir. Parti tipi üretimde iki temel problem mevcuttur:

- i. En uygun parti büyüklüğünün belirlenmesi,
- ii. Kapasite kaybını minimum seviyeye indirgeyen üretim programlarının hazırlanması (Kobu 2014).

Parti tipi üretim endüstride en sık kullanılan üretim sistemlerinden birisidir. Tekstil, ev eşyaları, gıda ve otomotiv sektörlerinde yaygın olarak parti tipi üretim sistemi kullanılmaktadır (Kobu 2014).

Seri (Akış tipi) üretim ise ürün miktarının oldukça yüksek, ürün çeşitliliğinin ise sınırlı olduğu bir üretim tipidir. Seri üretimde belirli bir türdeki ürün grubu için üretim akışı aralıksız olarak devam etmektedir. İşletme içerisindeki kaynakların ve akışın yalnızca belirli bir ürün üzerinde yoğunlaştığını görmek mümkündür. Seri üretimde en önemli amaç, birim zamanda üretilen ürün miktarının olabilecek en yüksek seviyeye çıkarılmasıdır.

Seri üretimde diğer üretim tiplerinden farklı olarak, birbirinden farklı operasyonlar içeren ve yardımcı üretim araçlarına ihtiyaç duyan farklı tipteki ürünlerin imalatından kaynaklanan zorluklar mevcut değildir (Çerçioğlu 2009).

Seri üretim sistemlerinin en büyük özelliği, ürünün hareket halinde olması ve üretim sisteminin ürüne göre tasarlanmasıdır. Seri üretimde, hammadde veya yarı mamul olarak sisteme giren bir ürün, işlem birimlerinden geçerek son ürün halinde sistemi terk etmektedir. Bir üretim sisteminde seri üretim tipinin uygulanabilmesi için ürüne olan talebin üretim hızından yüksek olması gerekmektedir. Çünkü yüksek düzeyde uzmanlaşma gerektiren bu üretim sisteminde, ürüne özgü olarak satın alınan yüksek maliyetli ekipman ve donanımın düşük talep durumunda meydana getireceği zararın boyutu oldukça büyük olabilmektedir. Özetle, üretilen ürünün tümü pazarda karşılık bulabiliyorsa seri üretim sistemlerinin kurulması uygundur (Gökçen 1994).

Seri üretim; sürekli seri ve kesikli seri (akış hattı) üretimi olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Sürekli seri üretimin en önemli özelliklerinden birisi daha önce de değinildiği gibi, hammadde veya parçaların doğal yapılarından kaynaklı olarak akıcı özelliğe sahip olmasıdır. Çimento, şeker, petrokimya ve gıda ürünlerine ait üretim süreci buna en güzel örnektir. Kesikli seri üretim de sürekli seri üretim ile benzer özelliklere sahiptir. Ancak bu üretim tipinde ürünler, birbiri ardına sıralanmış iş istasyonlarında tek tek birimler halinde üretilmektedir. Elektronik eşya ve otomotiv sektörü gibi önemli alanlarda kesikli seri üretim tipi yoğun olarak kullanılmaktadır (Çerçioğlu 2009). Kesikli seri üretim sistemlerinde üretim hatları aynı ürünleri üretmek ya da aynı ürünün benzer modellerini üretmek üzere tasarlanabilmektedir (Gökçen 1994).

Seri üretim sistemleri dört önemli prensibe dayanır (Gökçen 1994):

- i. İş akış prensibi: Seri üretim sistemine göre düzenlenmiş tesislerde; ürün, malzeme ve işin üretim hattı boyunca, düzgün ve belirli bir düzene göre ilerlemeleri gerekmektedir. Sürekli seri üretim için bu düzen korunurken, kesikli seri üretim sistemlerinde amaçlardan biri üretim hattı boyunca bu düzenin sağlanmasıdır.

- ii. İkame edilebilen parçaların kullanımı: Kesikli seri üretim sistemlerinde birbiri yerine kullanılabilen parçaların önemi çok büyüktür. Üretim sisteminde kullanılan yarı mamul ve parçaların belirli teknik özelliklere sahip olmaları gerekmektedir.
- iii. Minimum uzaklık prensibi: Üretim hattındaki iş akışının devamlılığının sağlanması, kullanılan alanın en iyi şekilde değerlendirilmesi ile doğrudan ilişkilidir. Üretim sistemindeki bu devamlılık ise üretim merkezlerinin birbirine yakın konumlandırılmaları ve hareketli bant/konveyör gibi malzeme taşıma araçlarının kullanılması ile sağlanmaktadır.
- iv. İş yükünün bölünmesi: Seri üretim sistemlerinin en önemli özelliklerinden birisi de üretim hattının düzenli ilerlemesi bakımından toplam iş yükünün anlamlı parçalara bölünmesidir.

2.2.3. Seri üretim sisteminin temel gereklilikleri

Gökçen (1994)'e göre seri üretim tipinin bir sisteme uygulanabilmesi için bazı ön şartlar vardır:

- i. Sürekli talep: Seri üretim sistemleri için olmazsa olmaz şartlardan birisi yüksek miktarlarda ve süreklilik arz eden bir talep yapısının varlığıdır. Ancak üretilen ürünlerin tümü pazarda karşılık bulabiliyorsa ve bu talep yapısı süreklilik gösteriyorsa, seri üretim sisteminden istenilen verim elde edilebilmektedir.
- ii. Güvenilirlik: Seri üretim sistemlerinin sorunsuz bir şekilde işletilebilmesi büyük ölçüde, istenilen girdilerin, istenilen zaman ve miktarda, istenilen yerde bulunmasına bağlıdır. Özellikle kesikli seri üretim tipinin temel özelliklerinden birisi üretim sistemindeki iş istasyonlarının çeşitli malzeme taşıma sistemleri ile birbirlerine bağlı olmasıdır. Sistemdeki belirli noktalarda meydana gelebilecek bir aksama tüm sistemi etkileyebileceği için kurulan seri üretim hattının güvenilirliği oldukça önemlidir. Bu sebeple sistemin güvenilirliğini arttıracak etkin bir bakım planlaması süreci gerekmektedir.

- iii. Hat dengesi: Seri üretim tipinin hâkim olduğu bir üretim sisteminden istenilen verimin elde edilebilmesi için toplam iş yükünün bu sistemdeki iş istasyonları arasında olabildiğince eşit şekilde dağıtılması gerekmektedir.

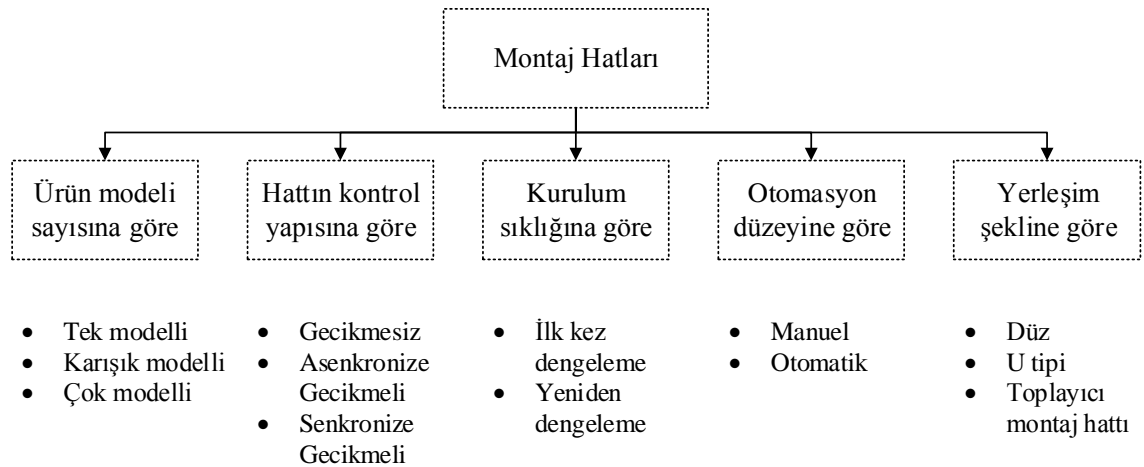
2.2.4. Akış hatları

Kesikli seri üretim tipinde akış hatları, Şekil 2.3'te de görüleceği üzere; transfer hattı ve montaj hattı olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır (Acar ve Eştaş 1991):

Transfer hatları, malzeme iletim araçları ile birbirine bağlanmış otomatik üretim ve makine serilerinden oluşmaktadır. Transfer makineleri olarak da adlandırılırlar. Transfer hatları aracılığı ile ürün ya da malzemelerin otomatik olarak bir yerden bir yere taşınması sağlanmaktadır.

Montaj hatlarında ise malzemelerin bir iş istasyonundan diğerine aktarılabilmesi için işgücü veya makinelerden yararlanılmaktadır. Aynı şekilde malzeme üzerinde yapılacak işlemler de üretim hattı boyunca sıralanmaktadır.

Montaj hatlarını çok farklı şekilde sınıflandırmak mümkündür. Örneğin, Topaloğlu ve Tunçel (2011) montaj hatlarını çeşitli özelliklerine göre 5 gruba ayırarak incelemektedir (Şekil 2.4).

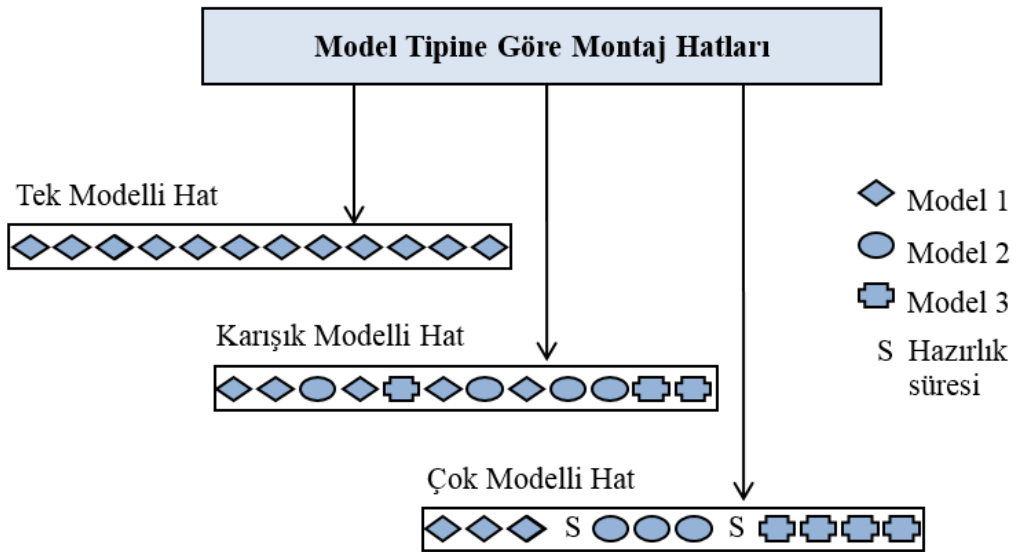


Şekil 2.4. Montaj hatlarının sınıflandırılması

Montaj hatları, üretilen ürünün model tipine göre; tek modellenli, karışık modellenli ve çok modellenli hatlar olmak üzere üç kısımda incelenmektedir (Acar ve Eştaş 1991):

- i. Tek modellenli hatlar: Bu üretim hatlarında tek tip ürün ya da modelin üretimi söz konusudur.
- ii. Karışık modellenli hatlar: Aynı anda, benzer ürün ya da aynı ürünün değişik modellerinin karışık olarak üretildiği hatlardır. Farklı modellerin farklı işlem sürelerine sahip olması sebebiyle bu tip hatların dengelenmesi daha zordur.
- iii. Çok modellenli hatlar: Bu tip hatlarda da birden fazla ürün ya da bir ürüne ait farklı modeller üretilmektedir. Karışık modellenli hatlardan farkı ise değişik modellerdeki ürünlerin aynı hat üzerinde partiler halinde üretilmesidir. Partiler halinde üretim söz konusu olduğu için çok modellenli hatlarda hazırlık süreleri de dikkate alınmalıdır.

Şekil 2.5'te de model tipine göre montaj hatlarının sınıflandırılmasına ilişkin bir görsel sunulmuştur (Yaman ve Küçükkoç 2011).



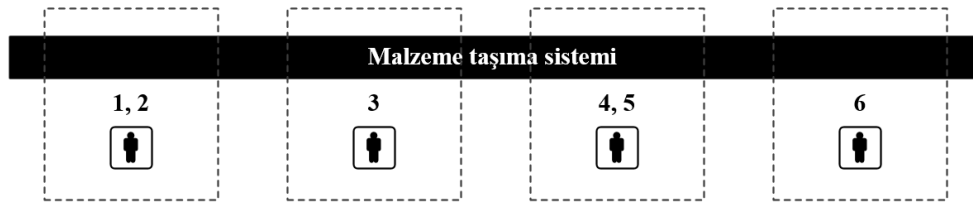
Şekil 2.5. Üretilen ürünün tipi ve modeline göre montaj hatlarının sınıflandırılması

2.3. Montaj Hatları ve Montaj Hattı Dengeleme Problemi

Montaj işlemi, bir ürünü meydana getiren alt parça ve bileşenlerin bir araya getirilmesi ve bunların üzerinde ürüne değer katan bazı değişikliklerin uygulanması anlamına gelmektedir. Montaj hatları ise bant veya konveyör gibi hareketli bir taşıma sistemi kullanılarak belirli sayıdaki iş istasyonu ve ekipmanın birbirlerine ardışık şekilde bağlanması ile oluşmaktadır. Söz konusu iş istasyonlarının her birisinde ürünün imalatı için gerekli olan montaj işlemlerinden (görevlerden) bazıları yer almaktadır. Bu sayede, bir ürünün imalatı için gerekli olan bütün görevlerin, daha önceden belirlenmiş amaçları en iyileyecek şekilde eksiksiz olarak bir iş istasyonuna atanması sağlanmaktadır.

Endüstrileşme sürecinin bir sonucu olarak, toplam işin daha küçük parçalara (görevlere) ayrılarak, bu parçaların ayrı ayrı işçiler tarafından yapılması ile birlikte üretimin daha hızlı ve ekonomik şekilde yapılabileceği görüşü ortaya çıkmıştır. Bu anlayış da üretimin, montaj hatları kullanılarak, bir başka deyişle; birbiri ardına sıralanmış bir dizi iş istasyonunun oluşturduğu bir akış hattı boyunca yapılmasına öncülük etmiştir (Baskak 1998).

Montaj hatlarında standartlaştırılmış ürün gruplarının büyük miktarlarda üretimi söz konusudur. Ürün çeşitliliğin az, üretim miktarının ise büyük boyutlarda olduğu montaj hatlarında asıl amaç; mümkün olan en hızlı sürede parçaların birleştirilerek nihai bir ürüne dönüştürülmesidir. Şekil 2.6'da 6 görev ve 4 iş istasyonundan oluşan örnek bir montaj hattı gösterimi yer almaktadır.



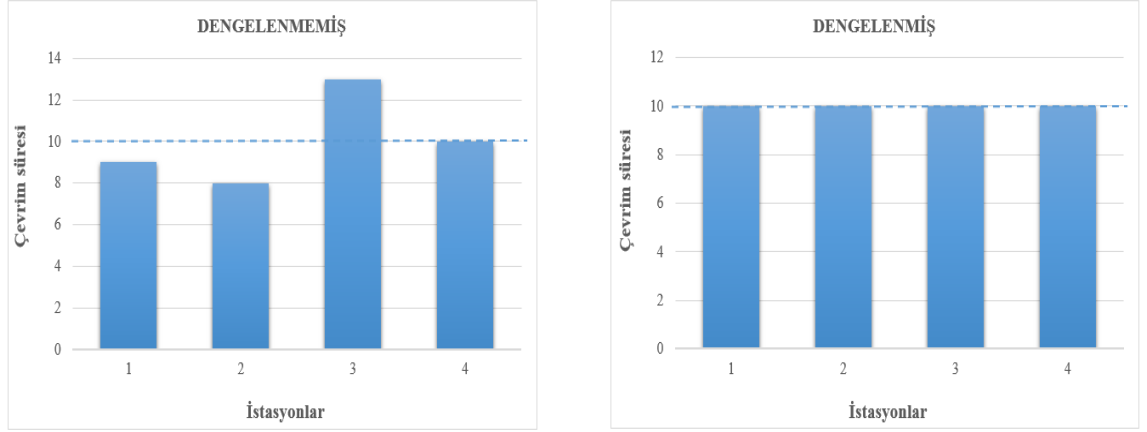
Şekil 2.6. 6 Görev ve 4 iş istasyonundan oluşan düz bir montaj hattı örneği

Montaj hatlarında, üretilen ürünün imalatı için gerekli olan bütün montaj işlemleri önceden belirlenmiş çevrim süresi ve öncelik ilişkileri gibi kısıtlamalar dikkate alınarak

sınırlı sayıdaki iş istasyonlarına paylaştırılmaktadır. Montaj hatlarında karşılaşılan en temel problem ise; uygulanması gereken üretim basamaklarının (görevlerin), ürün ve üretim sistemine bağlı kısıtlar altında bir veya daha fazla amacı en iyileyecek şekilde iş istasyonlarına atanmasıdır. Bu probleme montaj hattı dengeleme problemi (MHDP) adı verilmektedir. Montaj hatlarının dengelenebileceği fikri ilk olarak bir tez çalışmasında ortaya atılmıştır (Bryton 1954). Salveson (1955) tarafından ise montaj hattı dengelemenin tanımı yapılmıştır. Bu çalışmalardan itibaren günümüze kadar geçen süreçte MHDP'nin çözümü ile ilgili matematiksel programlama, sezgisel ve metasezgisel yöntemlerinin kullanıldığı birçok çalışma yapılmıştır. MHDP konusunda yapılan araştırmalara ilişkin geniş kapsamlı bilgiye Becker ve Scholl (2006), Battaia ve Dolgui (2013) çalışmaları aracılığıyla ulaşmak mümkündür (Foroughi ve Gökçen 2014).

Şekil 2.7'de 4 istasyondan oluşan bir montaj hattının dengelenmemiş ve tam dengelenmiş halleri ayrı ayrı gösterilmiştir. Dengelenmemiş montaj hattı gösteriminde, her bir istasyon için iş yükleri (çevrim süreleri) arasındaki farklılıklar net olarak görülmektedir. Bu farklılıklar istasyonlarda atıl sürelerin oluşmasına ve düzensiz bir malzeme akışına sebep olmaktadır. Düzensiz bir montaj hattı ise üretim oranlarında ciddi düşüslere neden olmaktadır. Çünkü montaj hatlarında birim zamandaki çıktı miktarı, çevrim süresi en büyük olan iş istasyonu tarafından belirlenmektedir.

Şekil 2.7'de verilen dengelenmemiş montaj hattında çevrim süresi en büyük olan istasyon 13 dakika ile 3 numaralı istasyondur. Dolayısıyla bu hattın 13 dakikada bir ürün çıkmaktadır. Ancak aynı hattın dengelenmesi ile 4 istasyon için de çevrim süresi 10 dakikaya düşmüştür. Bu da artık hattın 10 dakikada bir ürünün çıkacağı anlamına gelmektedir. Üstelik montaj hattının tam dengelenmiş hali dikkate alındığında, hiçbir istasyonda atıl süre oluşmadığı görülmektedir. Bunun bir sonucu olarak da birbiri ardına sıralanmış iş istasyonları arasındaki ara stokların ve yığılmaların (darboğaz oluşumunun) oluşması engellenmektedir.



Şekil 2.7. Bir montaj hattının dengelenmemiş ve dengelenmiş hali

2.4. Montaj Hattı Dengeleme Probleminin Amaçları

Son ürünün elde edilmesi amacıyla gerçekleştirilmesi gereken tüm görevlerin, sınırlı sayıdaki iş istasyonlarına, atıl sürelerin en aza indirilecek şekilde atanması işlemine montaj hattı dengeleme problemi (MHDP) veya hat dengeleme problemi (HDP) denir. Yapılan bu tanımdan da anlaşılacağı üzere; montaj hattı dengelemenin en önemli amaçlarından birisi toplam iş yükünün istasyonlar arasında olabildiğince eşit olarak dağıtılmasıdır. MHDP çalışmalarının çoğunda belirli bir çevrim süresi içerisinde kullanılan iş istasyonu sayısının en küçüklenmesi ve/veya belirli bir istasyon sayısı için çevrim süresinin en küçüklenmesi hedeflenmektedir (Çerçioğlu ve ark. 2009).

MHDP'nin amaçları genel olarak, Tanyaş ve Baskak (2003) tarafından şöyle sıralanmaktadır:

- i. Düzenli bir malzeme akışının sağlanması,
- ii. Kaynakların en verimli şekilde kullanılması,
- iii. Görevlerin mümkün olabilecek en kısa sürede tamamlanması,
- iv. Montaj hattı üzerindeki iş istasyonu sayısının en küçüklenmesi,

- v. Atıl sürelerin en küçüklenmesi,
- vi. Atıl sürelerin iş istasyonları arasında olabildiğince eşit şekilde dağıtılması ve üretim maliyetlerinin en küçüklenmesi.

MHDP ile ulaşılmak istenilen hedefler incelendiğinde bu hedeflerden bazılarının birbirleri ile çelişebileceği görülmektedir. Dolayısıyla bütün hedeflerin en üst düzeyde gerçekleştirilmeyeceği açıktır. Bu durumda toplam maliyetin en düşük seviyede tutulduğu ve iş yükünün olabildiğince eşit dağıtıldığı mümkün olan en uygun çözümün bulunması amaçlanmalıdır.

2.5. Montaj Hattı Dengeleme Problemlerine İlişkin Temel Kavramlar

MHDP çalışmalarında kullanılan bazı temel kavram ve kısıtlar şu şekildedir (Özkan 2003):

- İş elemanı (Görev): İşler, bazı temel hareketler ve iş parçalarından meydana gelmektedir. İş elemanı ise; bütün bir işin mantıksal olarak bölünebilecek, pratik ve uygun en küçük parçasıdır. Görevler i indisi ile ifade edilmek üzere; toplam görev sayısı da genellikle “ N ” ile gösterilmektedir.
- İş elemanı (Görev) süresi: Herhangi bir görevin tamamlanabilmesi için geçen süredir. Görevler i ile gösterilecek olursa, görevlerin süresi de t_i ile ifade edilmektedir. Görevlere ait bu işlem süreleri değişken (stokastik) olabildiği gibi, çoğu montaj hattı uygulamalarında sabit (deterministik) olarak kabul edilmektedir.
- İş istasyonu: Bir kısım görevin montaj hattı üzerinde birlikte yapıldığı alana verilen isimdir. Hat üzerindeki toplam iş yükünün bir bölümünün atandığı bölge olarak da tanımlanmaktadır. MHDP çalışmalarının büyük çoğunluğunda, maliyetin minimizasyonuna yönelik olarak, gerekli iş istasyonu sayısının en küçüklenmesi amaçlanmaktadır. Bu çalışmada her bir iş istasyonunu temsilen “ j ”

indisi kullanılmıştır. Hattaki toplam iş istasyonu sayısı ise “ M ” ile gösterilmektedir.

- Toplam iş süresi: Bir ürünün montajı için gerekli toplam süre veya işi meydana getiren tüm iş öğelerinin standart sürelerinin toplamıdır. $i \dots N$, her bir iş öğesini göstermek üzere; toplam iş süresi Denklem 2.1’de belirtildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$\sum_{i=1}^N t_i \quad (2.1)$$

- İş istasyonu süresi: Bir istasyonda yapılması gereken bütün iş öğelerinin standart sürelerinin toplamıdır. Montaj hattı dengeleme problemlerinde bir istasyondaki iş istasyonu süresi, çevrim süresini aşamaz.
- Çevrim süresi: Bir üretim hattından art arda çıkan iki ürün arasında geçen süredir. Bir iş istasyonunda yapılması gereken toplam işin tamamlanması için gerekli süre olarak da tanımlanabilmektedir. Çevrim süresi (C), iş istasyonu süresine eşit veya daha büyük olabilir. Çevrim süresi, üretim için kullanılabilir toplam sürenin, üretilen ürün miktarına oranı şeklinde de ifade edilebilmektedir (Denklem 2.2).

$$C = (\text{Kullanılabilir toplam üretim süresi})/(\text{Üretim miktarı}) \quad (2.2)$$

- Atıl süre: Her bir iş istasyonu için atıl süre, çevrim süresi ile iş istasyonu süresi arasındaki farka eşittir. İş istasyonları arasında oluşabilecek atıl sürelerin toplamı, hat dengeleme problemleri açısından önemli bir performans ölçütü olan, denge kaybının belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır (Denklem 2.3). Bir diğer performans ölçütü olan hat etkinliğine ilişkin formülasyon da Denklem 2.4’te sunulduğu gibidir. Tam olarak dengelenmiş bir üretim hattında denge kaybı sıfıra, hat etkinliği ölçütü de bire eşittir.

$$\text{Denge kaybı} = \left[\left(MC - \sum_{i=1}^N t_i \right) / M * C \right] \quad (2.3)$$

$$\text{Hat etkinliği} = \left[\left(\sum_{i=1}^N t_i \right) / M * C \right] \quad (2.4)$$

- Gerekli en az istasyon sayısı: Bir montaj hattında hedeflenen üretim hızına ulaşılmasını sağlayacak gerekli en az istasyon sayısı, toplam iş süresi ve çevrim süresine bağlı olarak belirlenmektedir. $M_{olası}$ değeri çevrim süresinin yarısından daha büyük süreye sahip olan görev sayısı olmak üzere, MHDP için gerekli en az iş istasyonu sayısı (M_{enaz}); M_{enk} ve $M_{olası}$ değerlerinin en büyüğü olarak bulunur (Ignall 1965).

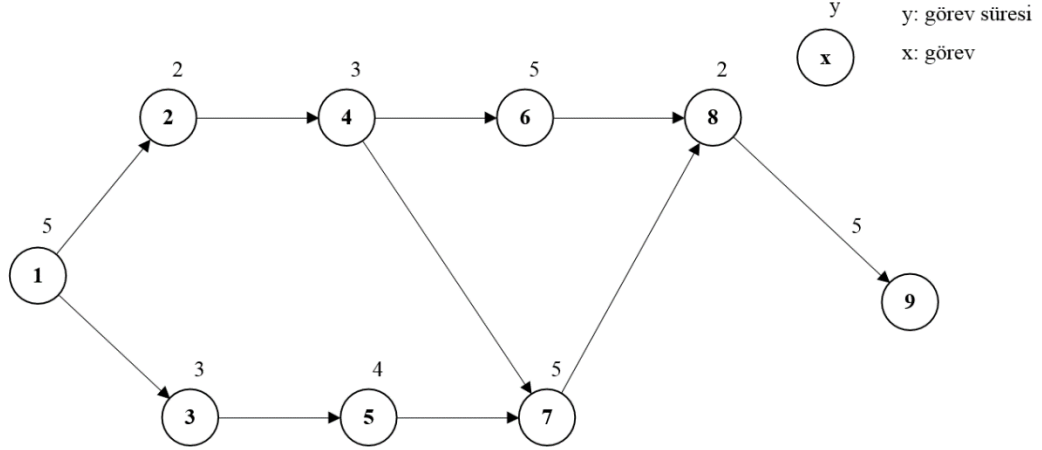
$$M_{enk} = \left\lceil \sum_{i=1}^N t_i / C \right\rceil, \quad M_{enaz} = \text{enb}\{M_{enk}, M_{olası}\} \quad (2.5)$$

- Ortalama iş istasyonu süresi: C^* ortalama iş istasyonu süresi ve M^* dengeleme sonucu elde edilen iş istasyonu sayısı olmak üzere; C^* değeri ise Denklem 2.6'da belirtildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$C^* = \left[\left(\sum_{i=1}^N t_i \right) / M^* \right] \quad M^* \geq M_{enaz}, C \geq C^* \quad (2.6)$$

- Teknolojik öncelik diyagramı (Öncelik diyagramı): Montaj işleminin ve üretilen ürünün çeşitli özelliklerine göre, üretim hattındaki bazı görevlerin birbirini takip etmesi gerekmektedir. Bu iş elemanları (görevler) arasındaki öncelik ilişkileri; herhangi bir görevin uygulanabilmesi için bazı görevlerin tamamlanması gerekliliğini ortaya koymaktadır (Sniedovich 1981). Herhangi bir ürünün montajı için gerekli görevlerin tümünün işlem sıraları ile birlikte sunulduğu grafiksel gösterimine öncelik diyagramı adı verilmektedir (Gökçen 1994). Şekil 2.8'de verilen öncelik diyagramında; dairelerin içerisindeki değerler görevlere ait

indeksleri, dairelerin üzerindeki sayılar da her bir görevin tamamlanma süresini ifade etmektedir (Foroughi ve Gökçen 2014).



Şekil 2.8. 9 görevli bir probleme ait öncelik diyagramı

- Öncelik Matrisi: Öncelik diyagramının 0-1 matris formuna dönüştürülmüş halidir. Doğrudan ve dolaylı, artçıl ve öncül ögeler öncelik matrisinin satır ve sütunlarını oluşturmaktadır.

Çizelge 2.1. Şekil 2.7'deki öncelik diyagramına ilişkin öncelik matrisi

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

- Esneklik oranı: Hat dengeleme işlemi uygulanırken öncelik yapısının oluşturulmasında kullanılan bir ölçüttür. Esneklik oranı için, elde edilebilecek

uygun sıralama sayısının bir ölçüsü de denilebilir. Öncelik ilişkisi bulunmayan bir montaj hattında esneklik oranı bire, bütün görevlerin seri şekilde birbirine bağlandığı bir montaj hattında ise sifıra eşittir. Bulunan değer sifıra ne kadar yakınsa yapılan sıralama o derece esneklikten uzaktır. “S” öncelik matrisindeki sıfır sayısını göstermek üzere esneklik oranı 2.7 numaralı denklemde belirtildiği gibi hesaplanmaktadır. Bu formülasyona göre Şekil 2.8’de verilen öncelik diyagramına ilişkin esneklik oranı 0.194’tür.

$$\text{Esneklik Oranı} = (2 * S)/(N * (N - 1)) \quad (2.7)$$

- Düzgünlük indeksi: Toplam iş yükünün montaj hattında yer alan iş istasyonları arasında ne derece düzgün dağıtıldığını göstermektedir. Düzgünlük indeksi değerinin küçülmesi daha dengeli bir hat yerleşiminin elde edildiğini göstermektedir. T_{enb} iş istasyonu sürelerinin en büyüğü ve T_j de j . istasyonun süresi olmak üzere düzgün indeksi 2.8 numaralı denklemde belirtildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\text{Düzgünlük indeksi} = \left(\sqrt{\sum_j^M (T_{enb} - T_j)^2} \right) / (M * C) \quad (2.8)$$

- Kuramsal etkinlik: Teorik olarak hesaplanan gerekli en az istasyon sayısına (M_{enaz}) göre belirlenen etkinlik indeksidir (Denklem 2.9).

$$\text{Kuramsal etkinlik} = \left[\left(\sum_{i=1}^N t_i \right) / (M_{enaz} * C) \right] \quad (2.9)$$

- Görevlerin paralelliği: Herhangi bir görevin birden fazla istasyonda işlem görebilmesine imkân tanınmasıdır (Gökçen 1994).

- İstasyonların paralelliği: Montaj hattı boyunca belirli aşamalarda birbirinin aynı donanım ve ekipmana sahip istasyonların birden fazla sayıda yer almasıdır. Bu sayede hat etkinliği arttırılmakta ve işlem süresi çevrim süresini aşan görevlerin üretim oranını sınırlandırması engellenmektedir (Gökçen 1994).
- Bölgeleme kısıtları: Bazı görevlerin aynı veya farklı istasyonlarda yer alması koşulu söz konusu olabilir. Bu gibi durumlar bölgeleme kısıtları ile sağlanmaktadır.

2.6. Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinin Sınıflandırılması

Hat dengeleme problemi, bir ürünün imalatı için gerekli olan görevlerin görevlere ait işlem sürelerinin, görevler arasındaki öncelik ilişkilerinin ve çıktı hızının bilindiği varsayılarak; toplam iş yükünün istasyonlar arasında olabildiğince eşit olarak dağıtılması amacıyla üretim hattının yeniden düzenlenmesidir. Bir hat dengeleme probleminin girdi ve çıktıları da Şekil 2.9’da belirtildiği gibidir (Dervitsiotis 1981).



Şekil 2.9. Bir hat dengeleme probleminin girdi ve çıktıları

Montaj hatlarında her bir iş istasyonu içerisinde son ürünün üretilebilmesi için gerekli bütün görevler tekrarlı bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Görevlerin istasyonlara atanması sürecinde ise; öncelik kısıtları, çevrim süresi, iş istasyonu sayısı ve görevler arasındaki birtakım ilişkilerden kaynaklanan kısıtlar dikkate alınmaktadır.

Montaj hattı dengeleme problemi (MHDP) için ilk geniş kapsamlı araştırmalardan birisi Baybars (1986a) tarafından yapılmıştır. Baybars bu çalışmasında montaj hattı dengeleme problemini; basit montaj hattı dengeleme problemi (BMHDP) ve genel montaj hattı dengeleme problemi (GMHDP) olarak iki bölüme ayırmıştır. BMHDP’de her bir iş

istasyonuna atanan tüm görevlerin işlem süreleri toplamı çevrim süresini aşmamaktadır. Bütün görevler (iş ögeleri); donanım, ekipman ve işgücü bakımından birbirine eş değer tüm istasyonlara atanabilmektedir. Bu atamalar yapılırken görevler bölünemeyeceği gibi sadece öncelik ve çevrim süresi kısıtları dikkate alınmaktadır. GMHDP ise çeşitli hat biçimleri, alan kısıtları, görevlerin arasındaki bazı uyumsuzluklar ve paralel istasyon oluşturma gibi birçok ek kısıtlama ve özellik içermektedir. Scholl ve Becker (2006) BMHDP, Becker ve Scholl (2006) ise GMHDP konusunda geniş kapsamlı birer araştırma sunmuşlardır (Tunçel ve Topaloğlu 2013).

BMHDP'nin özellikleri aşağıda verildiği gibidir (Baybars 1986a):

- i. Girdi parametreleri bellidir.
- ii. Hiçbir görev istasyonlar arasında bölünemez.
- iii. Görevler istasyonlara atanırken öncelik ilişkileri dikkate alınmalıdır.
- iv. Bütün görevler eksiksiz olarak istasyonlara atanmalıdır.
- v. Her bir iş istasyonu, bütün görevlerin yapılabilmesi için gerekli donanım ve işgücüne sahiptir. Bu sebeple bütün görevler bütün istasyonlara atanabilmektedir.
- vi. Görevlerin tamamlanma süreleri atandıkları iş istasyonları ve önceki/sonraki görevlerden bağımsızdır.
- vii. Montaj hattında istasyonların yerleşimi seri bir şekilde düzenlenmektedir.

BMDP'nin bu özelliklerini arttırmak mümkündür. Ancak bu özelliklerde değişiklik olduğunda problem GMHDP olarak değerlendirilmektedir (Baskak 1998).

Literatürde, MHDP ile ilgili olarak yapılan pek çok çalışma bulunmakla birlikte, bu çalışmalar probleminin yapısı dikkate alınarak çeşitli tiplerde incelenebilmektedir (Özkan 2003):

- i. Amaç tipi ve sayısı,
- ii. İşlem süreleri,
- iii. Ürün/Model sayısı,
- iv. Paralel tezgâh durumu,
- v. İstasyondaki işçi sayısı,
- vi. Hattın durumu,
- vii. Kaynak kısıtı,
- viii. Malzeme ikamesi,
- ix. Kusur oranlarının verilmesi durumu,
- x. Özel problemler (Öğrenme, maliyet, atanan iş öğelerinin istasyon içinde sıralanması vb.)

2.6.1. Amaç tipi ve sayısına göre sınıflandırma

MHDP, kullanılan amaç fonksiyonu tipi ve sayısı açısından da çeşitli sınıflara ayrılmaktadır (Tunçel ve Topaloğlu 2013):

- i. Tip-I: Belirli bir çevrim süresine göre kullanılacak istasyon sayısının minimize edilmesidir. Bu amaç işgücü ve donanım maliyetini en küçükmeye yöneliktir.
- ii. Tip-II: Belirli bir iş istasyonu sayısı için çevrim süresinin minimize edilmesidir. Bu amaç da birim zamandaki üretim miktarını en büyükmeye yöneliktir.
- iii. Tip-III: İş yükü dengesinin sağlanması amaçlanmaktadır.

- iv. Tip-IV: İş uyumunun sağlanması hedeflenmektedir.
- v. Tip-V: Tip-III ve Tip-IV'e dayanan çoklu amaçlardan yararlanılmaktadır.
- vi. Tip E: Kullanılan istasyon sayısı ve çevrim süresi eş zamanlı olarak minimize edilirken, hat etkinliğinin maksimizasyonu temel alınmaktadır.
- vii. Tip F: Verilen istasyon sayısı ve çevrim süresi için uygun bir dengenin bulunması amaçlanmaktadır.

2.6.2. İşlem sürelerine göre sınıflandırma

Montaj hattı dengeleme problemi için yapılan bir başka sınıflandırma ise işlem sürelerine bağlı olarak deterministik ve stokastik MHDP şeklindedir:

- i. Deterministik montaj hattı dengeleme problemi (DMHDP): Görev sürelerinin kesin olarak bilindiği varsayılmaktadır.
- ii. Stokastik montaj hattı dengeleme problemi (SMHDP): Görev sürelerinin değişken olduğu varsayılmaktadır. Görev süreleri belirli bir olasılık dağılımına bağlı olarak tanımlanmaktadır.

2.6.3. Ürün veya model sayısına göre sınıflandırma

Montaj hatlarının ürün veya model sayısına göre sınıflandırılmasına önceki bölümlerde değinilmiştir (bkz. Şekil 2.5). Montaj hattı dengeleme problemleri de benzer şekilde, ürün/model sayısına göre; tek modelli, karışık modelli ve çok modelli montaj hattı dengeleme problemleri olmak üzere üçe ayrılmaktadır.

Tek modelli montaj hatlarında tek tip ürünün yüksek miktarlarda imalatı söz konusudur. Bu tip hatlarda uygulanan hat dengeleme problemleri de tek modelli MHDP olarak ifade

edilmektedir. Günümüz üretim sistemlerinin büyük bir bölümünde ürün çeşitliliğinin yüksek olması, tek modelli montaj hatlarının kullanım sıklığını azaltmaktadır.

Karışık modelli montaj hatlarında da aynı üretim sürecine sahip benzer özellikteki ürünlerin montajı söz konusudur. Bu tip hatların dengelenmesi; ürünlere ait iş parçalarının farklılıkları, iş akışlarının eşit olmaması gibi sebeplerden ötürü tek modelli hatlara göre daha karmaşıktır. Karışık modelli montaj hatlarının ele alındığı dengeleme problemlerinde her bir ürün için ayrı bir öncelik diyagramı söz konusudur. Bu durumda da öncelik diyagramları birleştirilerek ortak bir öncelik diyagramı oluşturulmaktadır.

Çok modelli montaj hatlarında ise farklı üretim süreçlerine sahip birden fazla ürün modeli partiler halinde üretilmektedir. Bu tip hatlarda uygulanan dengeleme problemlerinde de hazırlık sürelerine dikkat edilmelidir. Karışık modelli montaj hatlarında ürünler karışık halde üretilirken, çok modelli montaj hatlarında ürünlerin ayrı ayrı ve yığınlar halinde üretimi söz konusudur. Hazırlık süreleri ve hazırlık maliyetlerine bağlı olarak her bir ürün tipine ait parti büyüklüklerinin doğru belirlenmesi gerekmektedir.

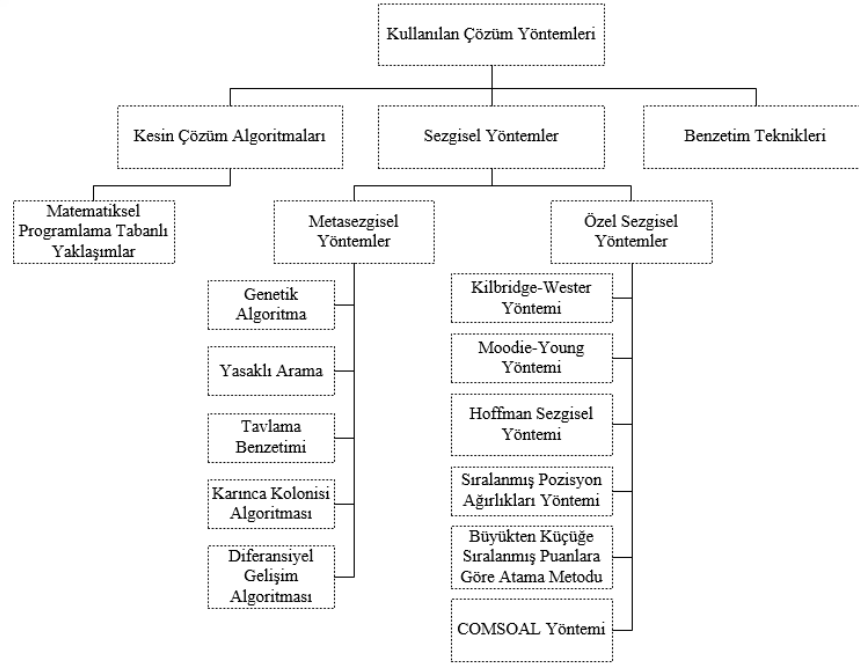
2.7. MHDP'nin Çözümünde Kullanılan Yöntemler

MHDP, başta Endüstri Mühendisliği ve Yöneylem Araştırması alanında çalışanlar olmak üzere birçok araştırmacı için 1950'li yıllardan beri halen güncelliğini koruyan önemli bir araştırma konusudur. Bu zaman dilimi içerisinde hat dengeleme problemlerinin ele alındığı sayısız çalışmada, problemin çözümüne yönelik olarak birbirinden farklı çözüm yaklaşımları kullanılmıştır. Bu çözüm yaklaşımlarını ise genel itibariyle; kesin çözüm yöntemleri, sezgisel yöntemler ve benzetim teknikleri şeklinde üç gruba ayırmak mümkündür.

Kullanılan kesin çözüm algoritmaları, matematiksel programlama tabanlı; doğrusal programlama, tamsayı programlama, hedef programlama, dal-sınır algoritması, dinamik programlama gibi yöntemleri kapsamaktadır. Yaklaşık çözüm üretmeye yönelik olarak en sık kullanılan çözüm yöntemleri ise probleme özgü sezgisel yöntemler ve probleme uyarlanmış metasezgisel yöntemlerdir. Benzetim teknikleri de modellemenin çok zor

olduğu durumlarda kullanılan, üretim sisteminin bilgisayar ortamındaki bir örneği üzerinde denemeleri mümkün kılan çözüm yöntemlerinden birisidir (Şekil 2.10).

Literatürde, MHDP'nin çözümü ile ilgili; kesin çözüm algoritmalarının (Jackson 1956, Bowman 1960, Thangavelu ve Shetty 1971, Patterson ve Albracht 1975, Van Assche ve Herroelen 1978, Talbot ve Patterson 1984, Hackman ve ark. 1989, Gökçen ve Erel 1998, Sarin ve ark. 1999, Urban ve Chiang 2006), sezgisel yöntemlerin (Kilbridge ve Wester 1961, Helgeson ve Birnie 1961, Hoffman 1963, Mansoor 1964, Arcus 1966, Baybars 1986b, Simaria ve Vilanho 2009, Chica ve ark. 2010, Chutima ve Chimklai 2012, Zacharia ve Nearchou 2013, Akpınar ve ark. 2013) ve benzetim tekniklerinin (Angelidis ve ark. 2011, Gong ve ark. 2011, Hafezalkotob ve ark. 2014, Saidabad ve Taghizadeh 2015) kullanıldığı birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda problemin çözümü için yararlanılan belli başlı yöntemler ise Şekil 2.10'da sunulduğu gibidir. MHDP konusunda yapılan araştırmalara ilişkin daha geniş kapsamlı bilgiye Becker ve Scholl (2006), Battaia ve Dolgui (2013) çalışmaları aracılığıyla ulaşmak mümkündür (Foroughi ve Gökçen 2014).



Şekil 2.10. MHDP'nin çözümünde yaygın olarak kullanılan yöntemler

2.7.1. Matematiksel programlama

Matematiksel programlama yöntemi, optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan tekniklerin başında gelmektedir. Geliştirilen yeni çözüm yaklaşımları ile birlikte matematiksel programlama yönteminin kullanımı gittikçe yaygınlaşmakta, uygulama alanı da aynı ölçüde genişlemektedir.

Matematiksel programlama yöntemi; optimizasyon problemlerine ilişkin bilinmeyenlerin değişken olarak tanımlandığı ve bu değişkenlerin bir eniyilemeyi gerçekleştirecek şekilde kısıt ve amaç fonksiyonu yapılarını oluşturduğu bir modelleme aracıdır. Matematiksel programlamada, belirli kısıtlar dâhilinde, amaç fonksiyonunu en iyiye götürecek değişken değerlerinin tespit edilmesi amaçlanmaktadır. Bir matematiksel programlama modelinin en genel hali Denklem 2.10 – Denklem 2.13’de verildiği gibidir (Bronson 1982).

Amaç Fonksiyonu (Optimizasyon):

$$\text{Optimizasyon } Z = f(x_i, x_{i+1}, \dots, \dots, \dots, x_n) \quad (2.10)$$

Kısıtlar:

$$g_i(x_i, x_{i+1}, \dots, \dots, \dots, x_n) \leq b_j \quad (2.11)$$

$$g_{i+1}(x_i, x_{i+1}, \dots, \dots, \dots, x_n) \geq b_{j+1} \quad (2.12)$$

.....

$$g_m(x_i, x_{i+1}, \dots, \dots, \dots, x_n) = b_m \quad (2.13)$$

Bir matematiksel programlama modelinin en genel hali Denklem 2.10 – Denklem 2.13’de ifade edildiği gibidir. Bu matematiksel programlama modelinin; “ n ” adet değişken, “ m ” adet kısıt ve bir amaç fonksiyonu ifadesinden oluştuğu görülmektedir. Ayrıca “ x_i ” değişkenlerine ait bazı sınırlamalar matematiksel modele ilave edilebilmektedir. “ f ” amaç

değeri, x_i karar değişkenlerinin bir fonksiyonudur ve optimize edilecek ifadeyi temsil etmektedir. “ g_m ” fonksiyonları ise problemin çözüm uzayını belirleyen kısıt yapılarını ifade etmektedir. “ f ” amaç fonksiyonu ve “ g_m ” kısıt yapılarının derecesi matematiksel modelin doğrusal nitelikte olup olmadığını belirlemektedir. Bazı matematiksel modellerde ise amaç fonksiyonuna yer verilmeyebilir. Bu tip matematiksel modeller kısıt tabanlı matematiksel programlama kapsamında değerlendirilmektedir.

Literatürde, montaj hattı dengeleme problemlerinin çözümü için geliştirilen birçok matematiksel programlama modeli yer almaktadır. Bu çalışmada da tek modelli ve deterministik işlem süreli montaj hattı dengeleme probleminin çözümü amacıyla, paralel istasyon oluşturma ve paralel görev atama yaklaşımlarının kullanıldığı, çevrim süresinin minimizasyonunu hedefleyen matematiksel programlama modeli önerileri sunulmuştur.

Çalışmanın bu bölümünde de MHDP'nin çözümünde kullanılan matematiksel programlama modellerine ilişkin ayrıntılara yer verilmiştir. Montaj hattı dengeleme probleminin çözümüne ilişkin olarak geliştirilen ilk matematiksel formülasyon Salveson'a (1955) aittir. MHDP'nin en yalın hali olan basit montaj hattı dengeleme problemi (BMHDP) için geliştirilen bu formülasyona ek olarak sonraki dönemlerde birçok matematiksel programlama modeli önerilmiştir. Bu alandaki en eski modellerden birisi Bowman (1960)'a aittir. Bowman 1960 yılındaki bu çalışmasında MHDP'nin çözümü için iki adet doğrusal programlama modeli önerisi sunmuştur. White (1961) ise Bowman (1960)'nın önerdiği modellere binary (ikili) değişkenleri ekleyerek katkıda bulunmuştur. Thangavelu ve Shetty (1971) de Bowman (1960) ve White (1961)'in önerdiği modellerden yararlanarak, daha az kısıt ve değişken sayısına sahip bir 0-1 tamsayılı programlama modeli önerisi sunmuşlardır. Patterson ve Albracht (1975) ise bazı sınır değerlerini içeren ve diğer modellerle de bağlantılı olan bir 0-1 tamsayılı programlama modeli ortaya koymuşlardır. Talbot ve Patterson (1984) da tek modelli MHDP'nin çözümü için yeni bir tamsayılı programlama modeli geliştirmişlerdir. Bu modellere ek olarak literatürde, MHDP'nin çözümünde kullanılan çok sayıda matematiksel programlama modeli mevcuttur. Ancak bu modellerin değinilmeyen diğer modellerden farkı, sonraki dönemlerde geliştirilen modellere kaynak teşkil etmeleridir.

BMHDP'nin çözümü için geliştirilen bu matematiksel modeller farklı tipte performans ölçütlerinin optimizasyonunu temel almaktadır. En yaygın kullanılan performans ölçütleri ise; daha önceki bölümlerde de ifade edilen, belirli bir çevrim süresi için istasyon sayısının en küçüklenmesi (Tip-I) ve verilen bir istasyon sayısı için çevrim süresinin en küçüklenmesi (Tip-II) şeklindedir (Gökçen 1994). İlerleyen bölümlerde de Tip-I özellikteki basit montaj hattı dengeleme problemleri BMHDP-I, Tip-II özellikteki basit montaj hattı dengeleme problemleri de BMHDP-II şeklinde ifade edilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde söz konusu performans ölçütlerini optimize etmek amacıyla geliştirilen en genel matematiksel programlama modellerine (Tip-I ve Tip-II) yer verilmiştir. Bu matematiksel modellere ilişkin temel varsayımlar şu şekildedir:

- i. Üretim hattı boyunca tek tip ürünün montajı söz konusudur.
- ii. Görevlere ait işlem süreleri sabit kabul edilmektedir.
- iii. Bütün görevler bir istasyonda başlamalı ve aynı istasyonda tamamlanmalıdır, hiçbir görev bölünemez.
- iv. Görevlere ait öncelik ilişkilerini gösteren öncelik diyagramı bilinmektedir.
- v. Her bir görev için istasyon ataması yapılırken öncelik ilişkileri dikkate alınmalıdır.
- vi. Bütün görevler açılan bütün istasyonlara atanabilmektedir.
- vii. Montaj hattında istasyonların yerleşimi seri (düz hat) olarak düzenlenmiştir.

Belirli bir çevrim süresi için kullanılan istasyon sayısının minimize edildiği birinci tip basit montaj hattı dengeleme problemi, BMHDP-I'nin bilinen geleneksel modeli için; indis, tanım kümeleri ve parametreler aşağıda belirtildiği gibidir:

İndisler:

- i görevler, $i = \{1, \dots, N\}$
 j iş istasyonları, $j = \{1, \dots, M\}$

Parametreler:

- N toplam görev sayısı
 M toplam iş istasyonu sayısı
 t_i i . görevin işlem süresi
 P_i i . görevin öncüllerini içeren küme
 C çevrim süresi

Karar Değişkenleri:

- $x_{ij} \begin{cases} 1, & i. \text{ görev, } j. \text{ istasyona atanırsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
 $y_j \begin{cases} 1, & j. \text{ istasyona en az bir görev atanırsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$

Geleneksel Tip-I (BMHDP-I) matematiksel modeline ilişkin indis, parametre ve karar değişkenleri verilmiştir. Bu modelin amaç fonksiyonu ve kısıt yapıları ise şu şekildedir:

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{Minimize } Z = \sum_{j=1}^M y_j \quad (2.14)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{j=1}^M x_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (2.15)$$

$$\sum_{i=1}^N t_i x_{ij} \leq C y_j \quad \forall j \quad (2.16)$$

$$\sum_{j=1}^M j x_{pj} \leq \sum_{j=1}^M j x_{ij} \quad \forall i, p \in P_i \quad (2.17)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \quad (2.18)$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad \forall j \quad (2.19)$$

BMHDP-I probleminin çözümü için literatürde yaygın olarak kullanılan matematiksel modelin amaç fonksiyonu kullanılan toplam istasyon sayısını minimize edecek şekilde düzenlenmiştir (Denklem 2.14). Bu sayede istasyonlarda oluşabilecek toplam atıl sürenin de en küçüklmesi amaçlanmaktadır. Denklem 2.15'te belirtilen ve atama kısıtı olarak bilinen ifade ise; bütün görevlerin yalnızca bir istasyona atanmasını sağlamaktadır. İkinci eşitsizlik ifadesi ile de bir istasyona atanan bütün görevlerin işlem süreleri toplamının çevrim süresini aşması engellenmektedir (Denklem 2.16). Denklem 2.17'de ise; (“p”, “i” nin öncülü ve P_i kümesinin elemanı olmak üzere) öncelik ilişkilerinin sağlanmasına yönelik olan kısıt yapısı verilmiştir. Matematiksel programlama modelinin son kısıt yapıları ise karar değişkenlerine ilişkin tanım kümelerini ifade etmektedir (Denklem 2.18 - Denklem 2.19).

Verilen bir istasyon sayısı için çevrim süresinin minimize edildiği ikinci tip basit montaj hattı dengeleme problemi (BMHDP-II) için:

İndisler:

i görevler, $i = \{1, \dots, N\}$

j iş istasyonları, $j = \{1, \dots, M\}$

Parametreler:

- N toplam görev sayısı
 M toplam iş istasyonu sayısı
 t_i i . görevin işlem süresi
 P_i i . görevin öncüllerini içeren küme

Karar Değişkenleri:

- x_{ij} $\begin{cases} 1, & i. \text{ görev, } j. \text{ istasyona atanırsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
 C çevrim süresi

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{Minimize } Z = C \quad (2.20)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{j=1}^M x_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (2.21)$$

$$\sum_{i=1}^N t_i x_{ij} \leq C \quad \forall j \quad (2.22)$$

$$\sum_{j=1}^M j x_{pj} \leq \sum_{j=1}^M j x_{ij} \quad \forall i, p \in P_i \quad (2.23)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \quad (2.24)$$

$$C \geq 0 \quad (2.25)$$

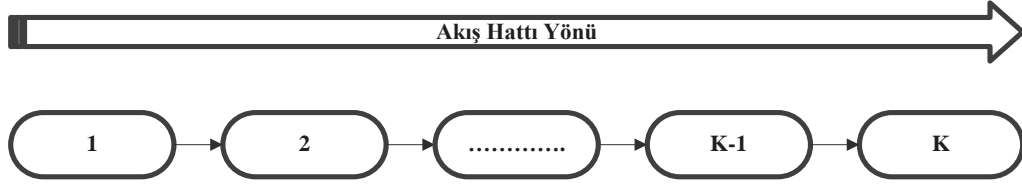
BMHDP-II probleminin çözümü için kullanılan matematiksel modelin amaç fonksiyonu ise BMHDP-I'den farklı olarak çevrim süresinin minimizasyonunu hedeflemektedir (Denklem 2.20). Asıl amaç, üretim hızını artırmak ve birim zamanda üretilen ürün miktarını en büyükmektir. Önceki modelden farklı olarak bir parametre niteliğindeki çevrim süresi BMHDP-II'de bir değişken olarak değerlendirilmektedir. Kısıt yapıları ise bazı küçük değişiklikler dışında BMHDP-I ile benzerlik göstermektedir. Daha önceki modele benzer olarak atama kısıtı (Denklem 2.21) ve öncelik ilişkileri kısıtı (Denklem 2.23) aynen korunmuştur. Denklem 2.22'de belirtilen ve çevrim süresi kısıtı olarak bilinen eşitsizlik ifadesinde ise küçük bir değişiklik yapılarak; bir istasyona atanan bütün görevlerin işlem süreleri toplamının çevrim süresini aşması engellenmektedir. Matematiksel modelin son kısıt yapıları da karar değişkenlerinin tanım kümeleri ve işaret sınırlamalarından oluşmaktadır (Denklem 2.24 – Denklem 2.25).

2.8. Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinde Paralellik Kavramı

Üretim ortamlarındaki hat yapısı, ürün çeşitliliği vb. gibi farklı koşullar montaj hatlarındaki çeşitliliği artıran en önemli unsurlardandır. Bu farklı koşullar da farklı hat dengeleme problemlerinin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Tüm bu nedenler geçmiş 1950'li yıllara dayanan MHDP'nin halen akademik düzeyde incelenmesi gereken birçok özelliğinin olduğunu göstermektedir (Becker ve Scholl 2006).

Geleneksel montaj hattı dengeleme problemlerinin ana varsayımlarından birisi Şekil 2.11'de ifade edildiği gibi hattın seri olarak düzenlenmesidir (Grzechca ve Foulds 2015). Bu anlayışa göre; her bir görev yalnızca bir istasyona atanabilmekte ve eş özellikteki birden fazla istasyon oluşturulmasına izin verilmemektedir. Montaj hatlarında istasyonların seri bir şekilde düzenlenmesi, çevrim süresinin işlem süresi en büyük görev tarafından belirlenmesine sebep olmaktadır. Bu varsayımın en büyük dezavantajı ise işlem süresi çevrim süresinden çok büyük olan görevlerin üretim hızını önemli derecede sınırlandırmasıdır. Ancak bu tez çalışmasında ele alınan paralellik kavramı ile hattın farklı şekillerde düzenlenmesine imkân tanınmaktadır. Paralellik yaklaşımı gereği bir görevin birden fazla istasyonda yer almasına veya birbiriyle aynı özelliğe sahip birden fazla istasyonun açılmasına müsaade edilmektedir. Bu sayede hat etkinliği artmakta ve

işlem süresi çevrim süresinden büyük olan görevlerin üretim oranlarını sınırlandırması önlenmektedir (Pinto ve ark. 1975, Bard 1989, Bukchin ve Tzur 2000, Bukchin ve Rubinovitz 2003, Çerçioğlu 2009).



Şekil 2.11. Geleneksel (düz) montaj hattı

Paralellik kavramı, montaj hatlarında paralel hatlar kurularak daha dengeli bir üretim sürecinin elde edilmesi ve verimliliğin artırılması amacıyla MHDP alanında nadiren de olsa kullanılan bir yaklaşımdır. Montaj hattı dengeleme problemlerinde paralellik kavramı; hat paralelliği, görev paralelliği ve istasyon paralelliği şeklinde üçe ayrılmaktadır.

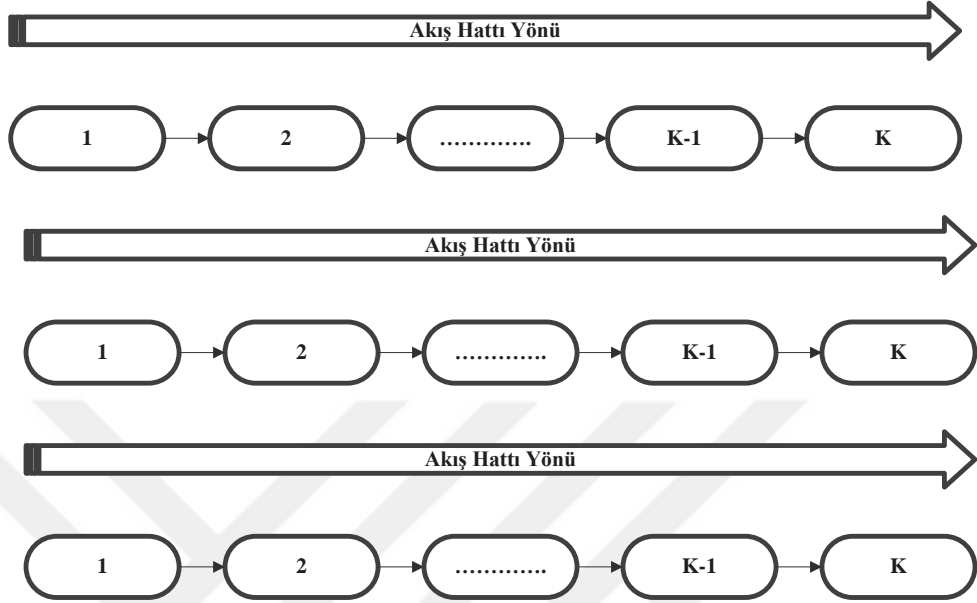
2.8.1. Hat paralelliği kavramı

Daha önceki çalışmalarda (Askin ve Zhou 1997, McMullen ve Frazier 1997, Vilarinho ve Simaria 2002, Simaria ve Vilarinho 2009) paralellik kavramına rastlanmasına rağmen paralel montaj hattı dengeleme problemi (PMHDP) konusunda yapılan ilk çalışma Gökçen ve ark. (2006)'na aittir.

PMHDP; aynı veya benzer ürünlerin montajının yapıldığı bir üretim ortamında, kullanılan kaynak miktarının en küçüklenmesi amacıyla birden fazla montaj hattının eş zamanlı olarak dengelenmesini hedefleyen yeni bir yaklaşımdır (Çerçioğlu ve ark. 2009).

Çoğu üretim sistemi birden fazla montaj hattına sahiptir. Talebin yüksek olduğu durumlarda tek bir hat talebi karşılamakta yetersiz kalabilmektedir. Böyle bir durumda Şekil 2.12'de olduğu gibi kurulacak birden fazla özdeş hattın gerekliliği ortaya çıkmaktadır (Grzechca ve Foulds 2015). Daha fazla ekipman ve donanım gerektirse de paralel bir montaj hattının kurulması iki önemli avantaj sağlamaktadır. Bu avantajlardan

ilki üretim hattının boyunun kısaltılması, ikincisi de olası bir arıza durumunda üretimde aksamanın engellenebilmesidir (Gökçen ve ark. 2006).



Şekil 2.12. Paralel montaj hattı

Paralel montaj hattı dengeleme problemi için dikkate alınan varsayımlar aşağıdaki gibidir (Gökçen ve ark. 2006):

- i. Her bir montaj hattında sadece tek tip ürün üretilmektedir.
- ii. Her bir ürüne ait öncelik diyagramı bilinmektedir.
- iii. Her bir göreve ait işlem süresi bilinmektedir.
- iv. Her bir hat için bütün istasyonlardaki operatörler her türlü işi yapabilecek beceriye sahiptir.
- v. Operatörler hattın iki tarafında da çalışabilmektedir.

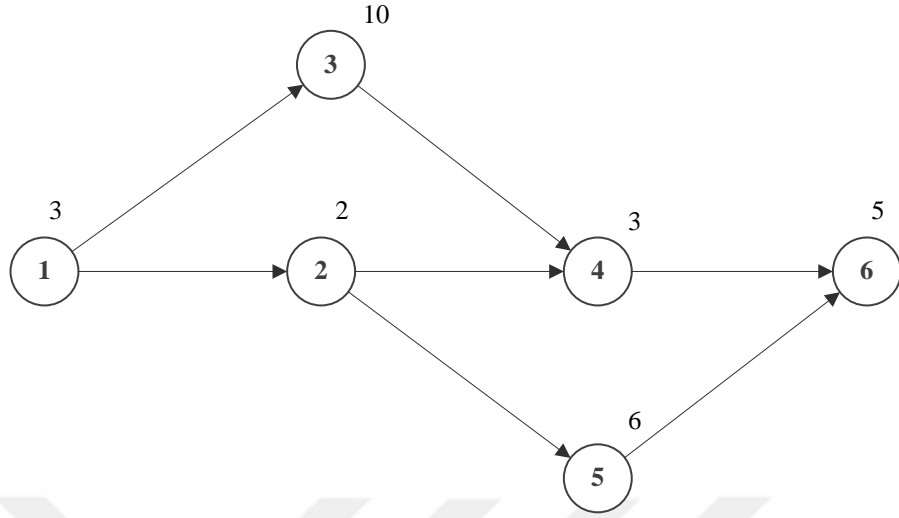
Çerçioğlu ve ark. (2009) göre paralel montaj hatlarının diğer montaj hattı yerleşimlerine göre birçok avantajı bulunmaktadır. Bunlar:

- i. Aynı veya benzer üretim sürecine sahip ürünlerin birbirine paralel bitişik hatlarda üretilebilmesi,
- ii. Ortak kaynak kullanımına olanak tanınması ile atıl sürenin en küçüklenmesi ve kaynak kullanımının artırılması,
- iii. Her bir montaj hattı için farklı çevrim sürelerinde üretim olanağı,
- iv. Operatörlerin arasındaki iletişimin artması ile önleyici tedbirlerin zamanında alınması,
- v. Kaynak gereksiniminin en küçüklenmesi,
- vi. Donanım ve ekipman maliyetlerinin azaltılması şeklindedir.

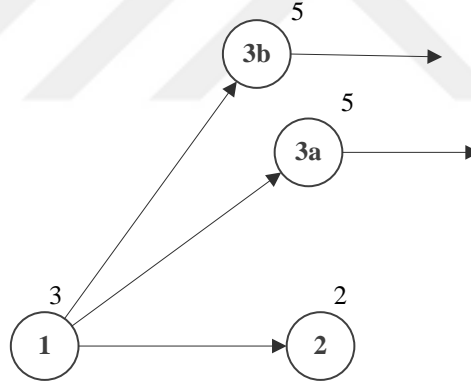
2.8.2. Görev paralelliği kavramı

Görev paralelliği; öncelik ilişkileri ve işlerin bölünememesi kuralları gözetilmek şartıyla, bazı görevlerin birden fazla istasyonda yer almasına izin verilmesini ifade etmektedir. Çerçioğlu (2009)'na göre ise görev paralelliği; bir montaj hattındaki görevlerden herhangi birisinin çevrim süresini aştığı durumlarda, görevlerin belirlenen bir paralellik seviyesi ile birden fazla istasyonda yer alacak şekilde paralel hale getirilmesidir. Kaplan (2004) tez çalışmasında görev paralelliğinden yararlanarak, tek modelli MHDP için bir dal-sınır algoritması önerisi sunmuştur. Kaplan (2004) bu çalışmada aynı zamanda, dal-sınır algoritması için bir üst sınır belirlenmesini ve büyük boyutlu problemlere yaklaşık çözüm bulunmasını sağlayan bir sezgisel algoritmaya da yer vermiştir.

Küçük bir örnek problem (Şekil 2.13) yardımıyla görev paralelliği durumunu daha iyi açıklamak mümkündür (Kaplan 2004).



Şekil 2.13. Görev paralelliği durumunun ifadesi için örnek problem



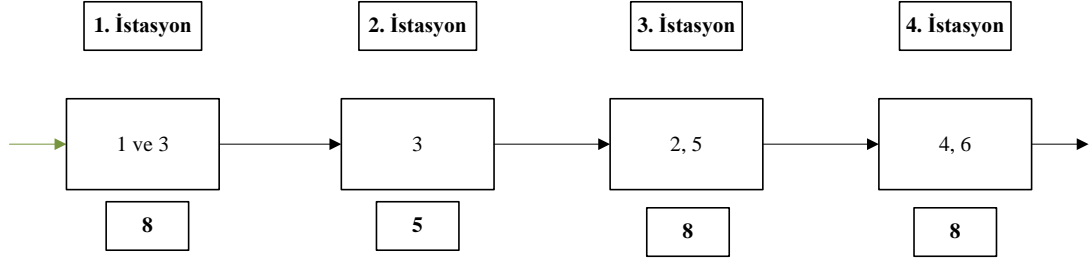
Şekil 2.14. Görev paralelliği durumunun gösterimi

Aşağıdaki eşitsizlikte de görüleceği üzere, paralel hale getirilen görevin işlem süresi görev paralelliği seviyesi oranında azaltılmış olur (Ege 2001).

$$t_i = t_{ia} + t_{ib} = t_i/2 \quad (2.26)$$

Denklem 2.26'da görüldüğü gibi, paralel halde tekrarlanan görevin işlem süresi izin verilen paralellik seviyesi kadar bölünmektedir. Şekil 2.15'te de görüldüğü üzere 3

numaralı görevin 1 ve 2 numaralı istasyonlara atanarak tekrarlandığı görülmektedir. Görev paralelliği durumu ile işlem süresi ve çevrim süresi arasındaki farkın büyük olduğu görevler birden fazla istasyona atanarak, üretim oranlarında önemli artışlar sağlanabilmektedir.



Şekil 2.15. Örnek problemin görev paralelliğine izin verilmesi durumundaki çözümü

2.8.3. İstasyon paralelliği kavramı

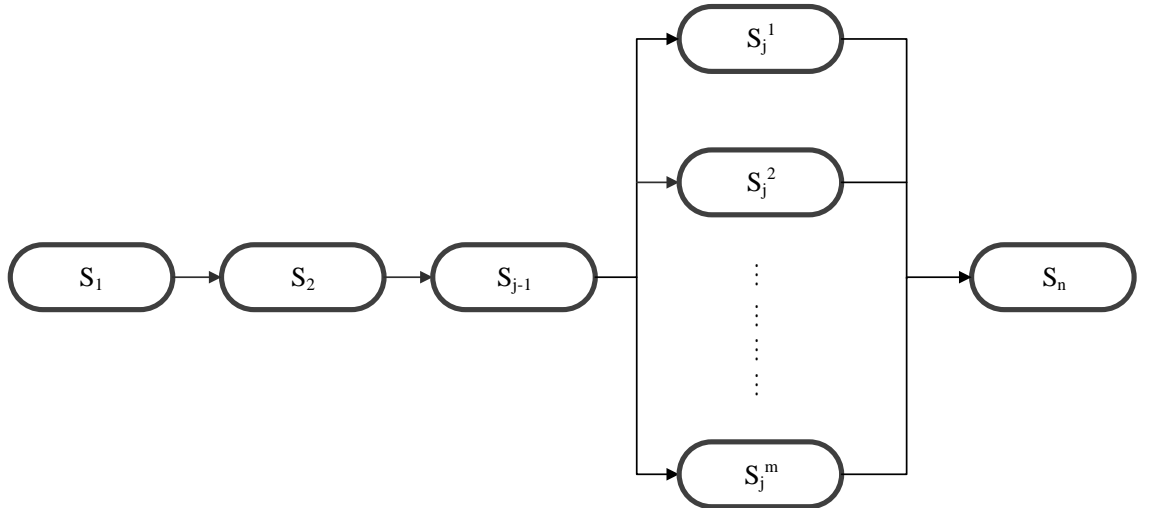
Hat dengeleme konusunda son yıllarda yapılan araştırmaların, günümüz üretim koşullarını daha iyi yansıtan ve daha gerçekçi bir problem olan GMHDP üzerine odaklandığı görülmektedir. İşletmeler, daha verimli çalışan montaj hattı süreçlerine sahip olabilmek için her zaman daha pratik çözümlere ihtiyaç duymaktadırlar. İstasyon paralelliği kavramı da MHDP'nin gelişmesine katkıda bulunacak ve gerçek hayat problemlerine pratik çözümler sağlayacak yeni bir yaklaşımdır. Tez çalışmasının bu bölümünde de montaj hattı dengeleme problemlerinde paralel istasyona izin verilen durumlar incelenmiştir.

Paralel istasyon kavramı; birbiriyle aynı ekipman ve donanıma sahip istasyonların, montaj hattının belirli aşamalarında birden fazla sayıda yer almasını ifade eden akılcı bir yaklaşımdır. Montaj hatlarında paralel istasyona izin verilerek:

- i. Görev süreleri ile çevrim süresi arasındaki farkın çok büyük olduğu durumlarda problemin çözümü kolaylaşmaktadır.
- ii. Verimlilik oranı artırılarak çevrim süresi düşürülebilmektedir (Askin ve Zhou 1997, Becker ve Scholl 2006, Tunçel ve Topaloğlu 2013).

MHDP alanında yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğunda iş istasyonlarının hat boyunca ardışık (seri) olarak düzenlendiği yerleşimler üzerine yoğunlaşmıştır. Ancak az sayıda da olsa, belirli üretim aşamalarında birden fazla eşdeğer istasyonun birbirine paralel olarak kullanıldığı hat yerleşimlerine bazı çalışmalarda rastlanmaktadır. Bu çalışmalara literatür araştırması bölümünde değinilmiştir.

Montaj hatları üzerinde paralel istasyonlar veya görevler düzenlenerek en uzun işlem süresine sahip iş parçası eş zamanlı olarak gerçekleştirilmektedir (Inman ve Leon 1994, Tunçel ve Topaloğlu 2013). Şekil 2.16’da istasyon paralelliği kavramının açıkça ifade edildiği bir görsele yer verilmiştir (Bukchin ve Rubinovitz 2003). Şekilde de görüldüğü üzere, bazı durumlarda montaj hattı boyunca sıralanmış iş istasyonlarının bir kısmı birbirine paralel olarak düzenlenebilmektedir. Şekil 2.16’da n tane aşamanın yer aldığı bir montaj hattı yerleşimi yer almaktadır. Ancak bu hattın j . aşamasındaki iş istasyonlarının birbirine paralel şekilde düzenlendiği görülmektedir. Diğer aşamalardaki iş istasyonlarının, geleneksel MHDP anlayışına uygun olarak seri şekilde düzenlendiği montaj hattında j . aşamadaki paralel istasyon sayısı paralellik seviyesini göstermektedir. Bu paralellik seviyesi ise istenilen çıktı miktarı ve istasyon çevrim süresinin değerine göre montaj hattının her bir aşamasında farklı bir değere sahip olabilmektedir.



Şekil 2.16. İstasyon paralelliği durumu

İstasyon paralelliği kavramı hat dengeleme çalışmaları açısından önemli iyileştirmeler sağlamasına rağmen; bir istasyona ekipman ve donanım bakımından eş, birden fazla istasyon daha kullanmak ek maliyetleri de beraberinde getirmektedir. Bu maliyetler mevcut hatta yeni bir istasyon eklenmesi sebebiyle ortaya çıkan; işgücü, makine, tezgâh vb. yatırımlarını içermektedir. Paralel istasyon yaklaşımının kullanabilmesi için olası maliyetler ve elde edilecek kazanımların karşılaştırılarak, bir fayda-maliyet analizinin yapılması gerekmektedir.

2.9. Literatür İnceleme Çalışmaları

Montaj hatlarının dengelenmesi fikri ilk olarak bir tez çalışmasında ortaya atılmıştır (Bryton 1954). Matematiksel ifadesi ise Salveson (1955) tarafından ortaya konulan MHDP için, ilk geniş kapsamlı araştırmalardan birisi Baybars (1986a) tarafından yapılmıştır. Literatürde montaj hattı dengeleme probleminin çeşitli türleri ile ilgili oldukça fazla çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarla ilgili ayrıntılı bilgilere, kapsamlı literatür araştırmalarının yapıldığı tarama makaleleri aracılığıyla erişilebilir (Baybars 1985, Baybars 1986a, Ghosh ve Gagnon 1989, Gagnon ve Ghosh 1991, Scholl ve Becker 2006, Becker ve Scholl 2006, Boysen ve ark. 2007). MHDP, oldukça geniş bir literatüre sahip olan araştırma alanlarından birisidir. Bu alanda yapılan önemli çalışmalara önceki bölümlerde de yer yer değinilmiştir.

Boysen ve ark. (2007) tarafından yapılan çalışmada, montaj hattı dengeleme problemleri; öncelik diyagramı özelliği (α), istasyon ve hat yerleşimi (β), amaç tipi ve sayısına (γ) göre 3 ayrı sınıfa ayrılmıştır. İstasyon ve hat yerleşimine göre yapılan sınıflandırmada ise paralellik kavramı (β_3); hat paralelliği, istasyon paralelliği, görev paralelliği ve iş paralelliği şeklinde dört grupta incelenmektedir. Hat paralelliği; birden fazla paralel hattın aynı anda dengelenmesini ifade etmektedir. İstasyon paralelliği; bir hat üzerinde birbirine denk iş istasyonlarının kullanılmasıdır. Görev paralelliği kavramı; herhangi bir görevin birden fazla istasyonda yer alabilmesini ifade etmektedir. İş paralelliği ise; hacim olarak büyük ürünlerin üretildiği montaj hatları için, aynı iş parçası üzerinde, eş zamanlı ve birbirini engellemeyecek şekilde yapılan iş paylaşımı uygulamalarını kapsamaktadır (Boysen ve ark. 2007). Bu çalışmada ele alınan paralel görev atama ve paralel istasyon oluşturma yaklaşımları da sırasıyla; görev paralelliği ve istasyon paralelliği kavramlarını

temel almaktadır. Paralel görev atama yaklaşımı, görev paralelliği durumunda olduğu gibi bazı görevlerin birden fazla istasyonda yer almasına müsaade edilerek, işlem süresi çevrim süresinden büyük olan görevlerin üretim oranını sınırlandırmasını önlemeyi amaçlamaktadır. Paralel istasyon oluşturma yaklaşımında ise montaj hattının herhangi bir aşamasında, birbirine denk birkaç istasyonun oluşturulmasına müsaade edilmektedir.

Bu tez çalışması, montaj hattı dengeleme problemlerinde görev paralelliği ve istasyon paralelliği kavramlarının kullanımını kapsamaktadır. Bu sebeple çalışmanın bu bölümünde ağırlıklı olarak, MHDP literatüründeki görev paralelliği ve istasyon paralelliği yaklaşımlarından yararlanılan araştırmalara değinilmiştir. Bu çalışmalar; görev paralelliğinden yararlanılarak yapılan çalışmalar ve istasyon paralelliğinden yararlanılarak yapılan çalışmalar olmak üzere iki başlık halinde sunulmuştur.

2.9.1. Görev paralelliğinden yararlanılarak yapılan çalışmalar

Pinto ve ark. (1975) geleneksel hatlarda seri olarak düzenlenen istasyonlar için, en büyük işlem süreli görevin üretim oranını sınırlandırdığına vurgu yapmışlardır. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde, bazı görevlerin birden fazla istasyonda yer almasına olanak tanınarak bu sınırlandırmanın esnetilebileceği üzerinde durulmuştur. Bu çalışmada öncelikle, önerilen karışık tamsayılı programlama modeli ile problemin formülasyonu yapılmıştır. Ardından, problemin çözümü için geliştirilen dal-sınır algoritmasının ayrıntıları sunulmuştur. Çalışmanın son bölümünde ise açıklamalı bir örnek problem üzerinden elde edilen sonuçlara yer verilmiştir. Son olarak da, görev paralelliği durumunun sağladığı avantajların yanı sıra, bu yaklaşımın kontrolü ve uygulaması güç bir yaklaşım olduğuna değinilmiştir.

Nanda ve Scher (1975) görev paralelliği kavramını da içerisine alan iki ayrı model geliştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar daha dengeli bir montaj hattına ulaşıldığını ve çıktı miktarının önemli derecede arttığını göstermiştir. Aynı araştırmacıların bu alandaki sonraki çalışmalarında (Nanda ve Scher 1976) ise teknolojik kısıtları da içeren bir algoritma sunulmuştur.

Kaplan (2004) tez çalışmasında görev paralelliği kavramını ayrıntılı olarak incelemiştir. Tek modelli montaj hattı probleminin ele alındığı bu çalışmada görev paralelliği yaklaşımından yararlanılırken, problemin çözümü için iki seviyeli görev paralelliğine izin verilen bir dal-sınır algoritması geliştirilmiştir. Önerilen dal-sınır algoritması toplam istasyon açma ve ekipman maliyetinin en küçüklenmesini amaçlamaktadır. Ayrıca bu çalışmada, hem önerilen dal-sınır algoritmasında bir üst sınır belirlenmesi için hem de büyük ölçekli problemlere yaklaşık bir çözüm üretilebilmesi amacıyla bir sezgisel algoritma önerisine de yer verilmiştir.

Bukchin ve Rubinovitz (2005) tarafından yapılan çalışmada karışık modelli montaj hattı dengeleme probleminin çözümü için dal-sınır algoritmasını esas alan bir çözüm önerisi sunulmuştur. Geliştirilen bu çözüm önerisi, kullanılan istasyon sayısı ve görev paralelliği maliyetinin minimizasyonunu hedeflemektedir. Çalışma sonucunda önerilen sezgisel algoritmanın geleneksel yaklaşımlardan daha başarılı çözümler ürettiği görülmüştür.

2.9.2. İstasyon paralelliğinden yararlanılarak yapılan çalışmalar

İstasyon paralelliği kavramı ilk olarak Freeman ve Jucker'in (1967) çalışmalarında kullanılmıştır. Makine, teçhizat ve donanım bakımından birbirine eş istasyonların oluşturulmasını ifade eden bu kavramın avantajlarına değinilen bu çalışmada, gereksinim duyulan ek kaynakların oluşturduğu ekstra maliyetlere de vurgu yapılmıştır. MHDP'nin en önemli varsayımlarından birisinin esnetilebilmesi fikrinin ortaya konulduğu bu çalışmada, probleme özgü herhangi bir çözüm önerisi sunulmamıştır.

Buxey (1974), pozitif bölgeleme ve negatif bölgeleme gibi kısıtların yanında istasyon paralelliği kavramını da içeren çalışmasında, sıralanmış pozisyon ağırlığı metodu ve sıralamaların rastgele üretilmesini temel alan iki sezgisel yöntem önermiştir. İki algoritma da her bir istasyona atanacak görev sayısı için bir sınır değeri içermektedir. Paralel istasyonların oluşturulması aşamasında ise çevrim süresinden büyük işlem süresine sahip görevler dikkate alınmıştır. Bu çalışmada dikkat çeken nokta ise maliyet kavramının gözardı edilmiş olmasıdır.

Pinto ve ark. (1981) paralellik kavramının, atıl sürelerin en küçüklenmesi ve üretim oranlarının arttırılması amaçları doğrultusunda kullanılabilmesine değinmişlerdir. MHDP'nin çözümü için ise karışık tamsayılı programlama modeli, dal-sınır algoritması ve dal-sınır algoritmasını temel alan bir sezgisel yöntem önerisi sunmuşlardır. Önerilen matematiksel modelin amaç fonksiyonu, ek kaynak ve işgücü maliyetinin minimizasyonunu hedeflemektedir. Sezgisel yaklaşımın ise kesin çözüm algoritmaları ile kıyaslandığında hesaplama süreleri açısından başarılı sonuçlar ürettiği görülmektedir.

Sarker ve Shantikumar (1983), hem seri hem de paralel hatların dengelenmesinde kullanılan genel bir yaklaşım önermişlerdir. Önerilen sezgisel yaklaşım işlem sürelerinin çevrim süresinden büyük ya da küçük olma durumlarını dikkate almaktadır. Bu sezgisel genel anlamda iki aşamadan meydana gelmektedir. İlk aşamada en büyük aday kuralına göre görevlerin istasyonlara atanması sağlanmaktadır. İkinci aşamada ise bu atamalar, denge kaybının en aza indirilmesi amacıyla yeniden düzenlenmektedir. Önerilen yaklaşımın ilk aşamasında, en az bir görevin çevrim süresinden büyük olduğu durumlarda paralellik kavramından faydalanılmaktadır. Sonuç olarak bu yöntem, hesaplama karmaşıklığı ve etkin çözüm üretmemesi gibi dezavantajlara sahip olsa da; seri ve paralel hatların düzenlenmesinde yararlanılabilecek alternatif yaklaşımlardan birisi olarak değerlendirilmektedir.

Bard (1989) paralel istasyon oluşturma yaklaşımını da kullanan bir dinamik programlama algoritması sunmuştur. Önerilen modelde belirli bir çevrim süresi için, kullanılan toplam istasyon sayısı ve toplam maliyetin en küçüklenmesi, hat etkinliğinin ise maksimize edilmesi amaçlanmaktadır. Bunu gerçekleştirirken maliyet bileşeni için; hem görev hem de teçhizat maliyetlerinden yararlanılmıştır. Hat etkinliği için ise çevrim süresi boyunca oluşan atıl süreler dikkate alınmıştır. Son olarak da önerilen çözüm yaklaşımının etkinliğinin, hattaki görev sayısına ve öncelik diyagramının karmaşıklığına bağlı olarak değişkenlik gösterdiğine değinilmiştir.

Udomkesmalee ve Daganzo (1989) paralel istasyon kavramını esnek montaj hatlarının tasarımında kullanmışlardır. Bu çalışmada paralel işlemcili montaj hatlarında işlem sürelerindeki değişimin iş sıralamalarına olan etkisi analiz edilmiştir.

Süer (1992) paralel istasyonlu MHDP probleminin çözümü için iki aşamalı bir algoritma önerisi sunmuştur. İlk olarak % 100 hücre etkinliğine ulaşılması durumu analiz edilmektedir. Bunun mümkün olmadığı durumda ise hücre etkinliği değeri, gerekli istasyon sayısı eldeki istasyon sayısı eşit olana kadar düşürülmektedir.

Askin ve Zhou (1997), MHDP'nin çözümü için doğrusal olmayan bir tamsayılı programlama modeli önermişlerdir. Önerilen bu model, ekipman maliyetinin minimizasyonuna yönelik olmakla birlikte, karışık modelli montaj hatlarında paralel istasyona izin veren bir yapıdadır. Ayrıca, bu çalışmada görevlerin atanması ve paralel istasyon açma kuralını temel alan bir sezgiselden de yararlanılmıştır.

McMullen ve Frazier (1997) karışık modelli hat dengeleme probleminin çözümü için basit bir sezgisel önermişlerdir. Görevlerin paralellğine izin verilen durumları da içeren modelde, işlem süreleri stokastik yapıdadır. McMullen ve Frazier (1998), bir başka çalışmalarında ise aynı problemin çözümü için tavlama benzetimi algoritmasından yararlanmışlardır. Bu çalışma sonucunda tavlama benzetimi algoritmasının, çevrim süresi performansının öncelikli olduğu durumlarda iyi sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir. Buna karşın, tasarım maliyetinin öncelikli olduğu durumlarda da diğer çözüm yöntemlerinin daha iyi çözümler ürettiği görülmüştür. İki performans ölçütünün de eşit öneme sahip olduğu durumlarda ise tavlama benzetimi algoritmasının problemin çözümü için etkin bir çözüm aracı olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Süer (1998) tarafından önerilen sezgisel algoritma ise paralel montaj hatlarında kullanılan işgücü miktarını minimize etmek ve üretim oranını arttırmayı amaçlamaktadır. Üç aşamadan oluşan bu sezgisel; montaj hattının dengelenmesini, paralel istasyonların ve paralel hatların belirlenmesini temel almaktadır. İlk aşamada görevler istasyonlara kullanılan istasyon sayısı dikkate alınarak atanmaktadır. İkinci aşamada her bir işgücü seviyesi için paralel istasyon açma alternatifleri değerlendirilmektedir. Son aşamada ise matematiksel model aracılığıyla talep oranına göre paralel hat sayıları belirlenmektedir.

Ege (2001) tarafından yapılan tez çalışmasında istasyon paralelliği kavramına ayrıntılı bir şekilde yer verilmiştir. Bu çalışmada paralel istasyon oluşturmali tek modelli montaj hattı dengeleme probleminin çözümü için bir dal-sınır algoritması önerisi sunulmuştur. Her seviyede paralelliğe müsaade eden bu algoritmanın amacı, toplam istasyon açma ve ekipman maliyetinin minimizasyonudur. Ayrıca problem için bir başlangıç çözümü olan üst sınır değerinin belirlenmesi amacıyla literatürdeki bilinen bir sezgisel yöntemden yararlanılmıştır.

Vilarinho ve Simaria (2002) karışık modelli montaj hattı dengeleme problemi için tavlama benzetimi algoritmasını kullanan iki aşamalı bir çözüm önerisi sunmuşlardır. Çalışmada önerilen paralel istasyon oluşturmali matematiksel model, bölgeleme kısıtlarını da içermektedir. Bu model, verilen çevrim süresi değeri için toplam istasyon sayısının minimizasyonuna yöneliktir. İkinci aşama olarak da istasyonlar arası iş yükünün dengelenmesi hedeflenmektedir. Çalışma sonucunda elde edilen hesaplama sonuçları, önerilen yöntemin makul süreler içerisinde iyi çözümler ürettiğini göstermektedir.

Bukchin ve Rubinovitz (2003) bu çalışmada, montaj hatlarında paralel istasyon oluşturma yaklaşımı ve ekipman seçimi üzerinde odaklanmışlardır. Genel olarak bakıldığında araştırmacılar, kullanılan istasyon sayısı ve toplam maliyetin en küçüklenmesini amaçlamışlardır. Bu çalışmada sunulan matematiksel model, bu tez çalışma kapsamında önerilen paralel istasyon oluşturma yaklaşımına benzer yapıda olması bakımından ayrıca önem arz etmektedir.

Ege ve ark. (2009) tarafından yapılan çalışmada ise paralel istasyona izin verilen durumda, MHDP'nin çözümü için toplam istasyon açma ve ekipman maliyetinin minimize edilmesi amaçlanmıştır. Önerilen dal-sınır algoritması ile orta büyüklükteki problemler için en iyi çözümlere ulaşılmıştır. Geliştirilen sezgisel algoritma ile de büyük boyutlu problemlerin çözümü için makul süreler içerisinde en iyiye yakın değerler elde edilmiştir.

Çakır ve ark. (2011) tek modelli stokastik MHDP üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada, düzgünlük indeksinin ve tasarım maliyetinin en küçüklenmesi gibi iki amaç üzerinde

durulmuştur. Paralel istasyon oluşturmaya müsaade edilen problemin çözümü için tavlama benzetimini temel alan bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir.

Araújo ve ark. (2012) tarafından yapılan çalışmada, montaj hattı dengeleme ve işgücü atama problemi için iş paylaşımı ve paralel istasyon oluşturma olmak üzere iki yeni yaklaşıma yer verilmiştir. Problemlerin çözümü için ise yeni bir doğrusal programlama modeli ve sezgisel algoritma önerisi sunulmuştur.

Chutima ve Kid-Arn (2012), paralel istasyonlu ve çok amaçlı U tipi montaj hattı dengeleme probleminin çözümü için parçacık sürü optimizasyonu tabanlı bir çözüm önerisi sunmuşlardır. Çalışma sonucunda önerilen çözüm yaklaşımının yakınsama hızının diğer yaklaşımlara göre daha hızlı olduğu belirlenmiştir.

Aydemir-Karadağ ve Türkbey (2013) bu alanda yapılan diğer çalışmaların aksine çok amaçlı stokastik demontaj hattı dengeleme problemini incelemiştir. Bu çalışmada, paralel istasyon oluşturma kavramının da kullanıldığı problemin çözümü için yeni bir genetik algoritma önerisi sunulmuştur.

Tunçel ve Topaloğlu (2013) bağımlı işler, iş parçasının pozisyonuna göre atama ve paralel istasyon kısıtlarını içeren MHDP için 0-1 tamsayılı programlama modeli önermişlerdir. Modelin amaç fonksiyonu hat etkinliğinin en büyüklenmesi ve gerekli işgücü miktarının en küçüklenmesine yöneliktir. Önerilen bu model, elektronik cihaz üretimi yapan bir firmada gerçekleştirilen uygulama çalışması ile de desteklenmiştir.

Öztürk ve ark. (2013) paralel istasyon oluşturmaya izin verilen karışık modelli MHDP'nin dengelenmesi ve çizelgelenmesi için karışık tamsayılı programlama modeli önerisi sunmuşlardır. Büyük boyutlu gerçek hayat problemleri için ise problemin daha küçük parçalara ayrılarak çözülmesinin hesaplama karmaşıklığını azalttığı görülmektedir. Çalışmanın sonunda ise, önerilen çözüm yöntemleri farklı büyüklükteki örnek problemler ile test edilmiştir.

Öztürk ve ark. (2015), günümüz piyasa koşulları dikkate alındığında, talep dalgalanmalarına kolay adaptasyon ve sistem güvenilirliğinin artırılması amacıyla geleneksel montaj hattı yönetimi metotlarının geliştirilmesi gerektiğini savunmuşlardır. Bu çalışmada da önceki çalışmalarından farklı olarak, paralel istasyonlu karışık modelli montaj hattı dengeleme ve çizelgeleme probleminin çözümü için yeni bir kısıt programlama modeli önermişlerdir. Önerilen modelin performansını test etmek amacıyla da çok sayıda örnek problemden yararlanmışlardır.



3. MATERYAL ve YÖNTEM

Montaj hatlarında üretim oranını arttırmak için farklı stratejiler mevcuttur. Bu stratejiler: Fazla mesai, fason üretim, tampon stok ve paralellik yaklaşımı olarak sıralanabilmektedir (Akagi ve ark. 1983). Pinto ve ark. (1975) paralellik yaklaşımının bu stratejiler arasındaki en az maliyetli seçenek olduğunu savunmuşlardır (Çerçioğlu 2009).

Çalışmanın bu bölümünde montaj hatlarında üretim hızını artırmak ve oluşabilecek darboğazları önlemek amacıyla kullanılacak, görev ve istasyon paralelliği kavramlarını temel alan iki yeni çözüm önerisi: Paralel görev atama ve paralel istasyon oluşturma yaklaşımları sunulmuştur.

3.1. Paralel Görev Atama Yaklaşımı

Paralel görev atama yaklaşımı görev paralelliği kavramından yararlanılarak geliştirilmiştir. İşlerin (görevlerin) bölünememesi varsayımı korunarak bazı görevlerin birden fazla istasyonda yer almasına imkân tanıyan bu yaklaşım ile önemli kazançlar elde edilebilmektedir. Uygulanan bu işlem ile geleneksel montaj hattı dengeleme yaklaşımlarının en önemli varsayımlarından birisi olan her bir görevin yalnızca bir istasyona atanabilmesi şartı esnetilmektedir.

Bu yaklaşım sayesinde; üretim oranını sınırlandıran büyük işlem süreli görevlerin işlem süreleri, belirlenen seviyelere göre azaltılmaktadır. Ancak görev süreleri çevrim süresinden büyük olan operasyonların paralel hale getirilmesinin yanında, işlem sürelerinin çevrim süresini aşmadığı durumlarda da bu yaklaşım kullanılarak verimli sonuçlar elde edilebilmektedir (Çerçioğlu 2009).

3.1.1. Paralel görev atamalı hat dengeleme modeli

Tez çalışmasının bu bölümünde, daha önceki çalışmalarda yer almayan ve çevrim süresinin minimizasyonunu hedefleyen, paralel görev atamalı bir matematiksel programlama modeli önerisi sunulmuştur. Bu model geliştirilirken, Kaplan (2004) tarafından önerilen, iki seviyeli paralel görev atamaya izin veren, toplam istasyon açma

ve ekipman maliyetinin en küçüklenmesini amaçlayan matematiksel modelden yararlanılmıştır. Verilen bir istasyon sayısı için çevrim süresinin minimize edildiği paralel görev atamalı hat dengeleme modeli bazı varsayımlara dayanmaktadır:

- i. Üretim hattı boyunca tek tip ürünün montajı söz konusudur.
- ii. Bütün görevler en az bir istasyona atanmalıdır.
- iii. Görevlere ait işlem süreleri sabit kabul edilmektedir.
- iv. Görevlere ait öncelik ilişkilerini gösteren öncelik diyagramı bilinmektedir.
- v. Öncelik diyagramından elde edilen öncelik ilişkileri görevlerin istasyonlara atanmasında dikkate alınmaktadır. Eğer “ p ” görevi öncelik diyagramında “ i ” görevinden önce geliyorsa, “ p ” görevi tamamlanmadan “ i ” görevi başlayamaz.
- vi. Görevler bölünemez. Ancak bazı görevler birden fazla istasyona atanabilmektedir. Bu çalışmada önerilen matematiksel model için bir görev en fazla iki istasyonda yer alabilmektedir.
- vii. Atanan her bir görev için ekipman, donanım vb. maliyetler dikkate alınmamaktadır. Bu sebeple, birden fazla istasyona atanabilecek toplam görev sayısı için sınırlama getirilmiştir.

Önerilen paralel görev atamalı hat dengeleme modelinde kullanılan notasyona ilişkin,

İndisler:

i görevler, $i = \{1, \dots, N\}$

j iş istasyonları, $j = \{1, \dots, M\}$

Parametreler:

N	toplam görev sayısı
M	toplam iş istasyonu sayısı
t_i	i . görevin işlem süresi
P_i	i . görevin öncüllerini içeren küme
U	paralel görev sayısının üst sınırı

Karar Değişkenleri:

C	çevrim süresi
x_{ij}	$\begin{cases} 1, & i. \text{ görev, } j. \text{ istasyona atanırsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
y_i	$\begin{cases} 1, & i. \text{ görev birden fazla istasyona atanırsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
z_{ij}	$x_{ij} \cdot y_i$ (modelin doğrusallaştırılması için kullanılmıştır.)

Paralel görev atama yaklaşımını temel alan matematiksel modele ilişkin indis, parametre ve karar değişkenleri verilmiştir. Önerilen bu modelin amaç fonksiyonu ve kısıt yapıları ise şu şekilde düzenlenmiştir:

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{Minimize } Z = C \quad (3.1)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{j=1}^M x_{ij} \geq 1 \quad \forall i \quad (3.2)$$

$$\sum_{j=1}^M x_{ij} \leq 2 \quad \forall i \quad (3.3)$$

$$x_{ij} \leq 1 - x_{pn} \quad \forall i, j, p \in P_i, n (n \geq j+1) \quad (3.4)$$

$$\sum_{i=1}^N z_{ij} \left(\frac{t_i}{2}\right) + \sum_{i=1}^N (x_{ij} - z_{ij}) t_i \leq C \quad \forall j \quad (3.5)$$

$$z_{ij} - x_{ij} - y_i + 1,5 \geq 0 \quad \forall i, j \quad (3.6)$$

$$1,5(z_{ij}) - x_{ij} - y_i \leq 0 \quad \forall i, j \quad (3.7)$$

$$\sum_{j=1}^M x_{ij} - 1 = y_i \quad \forall i \quad (3.8)$$

$$\sum_{i=1}^N y_i \leq U \quad (3.9)$$

$$x_{ij}, z_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \quad (3.10)$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad \forall i \quad (3.11)$$

$$C \geq 0 \quad (3.12)$$

Paralel görev atamalı montaj hattı dengeleme probleminin çözümü için geliştirilen matematiksel programlama modelinin amaç fonksiyonu çevrim süresinin minimizasyonunu hedeflemektedir (Denklem 3.1). Bilindiği üzere Tip-II MHDP modellerinin genel amacı üretim hızını artırmak, bir başka deyişle; birim zamanda üretilen ürün miktarını olabilecek en üst seviyeye taşımaktır. Bu matematiksel modelin diğer Tip-II modellerinden farkı ise bazı görevlerin birden fazla istasyona atanmasına müsaade edilmesidir.

Matematiksel modelin kısıt yapıları, paralel görev atama yaklaşımından kaynaklanan bazı farklılıklar dışında geleneksel MHDP'nin çözümü için önerilen diğer matematiksel

modellerle benzerlik göstermektedir. İlk iki kısıt her bir görevin en az bir, en fazla iki istasyona atanmasını sağlamaktadır (Denklem 3.2 - Denklem 3.3). Bu kısıtlar, önerilen paralel görev atamalı matematiksel modelin iki seviyeli atamaya izin verdiğini göstermektedir. 3.4 numaralı eşitsizlikte ise (“ p ”, “ i ” nin öncülü ve P_i kümesinin elemanı olmak üzere) öncelik ilişkilerinin sağlanmasına yönelik olan kısıt yapısı verilmiştir (Kaplan 2004). 3.5 numaralı eşitlikte verilen çevrim süresi kısıtı ise bazı görevlerin iki istasyonda yer alabilmesi durumuna göre düzenlenmiştir. Bu sayede birden fazla istasyonda yer alan görevin işlem süresi paralellik seviyesi kadar bölünmektedir (Kaplan 2004). Denklem 3.5’te belirtildiği gibi çevrim süresi kısıtı ile bir istasyona atanan bütün görevlerin işlem süreleri toplamının çevrim süresini aşması engellenmektedir. Bu kısıt yapısı standart haliyle 3.13 numaralı eşitsizlikte belirtildiği gibidir. Ancak bu kısıtın önerilen modelin doğrusallık özelliğini bozması sebebiyle 3.14’te verilen dönüşüm uygulanmıştır (Mahdavi ve ark. 2007). 3.6 ve 3.7 numaralı denklemler de doğrusallığın sağlanması amacıyla kullanılmıştır. 3.8 numaralı denklem ile ifade edilen kısıt yapısı ise karar değişkenlerinin birbirine bağlanması amacıyla kullanılmaktadır. Denklem 3.9’da verilen kısıt ile de bir üst sınır değeri (U) kullanılarak paralel hale getirilen görev sayısı sınırlandırılmaktadır. Paralel görev atamalı matematiksel programlama modelinin son kısıt yapıları da karar değişkenlerinin tanım kümeleri ve işaret sınırlamalarından oluşmaktadır (Denklem 3.10 - Denklem 3.12).

Önerilen matematiksel modelde çevrim süresi kısıtının standart hali Denklem 3.13’te belirtilmiştir. Ancak Denklem 3.13’ün önerilen matematiksel modelin doğrusallık özelliğini bozduğu açıkça görülmektedir. Bu sebeple 3.13 numaralı denklemin doğrusallaştırılması amacıyla Denklem 3.14’te verilen dönüşümden yararlanılmıştır.

$$\sum_{i=1}^N x_{ij} \cdot y_i \left(\frac{t_i}{2} \right) + \sum_{i=1}^N (1 - y_i) x_{ij} \cdot t_i \leq C \quad \forall j \quad (3.13)$$

$$x_{ij} \cdot y_i = z_{ij} \quad \forall i, j \quad (3.14)$$

Paralel görev atama yaklaşımının uygulandığı matematiksel programlama modeli önerisine ilişkin ayrıntılar Denklem 3.1 – Denklem 3.12 ile ifade edilmiştir. Bu model

montaj hattı dengeleme problemlerinde görev paralelliği kavramını içeren daha önceki çalışmalarla bağlantılı olarak tasarlanmıştır. Bu çalışmanın aksine bu yaklaşımın kullanıldığı daha önceki çalışmaların büyük çoğunluğunda, ekipman ve donanım maliyetlerinin minimizasyonu hedeflenmiştir (Pinto ve ark. 1975, Sarker ve Shanthikumar 1983, Kaplan 2004). Bunun sebebi ise görevlerin birden fazla istasyonda yer almasından kaynaklı olarak ekstra maliyetlerin ortaya çıkmasıdır. Bu durumda söz konusu maliyetler ve üretim oranındaki artıştan elde edilen kazanç miktarının karşılaştırılarak fayda-maliyet analizinin yapılması gerekmektedir.

3.2. Paralel İstasyon Oluşturma Yaklaşımı

Geleneksel montaj hattı dengeleme problemlerinde istasyonların seri bir şekilde düzenlendiği ve paralel bir yerleşime izin verilmediği önceki bölümlerde ifade edilmiştir. Geleneksel montaj hattı dengeleme anlayışı gereği her bir görev, seri bir şekilde düzenlenen istasyonlardan sadece birisine atanabilmektedir. Bu anlayışın en büyük dezavantajı, işlem süresi çevrim süresinden büyük olan görevlerin üretim hızını sınırlandırmasıdır. Paralel istasyon oluşturma yaklaşımı ile montaj hattının herhangi bir aşamasında birbirine denk birkaç istasyonun oluşturulması sayesinde işlem süresi çevrim süresinden büyük görevlerin üretim oranını sınırlandırması engellenebilmektedir.

Paralel istasyon oluşturma yaklaşımı MHDP literatüründe çok fazla çalışılan bir konu değildir. Buna karşın, bazı istasyonların birbirine paralel olarak birden fazla şekilde üretim hattında yer almasının önemli faydalar sağladığı bilinmektedir (Buxey 1974, Bard 1989). Bu faydalardan ilki, iş istasyonlarında oluşabilecek atıl sürenin paralel istasyonlar yardımıyla azaltılmasıdır. Bir diğer önemli fayda ise çevrim süresinin azaltılarak üretim oranının artırılmasıdır. Bunlara ek olarak, bir istasyona paralel konumda birbirine eş özellikteki birden fazla istasyonun oluşturulması sayesinde, hatta meydana gelebilecek olası arızaların üretimi aksatması engellenebilmektedir (Bukchin ve Rubinovitz 2003). Paralel istasyon oluşturma yaklaşımının sağladığı faydalar ve uygulama kolaylığı sayesinde MHDP literatürü genişlik kazanacak ve hat dengeleme problemlerinin çözümünde daha verimli sonuçlar elde edilecektir.

3.2.1. Sınırlandırılmış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli

Çalışmanın bu bölümünde, paralel istasyon oluşturma yaklaşımının kullanıldığı bir matematiksel programlama modeli önerisi sunulmuştur. Çevrim süresinin minimizasyonunu hedefleyen sınırlandırılmış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli sayesinde literatürdeki önemli bir eksiklik giderilmiştir. Bu model geliştirilirken, Bukchin ve Rubinovitz (2003) tarafından önerilen, paralel istasyon oluşturma yaklaşımının kullanıldığı, açılan istasyon sayısının ve toplam maliyetin en küçüklenmesini amaçlayan matematiksel modelden yararlanılmıştır.

Önerilen sınırlandırılmış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeline ilişkin varsayımlar şunlardır:

- i. Üretim hattı boyunca tek tip ürünün montajı söz konusudur.
- ii. Bütün görevler en az bir istasyona atanmalıdır.
- iii. Görevlere ait işlem süreleri sabit kabul edilmektedir.
- iv. Görevlere ait öncelik ilişkilerini gösteren öncelik diyagramı bilinmektedir.
- v. Öncelik diyagramından elde edilen öncelik ilişkileri görevlerin istasyonlara atanmasında dikkate alınmaktadır. Eğer “ p ” görevi öncelik diyagramında “ i ” görevinden önce geliyorsa, “ p ” görevi tamamlanmadan “ i ” görevi başlayamaz.
- vi. Görevler bölünemez. Ancak bazı görevler, montaj hattının herhangi bir aşamasında, birbirine paralel şekilde yer alan donanım ve ekipman bakımından birbirine eş değer birden fazla istasyonda yer alabilmektedir.
- vii. Montaj hattı boyunca gerekli aşama sayısı ve her bir aşama için izin verilen paralel istasyon sayısı önceden tanımlanmıştır.

viii. Önerilen matematiksel modelde çevrim süresinin minimize edilmesi için paralel istasyon oluşturulması sonucunda ortaya çıkabilecek; işgücü, ekipman, makine, teçhizat vb. maliyetleri dikkate alınmamıştır. Bu maliyetler göz ardı edilmiş ve bunun yerine açılan toplam istasyon sayısını sınırlandırmak amacıyla bir üst sınır değeri tanımlanmıştır.

Verilen bir istasyon sayısı için çevrim süresinin minimize edildiği paralel istasyon oluşturmaya izin verilen matematiksel programlama modeline ilişkin; karar değişkenleri, parametreleri, indisleri ve tanım kümeleri aşağıda verilmiştir. Önerilen modelde kullanılan notasyona ilişkin,

İndisler:

i görevler, $i = \{1, \dots, N\}$

j bir aşamada yer alan paralel istasyon sayısı, $j = \{1, \dots, M\}$

k aşamalar, $k = \{1, \dots, K\}$

Parametreler:

N toplam görev sayısı

M bir aşamadaki toplam iş istasyonu sayısı

K bir hattaki toplam aşama sayısı

t_i i . görevin işlem süresi

P_i i . görevin öncüllerini içeren küme

$hmaks$ montaj hattı boyunca (paralel istasyonlar da dâhil) kullanılacak maksimum istasyon sayısı

G büyük bir sayı değeri

Karar Değişkenleri:

$x_{ik} \begin{cases} 1, & i. \text{ görev } k. \text{ aşamaya atanırsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$

- y_{kj} $\begin{cases} 1, & k. \text{ aşamada } j \text{ sayıda istasyon yer alıyorsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
 C çevrim süresi

Paralel istasyon oluşturma yaklaşımının matematiksel modeline ilişkin indis, parametre ve karar değişkenleri verilmiştir. Önerilen bu modelin amaç fonksiyonu ve kısıt yapıları ise şu şekilde düzenlenmiştir:

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{Minimize } Z = C \quad (3.15)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{k=1}^K x_{ik} = 1 \quad \forall i \quad (3.16)$$

$$\sum_{k=1}^K k x_{pk} \leq \sum_{k=1}^K k x_{ik} \quad \forall i, p \in P_i \quad (3.17)$$

$$\sum_{i=1}^N t_i x_{ik} \leq jC + G(1 - y_{kj}) \quad \forall k, j \quad (3.18)$$

$$\sum_{j=1}^M y_{kj} = 1 \quad \forall k \quad (3.19)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M j y_{kj} \leq hmaks \quad (3.20)$$

$$x_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i, k \quad (3.21)$$

$$y_{kj} \in \{0,1\} \quad \forall k, j \quad (3.22)$$

$$C \geq 0 \quad (3.23)$$

Bu alanda yapılan önceki çalışmalardan farklı olarak; geliştirilen sınırlandırılmış paralel istasyon oluşturmali matematiksel programlama modelinin amaç fonksiyonu, çevrim süresinin minimizasyonunu hedeflemektedir (Denklem 3.15). Bu matematiksel modelin, çevrim süresinin en küçüklenmesini amaçlayan Geleneksel Tip-II montaj hattı dengeleme modelinden farkı ise paralel istasyon oluşturma yaklaşımını temel almasıdır. Bu yaklaşım sayesinde; üretim hızını sınırlandıran, işlem süresi ve çevrim süresi arasındaki farkın çok büyük olduğu bazı görevlerin sebep olduğu bu dezavantajı ortadan kaldırmak amacıyla donanım ve ekipman bakımından birbirine eş (paralel) istasyonlar oluşturulmaktadır.

Önerilen matematiksel modelin kısıt yapıları; atama, öncelik ilişkileri, çevrim süresi kısıtları ve paralel istasyon yaklaşımı gereği geliştirilen eşitsizliklerden oluşmaktadır. 3.16 numaralı kısıt ile her bir görevin montaj hattı üzerindeki bir aşamaya kesinlikle atanması sağlanmaktadır. Devamındaki kısıt yapısında ise her bir aşama için atamalar yapılırken görevler arasındaki öncelik ilişkilerinin (“ p ”, “ i ” nin öncülü ve P_i kümesinin elemanı olmak üzere) ihlal edilmesi engellemektedir (Denklem 3.17). 3.18 numaralı kısıt ise çevrim süresi kısıtı olarak bilinmektedir. Bu kısıt yapısı sayesinde herhangi bir aşamada, ihtiyaç duyulduğu kadar paralel istasyonun açılmasına imkân tanınmaktadır. Denklem 3.19’da ise bir montaj hattı sürecinde bulunacak istasyon sayısının teklik özelliğini tanımlamaktadır. Bir sonraki kısıt ile de montaj hattı boyunca kullanılabilir toplam istasyon sayısının önceden belirlenen bir üst sınır değerini aşmaması sağlanmaktadır (Denklem 3.20). Önerilen matematiksel programlama modelinin son kısıt yapılarını da karar değişkenlerinin tanım kümeleri ve işaret sınırlamaları oluşturmaktadır (Denklem 3.21 - Denklem 3.23).

3.2.2. Sınırlandırılmamış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli

Önceki bölümlerde de değinildiği üzere; paralel istasyon oluşturma yaklaşımı, montaj hattının bazı aşamalarında birbirine eş istasyonların açılmasına imkân tanımaktadır. Bu sayede işlem süresi diğer görevlerin sürelerinden aşırı derecede büyük olan görevlerin üretim oranını sınırlandırmasının önüne geçilmektedir.

Paralel istasyon oluşturma yaklaşımını temel alarak geliştirilen matematiksel programlama modeli Denklem 3.15 - Denklem 3.23'te ayrıntıları ile açıklanmıştır. Dikkatli olarak incelenirse, bu modelde; bir aşamada oluşturulan paralel istasyon sayısı (M) için bir st sınırın belirlendiği, hattaki aşama sayısı (K)'nın ise sabit olarak tanımlandığı görülmektedir. K ve M parametrelerinin önceden tanımlanarak modele eklenmesi, dışarıdan bir müdahale olmadan optimum çevrim süresinin bulunmasını engellemektedir. Bu çalışmada asıl amaçlanan K ve M gibi parametrelerin değerleri girilmeden, çevrim süresini minimize edecek şekilde hattaki aşama sayısı ve paralel istasyon sayısının model tarafından otomatik olarak belirlenmesidir. Ancak nerilen modelde bu parametreler sabitlenmiştir. Dolayısıyla bundan sonraki aşamada, K ve M parametrelerinin değerlerinin modele önceden girilmeden, modelin bu değerleri otomatik olarak belirlemesi sağlanmalıdır. Böylece daha esnek bir model yapısının elde edilmesi mümkün olacaktır.

Önerilen sınırlandırılmamış paralel istasyon oluşturmalı hat dengeleme modeline ilişkin varsayımlar ise şu şekilde düzenlenmiştir:

- i. Üretim hattı boyunca tek tip ürünün montajı söz konusudur.
- ii. Bütün görevler eksiksiz bir şekilde, en az bir istasyona atanmalıdır.
- iii. Görevlere ait işlem süreleri sabit kabul edilmektedir.
- iv. Görevlere ait öncelik ilişkilerini gösteren öncelik diyagramı bilinmektedir.
- v. ncelik diyagramından elde edilen öncelik ilişkileri görevlerin istasyonlara atanmasında dikkate alınmaktadır. Eğer " p " görevi öncelik diyagramında " i " görevinden önce geliyorsa, " p " görevi tamamlanmadan " i " görevi başlayamaz. Dolayısıyla " p " görevi " i " görevinin atandığı istasyondan sonraki istasyonlara atanamaz.

- vi. Görevler bölünemez. Ancak bazı görevler, montaj hattının herhangi bir aşamasında, birbirine paralel şekilde yer alan donanım ve ekipman bakımından birbirine eş değer birden fazla istasyonda yer alabilmektedir.
- vii. Montaj hattı boyunca gerekli toplam istasyon sayısı önceden tanımlanmıştır. Hattaki aşama ve paralel istasyon sayısı ise bu üst sınıra eşitlenerek serbest bırakılmıştır. Dolayısıyla aşama sayısı ve paralel istasyon sayısı bu üst sınırı ihlal etmemek şartıyla model tarafından belirlenmektedir.
- viii. Önerilen matematiksel modelde çevrim süresinin minimizasyonu hedeflendiği için paralel istasyon oluşturulması sonucunda ortaya çıkabilecek; işgücü, ekipman, makine, teçhizat vb. maliyetleri dikkate alınmamıştır. Bu maliyetler gözardı edilmiş ve bunun yerine açılan toplam istasyon sayısını sınırlandırmak amacıyla bir üst sınır değeri tanımlanmıştır.

Çalışmanın bu bölümünde de K ve M parametrelerinin önceden belirlenerek bu parametrelerin sınırlandırıldığı modelde (Denklem 3.15 – Denklem 3.23) bazı düzenlemeler yapılarak, bu parametre değerlerinin açık bırakılması, bu sayede aşama sayısı ve paralel istasyon sayısı değerlerine modelin otomatik olarak karar vermesi sağlanmıştır. Denklem 3.15 – Denklem 3.23'te verilen matematiksel modelin düzenlenmesi ile oluşturulan, sınırlandırılmamış paralel istasyon oluşturmali matematiksel programlama modelinin ayrıntıları ve modelde kullanılan notasyon aşağıda sunulduğu gibidir:

İndisler:

i görevler, $i = \{1, \dots, N\}$

j bir aşamada yer alan paralel istasyon sayısı, $j = \{1, \dots, M\}$

k aşamalar, $k = \{1, \dots, K\}$

Parametreler:

N	toplam görev sayısı
M	bir aşamadaki toplam iş istasyonu sayısı
K	bir hattaki toplam aşama sayısı
t_i	i . görevin işlem süresi
P_i	i . görevin öncüllerini içeren küme
$hmaks$	montaj hattı boyunca (paralel istasyonlar da dâhil) kullanılacak maksimum istasyon sayısı
G	büyük bir sayı değeri

Karar Değişkenleri:

x_{ik}	$\begin{cases} 1, & i. \text{ görev } k. \text{ aşamaya atanırsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
y_{kj}	$\begin{cases} 1, & k. \text{ aşamada } j \text{ sayıda istasyon yer alıyorsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
C	çevrim süresi

Sınırlandırılmamış paralel istasyon oluşturma yaklaşımının matematiksel modeline ilişkin indis, parametre ve karar değişkenleri sunulmuştur. Denklem 3.15 – Denklem 3.23’te sunulan matematiksel modelin üzerinde yapılan değişikliklerle birlikte, önerilen yeni modelin amaç fonksiyonu ve kısıt yapıları ise aşağıdaki gibi düzenlenmiştir:

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{Minimize } Z = C \quad (3.24)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{k=1}^K x_{ik} = 1 \quad \forall i \quad (3.25)$$

$$\sum_{k=1}^K k x_{pk} \leq \sum_{k=1}^K k x_{ik} \quad \forall i, p \in P_i \quad (3.26)$$

$$\sum_{i=1}^N t_i x_{ik} \leq jC + G(1 - y_{kj}) \quad \forall k, j \quad (3.27)$$

$$\sum_{j=1}^M y_{kj} \leq 1 \quad \forall k \quad (3.28)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{ik} \leq \sum_{j=1}^M y_{kj} \cdot G \quad \forall k \quad (3.29)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M j y_{kj} \leq hmaks \quad (3.30)$$

$$x_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i, k \quad (3.31)$$

$$y_{kj} \in \{0,1\} \quad \forall k, j \quad (3.32)$$

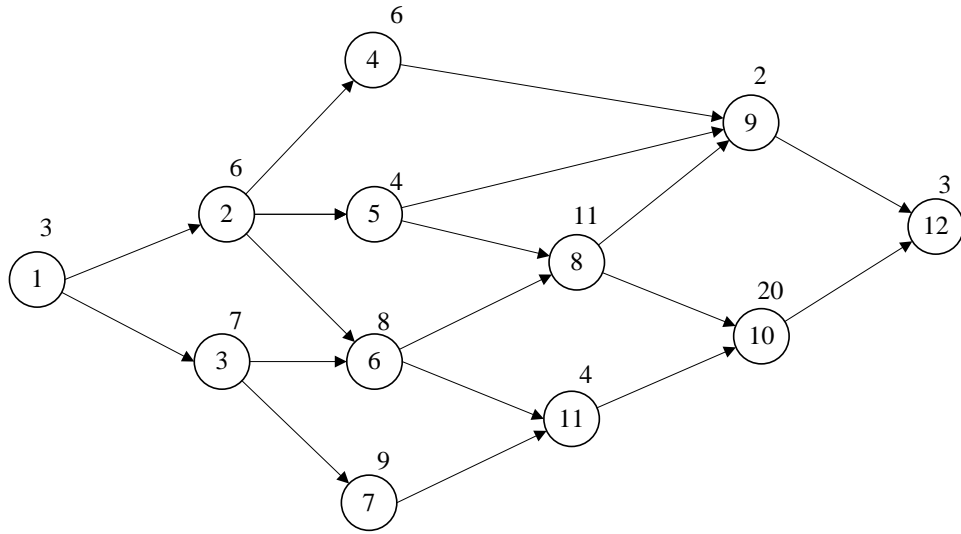
$$C \geq 0 \quad (3.33)$$

Geliştirilen sınırlandırılmış paralel istasyon oluşturmali matematiksel programlama modelinde olduğu gibi sınırlandırılmamış modelde de amaç fonksiyonu, çevrim süresinin minimizasyonunu hedeflemektedir (Denklem 3.24). Bu matematiksel modelin, sınırlandırılmış paralel istasyon oluşturmali modelden farkı hattaki aşama sayısı ve paralel istasyon sayısının model tarafından belirlenmesidir. Böylece, K ve M parametreleri önceden modele tanımlanarak modelin sınırlandırılması önlenmektedir. Önerilen matematiksel model, K ve M üst sınırlarına sahiptir. Ancak montaj hattındaki aşama ve her bir aşamadaki paralel istasyon sayısını çevrim süresinin minimizasyonuna göre model kendisi belirlemektedir.

Önerilen matematiksel modelin kısıt yapıları ise önerilen önceki modellerle benzer olarak; atama, öncelik ilişkileri, çevrim süresi ve paralel istasyon kısıtlarından

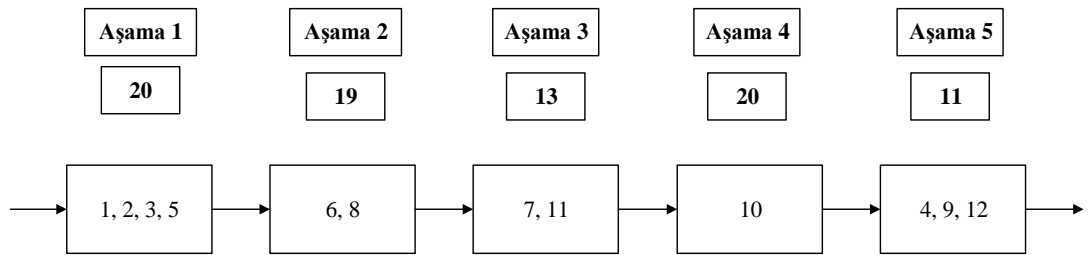
oluşmaktadır. Denklem 3.25'te her bir görevin yalnızca bir aşamaya atanması sağlanmaktadır. Bir sonraki kısıt yapısında ise, " p ", " i " nin öncülü ve P_i kümesinin elemanı olmak üzere; " p " görevinin " i " görevi ile aynı ya da daha önceki istasyonlarda yer alması sağlanarak, görev-istasyon atamalarının öncelik ilişkilerine göre yapılması amaçlanmaktadır (Denklem 3.26). Denklem 3.27'de ise çevrim süresi kısıtı verilmiştir. Bu kısıt yapısı sayesinde gerekli aşamalarda paralel istasyon oluşturulmasına imkân tanınmaktadır. Denklem 3.28'de tanımlanan teklik kısıtı, önceki bölümlerde ayrıntıları sunulan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modelinden farklı bir yapıda tasarlanmıştır. Kısıt yapısındaki bu değişiklik sayesinde, montaj hattında yer alan üretim aşamalarının her birisi için istasyon açılması veya açılmamasına ilişkin karar, model tarafından otomatik olarak verilebilmektedir. Denklem 3.29'da ise bir aşamaya en az bir görev atanması durumunda ilgili aşamada en az bir istasyonun açılması sağlanmaktadır. Denklem 3.30'da sunulan kısıt ise kullanılan toplam istasyon sayısının daha önceden belirlenen bir üst sınır değerini aşmasını engellemeye yöneliktir. Bu kısıt yapısı önerilen yeni modelde de aynen korunmuştur. Matematiksel modelin son kısıt yapılarını ise karar değişkenlerine ait işaret kısıtlamaları ve tanım aralıkları oluşturmaktadır (Denklem 3.31-Denklem 3.33).

Bu bölümde önerilen paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ve bu modelin sınırlandırılmamış halinin daha iyi açıklanabilmesi amacıyla Şekil 3.1'de öncelik diyagramı verilen örnek problemden yararlanılmıştır. Öncelik diyagramında düğümler içerisindeki sayılar görevlerin numaralarını, düğümlerin sağ üst köşesindeki sayılar da bu görevlerin işlem sürelerini (dakika) ifade etmektedir.



Şekil 3.1. 12 görevli örnek probleme ait öncelik diyagramı

Öncelik diyagramı Şekil 3.1’de verilen açıklamalı örnek problemin ilk olarak Denklem 3.15 – Denklem 3.23’te ayrıntıları sunulan paralel istasyon oluşturma yaklaşımını temel alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümü gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.2’de örnek problemin geleneksel hat dengeleme yaklaşımı ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi verilmiştir. Şekil 3.2’deki hat yerleşiminde 5 adet istasyon kullanılmıştır. Bu istasyonlara atanan görevler ve her bir istasyona ait çevrim süresi değerleri Şekil 3.2’de açıkça ifade edilmiştir.

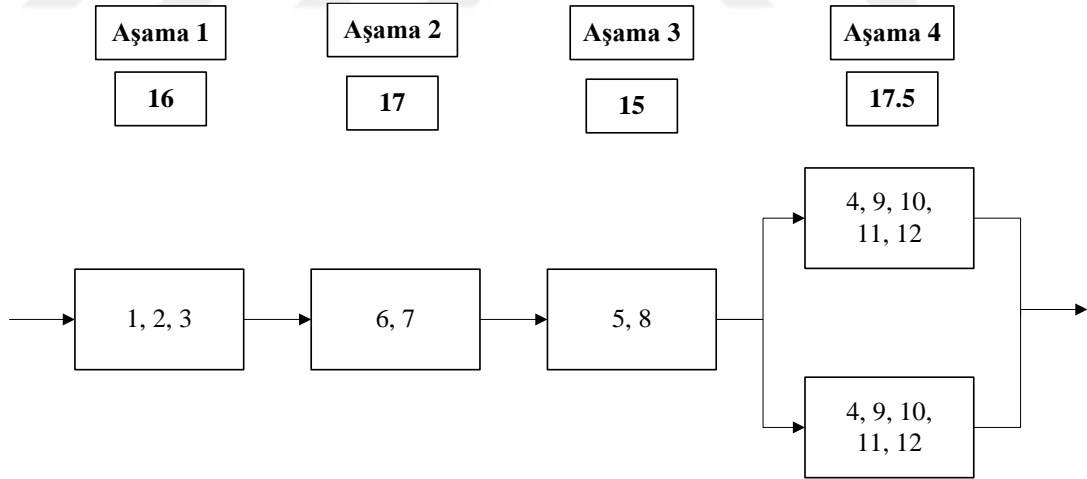


Şekil 3.2. Örnek problemin geleneksel yaklaşım ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi

Örnek problemin geleneksel yaklaşım ile çözülmesi sonucunda elde edilen optimum çevrim süresi değeri 20 dakikadır. Bu sonuçlardan da görüleceği üzere, 20 dakika olan optimum çevrim süresi değeri hat üzerindeki en büyük işlem süresine sahip 10 numaralı görev tarafından belirlenmiş ve sınırlandırılmıştır. Bir başka deyişle, hat üzerindeki 10

numaralı görevin işlem süresi ile diğer görevlerin işlem süreleri arasındaki farkın çok büyük olması sebebiyle çevrim süresinin en küçük değeri 20 dakika olmak zorundadır. Ancak Şekil 3.1’de öncelik diyagramı verilen aynı örnek problemin, Denklem 3.30 – Denklem 3.32’de ayrıntıları sunulan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözülmesi sonucunda çevrim süresinin en büyük işlem süreli iş tarafından sınırlandırılması probleminin üstesinden gelinebilmektedir.

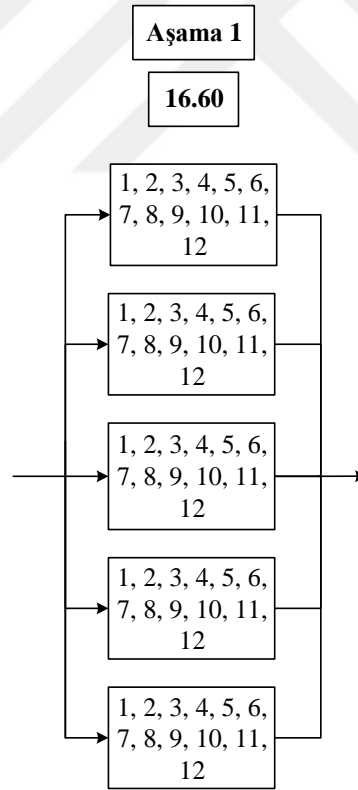
Örnek problemin sınırlandırılmış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin elde edilen optimum çevrim süresine sahip hat yerleşimi Şekil 3.3’te verilmiştir. Bu modelde aşama sayısı (K) 4 olarak sabitlenmiş, her bir aşamadaki paralel istasyon sayısı (M) ise 2 ile sınırlandırılmıştır. Bu parametrelerle birlikte örnek problem çözülerek çevrim süresi değeri 17.5 dakika olarak bulunmuştur. Dolayısıyla önerilen matematiksel modeli ile daha iyi bir çevrim süresi değeri elde edilmiştir. Üstelik geleneksel yaklaşım ile elde edilen hat etkinliği değeri % 83 iken, sınırlandırılmış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile elde edilen hat etkinliği değeri ise % 94.86’ dır.



Şekil 3.3. Örnek problemin sınırlandırılmış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi

Bu iki yaklaşıma ek olarak, Şekil 3.1’de verilen örnek problemin bu bölümde sunulan sınırlandırılmamış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi de Şekil 3.4’te verildiği gibi elde edilmiştir. Bu çözümde daha önce

de bahsedildiği gibi sınırlandırılmış modelden farklı olarak, K ve M parametreleri üst sınır (h_{maks})'a eşitlenerek serbest bırakılmıştır. Önceki bölümlerde ayrıntıları sunulan sınırlandırılmış modelde K parametresi ile belirtilen aşama sayısı önceden belirlenmiş, bir aşamada yer alabilecek paralel istasyon sayısı (M) değeri ise sınırlandırılmıştır. Sınırlanmamış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modelinde ise bu değerlerin serbest bırakılarak model tarafından otomatik olarak belirlenmesi sağlanmıştır. Ancak K ve M parametrelerinin serbest bırakılması sonucunda bütün istasyonlar tek bir aşamada paralel halde düzenlenmektedir. Şekil 3.4'te görüleceği üzere birbirine paralel halde düzenlenen her bir istasyon bütün görevleri içermektedir. Elde edilen sonuçlar, çevrim süresi değeri için mümkün olan en iyi çözüme 16.6 dakika olarak ulaşıldığını göstermektedir. Çünkü bir montaj hattında çevrim süresinin en iyi değeri, bütün istasyonların birbirine paralel halde düzenlendiği durumda elde edilmektedir. Şekil 3.4'te elde edilen hat yerleşimi ile % 100 hat etkinliği değerine ulaşıldığı görülmektedir.



Şekil 3.4. Örnek problemin sınırlandırılmamış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi

Örnek problemin sınırlandırılmamış hat dengeleme modeli ile çözülmesi sonucunda elde edilen hat yerleşimi çevrim süresi ve hat etkinliği açısından mümkün olan en iyi sonuçları sağlamış olsa da Şekil 3.4'te görülen hat yerleşiminin montaj hattı felsefesine aykırı olduğu gözden kaçmamalıdır. İlk olarak 1914 yılında Henry Ford tarafından Model T'nin üretiminde kullanılmaya başlanan montaj hatlarının en önemli amacı; iş bölümü anlayışı gereği, toplam iş yükünün çalışanlar arasında dengeli bir şekilde dağıtılması ve her bir çalışanın sorumlu olduğu görev konusunda uzmanlaşmasını sağlamaktır. Bu sayede üretim sürelerinde ciddi gelişmeler elde edilerek istenilen çıktı miktarlarına erişilmesi hedeflenmektedir. Ancak Şekil 3.4'te görülen hat yerleşiminde bütün görevlerin tek bir istasyona atanması, sınırlandırılmamış paralel istasyonlu hat dengeleme modeli ile elde edilen sonuçların, iş bölümü ve uzmanlaşma açısından montaj hattı felsefesine aykırı olduğunu göstermektedir. Burada bütün görevlerin bir istasyona atanması, bütün görevlerin bir çalışan tarafından yapılması gibi de düşünülebilir. Dolayısıyla montaj hattı felsefesinin çıkış noktasının işi daha küçük parçalara bölerek üretim sürelerinin düşürülmesi olduğu düşünülürse, montaj hattındaki bütün görevlerin bir çalışan tarafından yapılması durumunun bu felsefeye aykırı olduğu açıktır. Tüm bu sebepler sınırlandırılmamış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modelinde bazı düzenlemeler yapılarak bütün görevlerin bir istasyona atanmasının engellenmesi gerektiğini göstermektedir. Çalışmanın ilerleyen kısımlarında da sınırlandırılmamış hat dengeleme modelinin ifade edilen dezavantajlarının giderilmesi amacıyla geliştirilen: görevler arası geçiş süresini dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ve paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modellerine değinilmiştir.

- Görevler arası geçiş süresini dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli

Sınırlandırılmamış hat dengeleme modelinin montaj hattı felsefesine aykırı sonuçlar ürettiği önceki paragraflarda ifade edilmiştir. Montaj hattındaki bütün görevlerin bir istasyona atanmasının, çalışanlarda konsantrasyon kaybı ve dikkat eksikliği gibi birçok soruna yol açtığı görülmektedir. Ortalama iş istasyonu başına düşen görev sayısı arttıkça, istasyondaki operatörün yürümesi ve alet alıp bırakması gibi faaliyetler önemli kayıplara

sebeptir. Bununla birlikte görev sayısının yüksek seviyelere ulaştığı istasyonlarda çalışma alanının daralmasının ergonomik açıdan bazı problemlere yol açtığı gözlemlenmiştir. En önemlisi de bir istasyona atanan görev sayısı arttıkça bu görevlerin yapılması sırasında geçen hazırlık süreleri de giderek artmaktadır. Bir görevden diğerine geçilmesi sırasında harcanan hazırlık süresi, bu çalışmada görevler arası geçiş süresi olarak ifade edilmiştir. Üretim hatlarındaki bu görevler arası geçiş süreleri, çalışanların bir görevden diğerine geçerken kullandıkları aparatı değiştirmeleri veya fiziksel olarak bir başka alana hareket etmeleri gibi aktiviteleri kapsamaktadır. Şekil 3.4'teki gibi bütün görevlerin bir istasyona atanması, görevler arası geçiş süreleri dikkate alındığında, montaj hattı üzerinde ciddi miktarlarda vakit kaybına sebep olmaktadır. Buna karşın, bir operatörün sürekli aynı görev ile meşgul olması hem iş disiplininin sağlanması hem de üretim sürelerinin minimize edilmesi açısından birden çok görev ile uğraşmasına göre daha verimli sonuçlar üretmektedir. Bu sebeple Denklem 3.24 - Denklem 3.33'te ifade edilen sınırlanmamış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modelinin yeniden düzenlenmesi ve görevler arası geçiş süresinin dikkate alınarak; bir istasyona atanan görev sayısının makul seviyelere çekilmesi gerekmektedir.

Çalışmanın bu bölümünde de sınırlanmamış hat dengeleme modelinin dezavantajını ortadan kaldırmayı amaçlayan ve görevler arası geçiş süresini dikkate alan bir hat dengeleme modeli önerisi sunulmuştur. Denklem 3.24 – Denklem 3.33'te verilen sınırlanmamış paralel istasyon oluşturmali matematiksel programlama modelinin yeniden düzenlenmesi ile oluşturulan görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modelinin ayrıntıları ve bu modelde kullanılan notasyona ilişkin bilgilere aşağıda belirtildiği gibidir:

İndisler:

i görevler, $i = \{1, \dots, N\}$

j bir aşamada yer alan paralel istasyon sayısı, $j = \{1, \dots, M\}$

k aşamalar, $k = \{1, \dots, K\}$

Parametreler:

N	toplam görev sayısı
M	bir aşamadaki toplam iş istasyonu sayısı
t_i	i . görevin işlem süresi
P_i	i . görevin öncüllerini içeren küme
$hmaks$	montaj hattı boyunca (paralel istasyonlar da dâhil) kullanılacak maksimum istasyon sayısı
G	büyük bir sayı değeri
F_w	görevler arası geçiş süresini temsilen, bir istasyona atanmış fazladan her bir görev için dikkate alınan ceza katsayısı değeri

Karar Değişkenleri:

x_{ik}	$\begin{cases} 1, & i. \text{ görev } k. \text{ aşamaya atanırsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
y_{kj}	$\begin{cases} 1, & k. \text{ aşamada } j \text{ sayıda istasyon yer alıyorsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
C	çevrim süresi

Görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeline ilişkin indis, parametre ve karar değişkenleri yukarıda belirtilmiştir. Denklem 3.24 - Denklem 3.33'te sunulan sınırlandırılmamış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli üzerinde yapılan düzenlemelerle birlikte önerilen yeni model, görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modelinin amaç fonksiyonu ve kısıt yapıları ise Denklem 3.34 - Denklem 3.43'te sunulduğu gibidir:

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{Minimize } Z = C \quad (3.34)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{k=1}^K x_{ik} = 1 \quad \forall i \quad (3.35)$$

$$\sum_{k=1}^K k x_{pk} \leq \sum_{k=1}^K k x_{ik} \quad \forall i, p \in P_i \quad (3.36)$$

$$\sum_{i=1}^N t_i x_{ik} + Fw \left(\sum_{i=1}^N x_{ik} - 1 \right) \leq jC + G(1 - y_{kj}) \quad \forall k, j \quad (3.37)$$

$$\sum_{j=1}^M y_{kj} \leq 1 \quad \forall k \quad (3.38)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{ik} \leq \sum_{j=1}^M y_{kj} G \quad \forall k \quad (3.39)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M j y_{kj} \leq h_{maks} \quad (3.40)$$

$$x_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i, k \quad (3.41)$$

$$y_{kj} \in \{0,1\} \quad \forall k, j \quad (3.42)$$

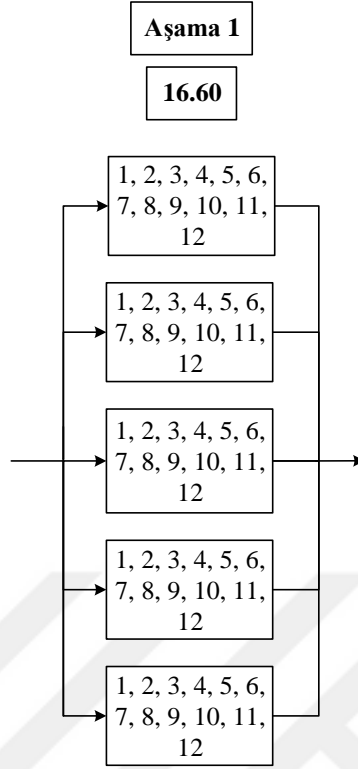
$$C \geq 0 \quad (3.43)$$

Önerilen görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modelinin amaç fonksiyonu çevrim süresinin minimizasyonuna yöneliktir (Denklem 3.34). Bu modelin diğer paralel istasyon oluşturmali modellerden farkı, hattaki aşama sayısı ve paralel istasyon sayısı belirlenirken görevler arası geçiş sürelerinin de dikkate alınmasıdır. Bu sayede bütün görevlerin bir istasyona atanması gibi durumlar engellenerek, herhangi bir istasyona atanan görev sayısının makul seviyelerde tutulması sağlanmaktadır. Denklem 3.35'te her bir görevin yalnızca bir aşamaya atanması amaçlanmaktadır. Bir sonraki kısıt yapısında ise görev-istasyon atamalarının öncelik ilişkilerine göre yapılmasını sağlayan kısıt yapısı yer almaktadır (Denklem 3.36). Denklem 3.37'de ise diğer modellerden farklı

olarak yeniden düzenlenmiş bir çevrim süresi kısıtı yer almaktadır. Buradaki çevrim süresi kısıtının diğer modellerdeki aynı tür kısıt yapılarından farkı, görevler arası geçiş süresini modele yansıtan ceza katsayısını (F_w) içermesidir. F_w katsayısı, bir istasyona atanan fazladan her bir görev için ceza değerini ifade etmektedir. Sabit bir değer olmayan ve iteratif şekilde belirlenmesi gereken bu katsayı değeri sayesinde istasyonlara aşırı sayıda görev atanması engellenmektedir. Denklem 3.38'deki kısıt yapısında ise her bir aşamadaki istasyon sayısının model tarafından belirlenmesi sağlanmıştır. Bu kısıt yapısında ifade edildiği gibi bazı aşamalarda hiçbir istasyon ataması yapılmayabilir. Ancak Denklem 3.39'daki kısıt sayesinde bir aşamaya en az bir görev ataması yapılmış ise o aşamada en az bir istasyonun açılması sağlanmaktadır. Denklem 3.40'da ise montaj hattı üzerindeki toplam istasyon sayısının önceden belirlenen bir üst sınır değerini aşmaması amaçlanmaktadır. Önerilen modelin son kısıt yapıları ise karar değişkenlerine ait işaret kısıtlamaları ve tanım aralıklarından oluşmaktadır (Denklem 3.41 - Denklem 3.43).

Bu bölümde önerilen görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modelinde en önemli aşamalardan bir tanesi; F_w şeklinde ifade edilen ceza katsayısı değerinin belirlenmesidir. Bu değer sabit olmamakla birlikte, probleme göre değişkenlik gösteren ve iteratif bir şekilde bulunması gereken bir parametredir. İlerleyen paragraflarda; örnek olması açısından Şekil 3.1'de öncelik diyagramı verilen problemin çeşitli F_w değerlerine göre çözümü gerçekleştirilmiştir. Bu sayede ceza katsayısı değerindeki değişiminin problemin çözümüne etkisi incelenmiştir.

İlk olarak F_w katsayısının değeri 0 alınmış ve Denklem 3.34 – Denklem 3.43'teki hat dengeleme modeli kullanılarak açıklamalı örnek problemin çözümü gerçekleştirilmiştir. Bu parametre değerleri ile modelin çözülmesi sonucu elde edilen hat yerleşimi Şekil 3.5'te sunulmuştur.



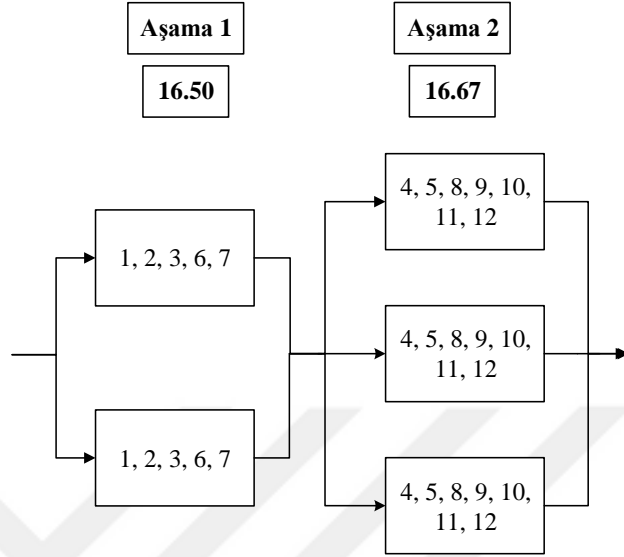
Şekil 3.5. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 0$)

F_w katsayısının sıfıra eşit olduğu durumda görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli, sınırlandırılmamış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile aynı sonucu vermektedir (bkz. Şekil 3.4). Çünkü F_w katsayısının sıfır olduğu durumda Denklem 3.37'deki çevrim süresi kısıtı, Denklem 3.27'deki kısıt yapısına dönüşmektedir. Aslında F_w parametresinin sıfır alınması bir anlamda görevler arası geçiş süresinin dikkate alınmadığını göstermektedir.

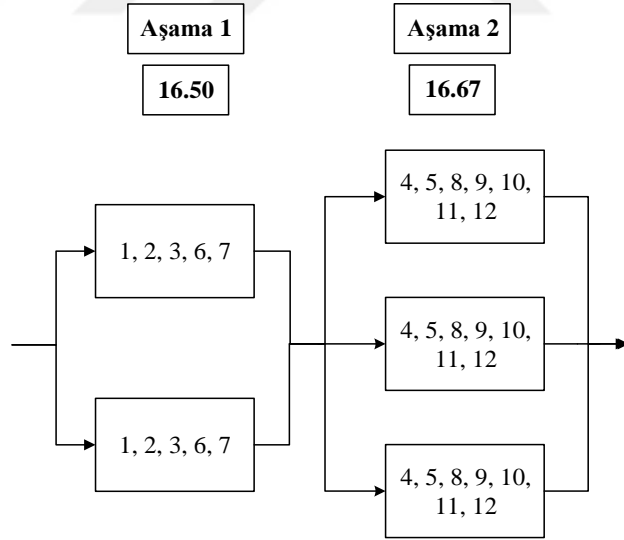
F_w parametresinin sıfırdan farklı bir değer aldığı tüm durumlarda ise görevler arası geçiş süresinin dikkate alınmaktadır. Bu sebeple F_w parametresine bazı değerler verilerek ilgilenilen hat dengeleme problemi için en uygun ceza katsayısı değerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Görevler arası geçiş süresinden kaynaklanan F_w parametresinin değişimine göre elde edilen hat yerleşimleri Şekil 3.6, Şekil 3.7, Şekil 3.8, Şekil 3.9, Şekil 3.10, Şekil 3.11,

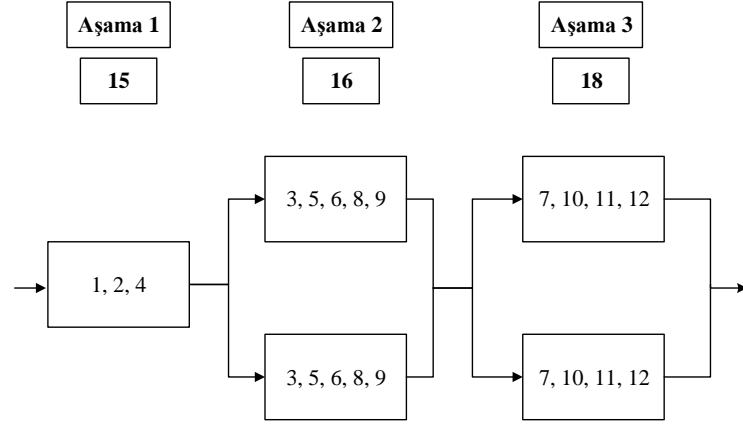
Şekil 3.12, Şekil 3.13, Şekil 3.14, Şekil 3.15, Şekil 3.16, Şekil 3.17, Şekil 3.18, Şekil 3.19, Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’de verilmiştir.



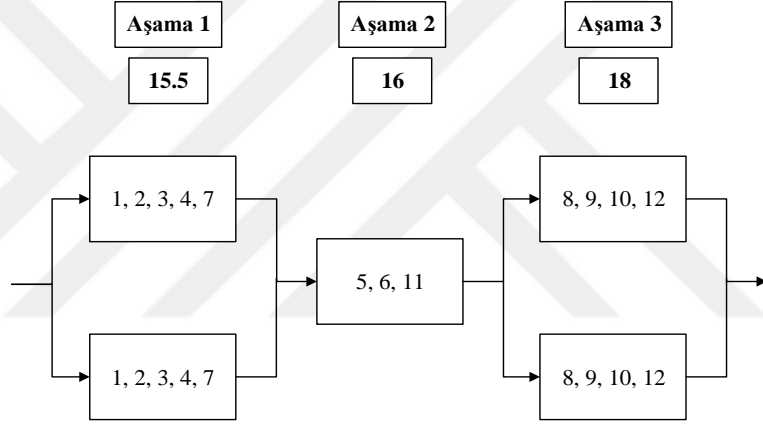
Şekil 3.6. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 1$)



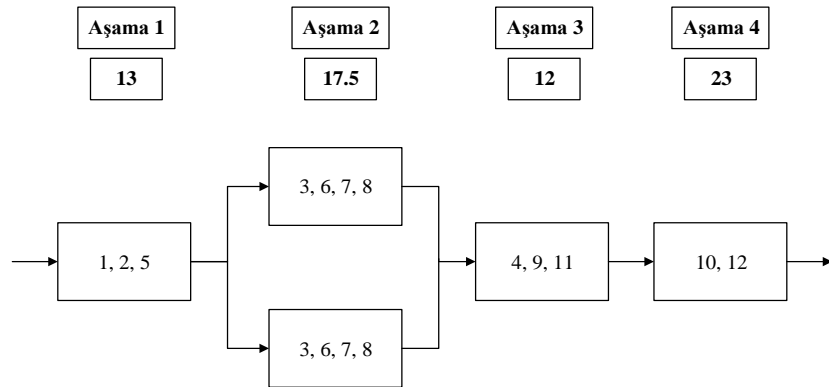
Şekil 3.7. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 2$)



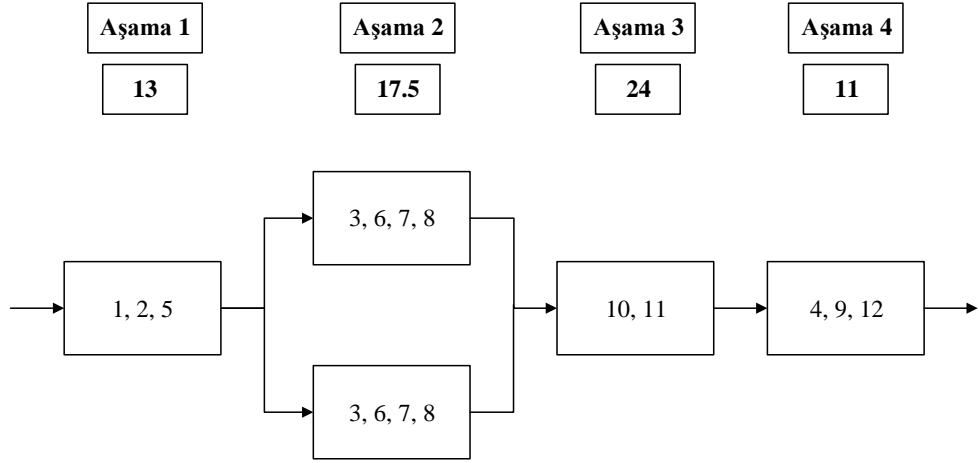
Şekil 3.8. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fw = 3$)



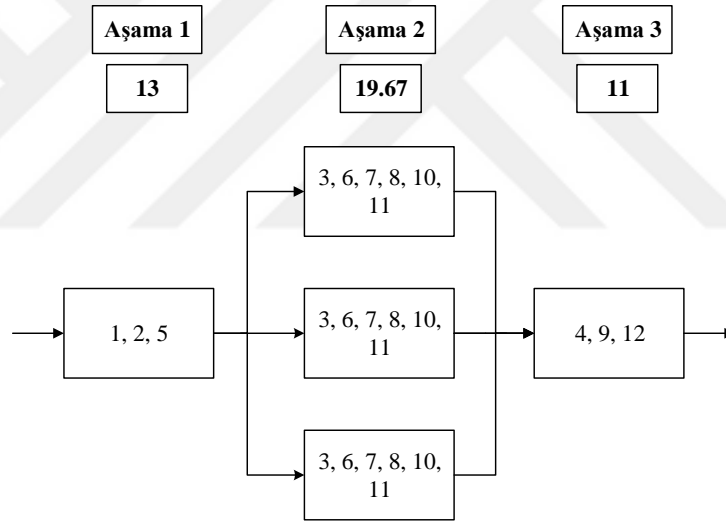
Şekil 3.9. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fw = 5$)



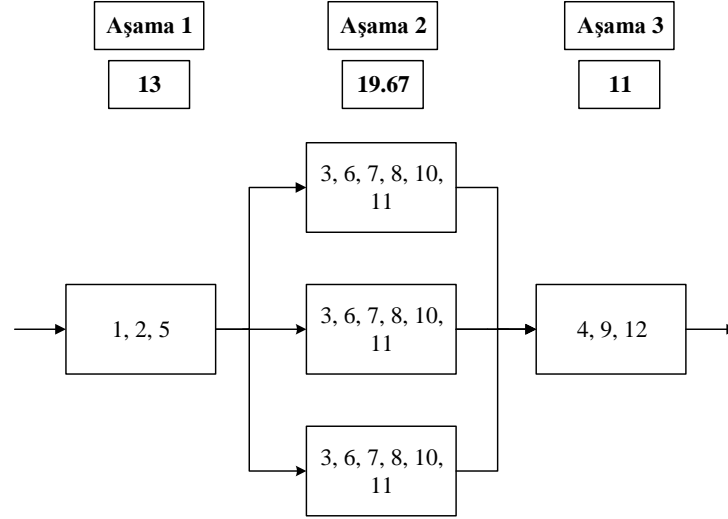
Şekil 3.10. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fw = 10$)



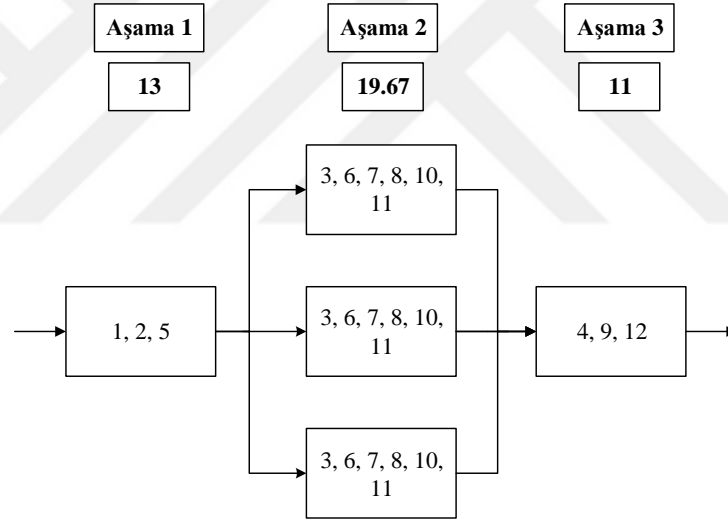
Şekil 3.11. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fw = 15$)



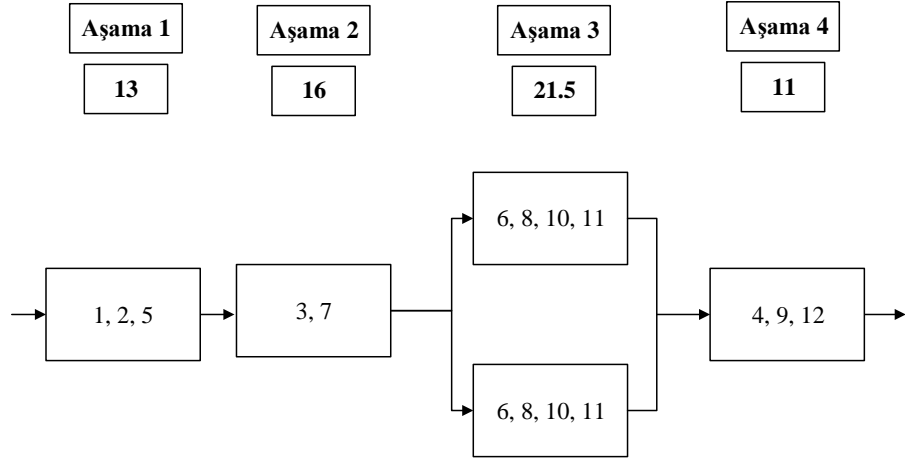
Şekil 3.12. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fw = 20$)



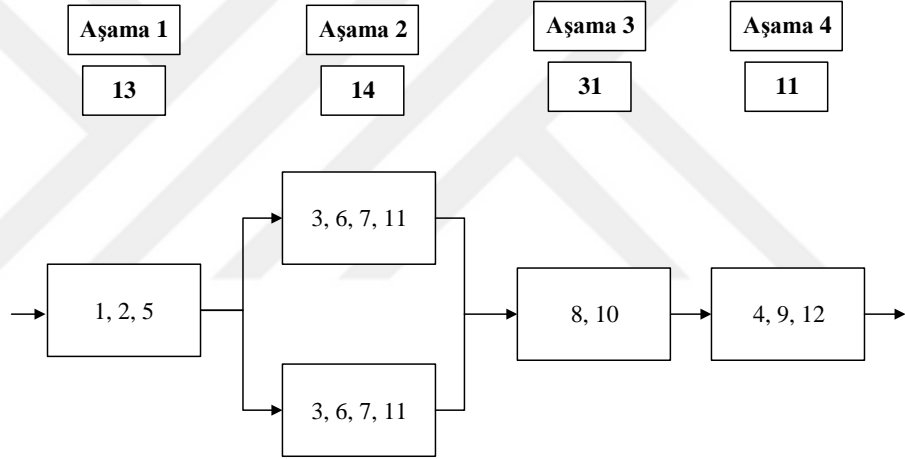
Şekil 3.13. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 25$)



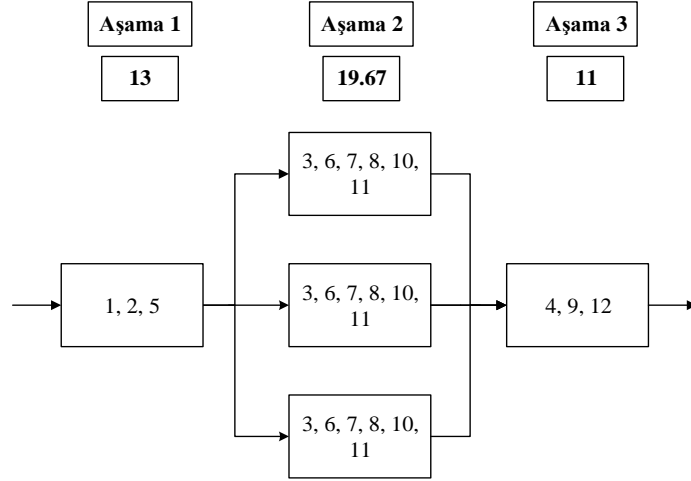
Şekil 3.14. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 50$)



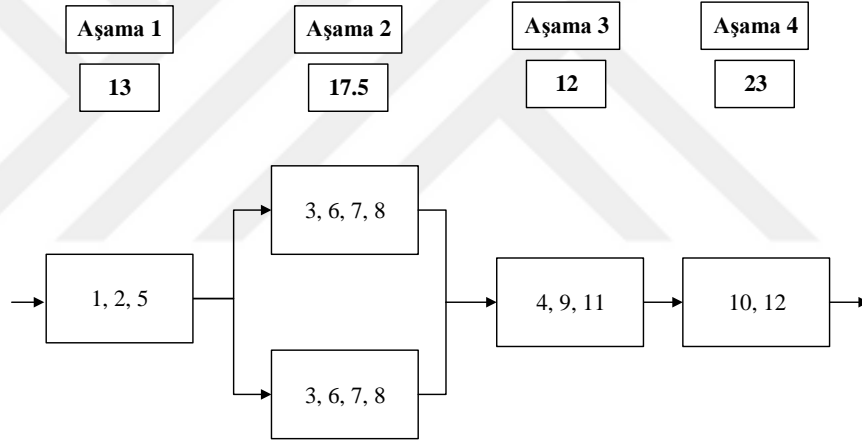
Şekil 3.15. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fw = 100$)



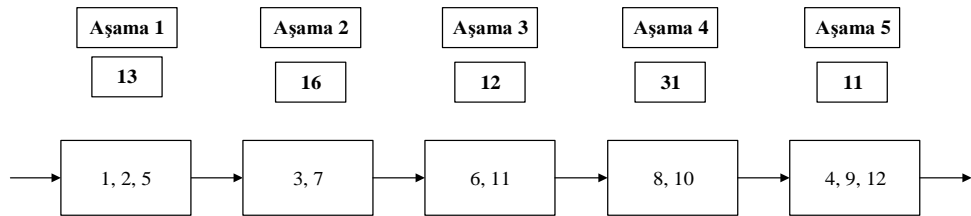
Şekil 3.16. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fw = 150$)



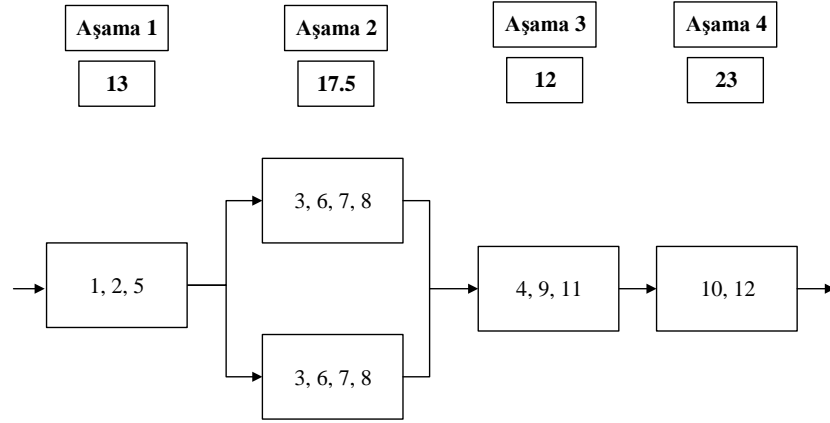
Şekil 3.17. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fw = 200$)



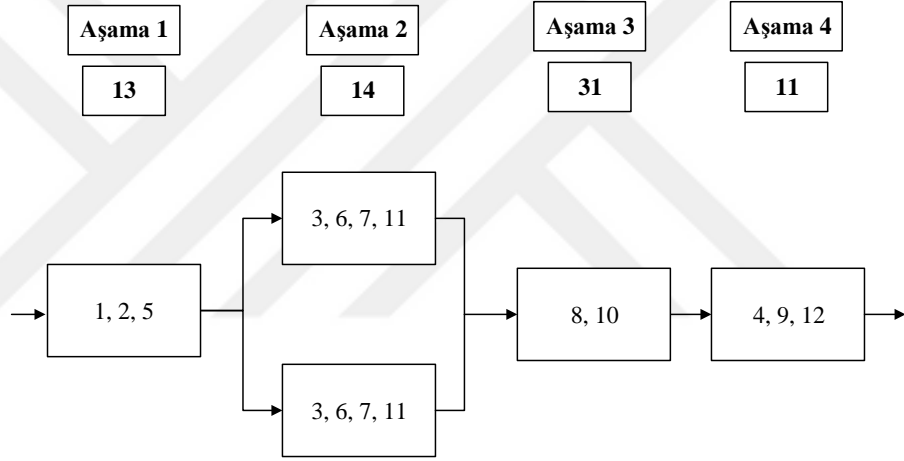
Şekil 3.18. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fw = 250$)



Şekil 3.19. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fw = 300$)



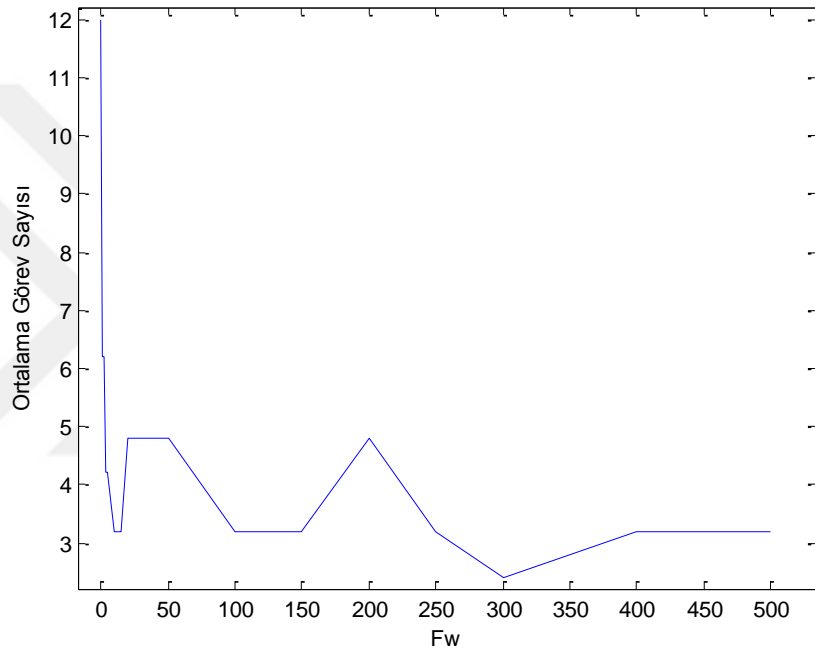
Şekil 3.20. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 400$)



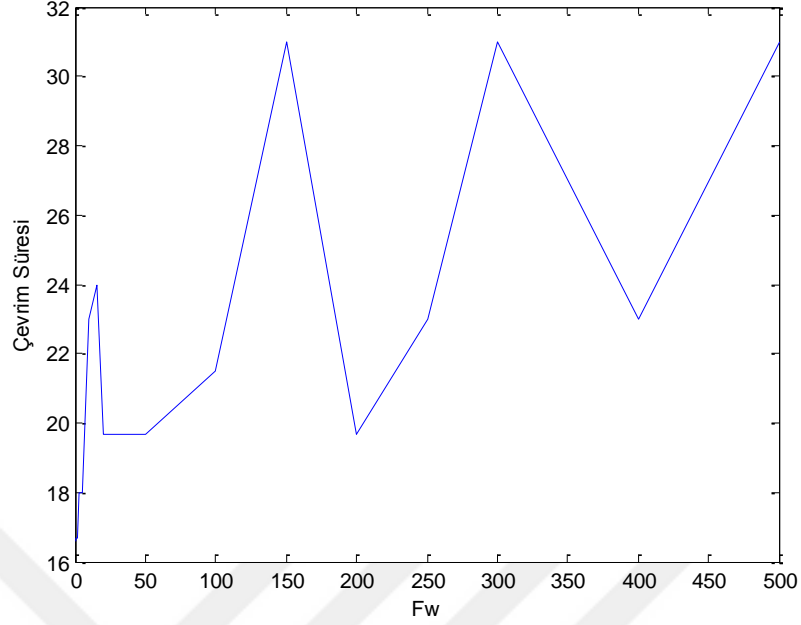
Şekil 3.21. Örnek problemin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 500$)

Görevler arası geçiş süresinin dikkate alındığı paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modelinde (Denklem 3.34 - Denklem 3.43) F_w parametresinin değışimi sonucu farklı hat yerleşimleri incelendiğinde; F_w değerinin 0 olduğu durumda istasyonlara atanan görev sayısının ortalama değerinin en yüksek seviyeye ulaştığı görülmektedir. F_w parametresinin sıfırdan farklı bir değer alması ile istasyonlara atanan toplam görev sayısının ortalama değerinin ciddi miktarlarda azaldığı görülmektedir. F_w değerinin artışına karşın bu azalış süreklilik arz etmese de, F_w değeri arttıkça bir istasyona atanan toplam görev sayısı ortalamasının 3 ile 4 arasında dengelendiği görülmektedir (Şekil 3.22). Önerilen modelde F_w parametresinin kullanım amacı bir istasyona atanan görev

sayısının makul seviyelere çekilmesidir (Denklem 3.37). Dolayısıyla elde edilen test sonuçları, Denklem 3.37’de kullanılan kısıt yapısının bu amacı sağladığını göstermektedir. Şekil 3.23’te ise çevrim süresinin F_w parametresine göre değişimine yer verilmiştir. F_w parametresinin artışına bağlı olarak ilk duruma göre bir aşamadaki paralel istasyon sayısı azaldıkça çevrim süresi 16.60 olan ideal değerden uzaklaşmıştır. Bununla birlikte F_w parametresinin artışı ile çevrim süresinde sürekli bir artış veya azalış görülmemektedir.



Şekil 3.22. İş istasyonu başına düşen ortalama görev sayısının F_w parametresine göre değişimi



Şekil 3.23. Çevrim süresinin Fw parametresine göre değişimi

- Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli

Önceki bölümde sınırlandırılmamış hat dengeleme modelinin montaj hattı felsefesine uygun olmayan sonuçlar üretmesi sebebiyle modelde bazı değişiklikler yapılarak, görevler arası geçiş süresini dikkate alan yeni bir matematiksel model önerilmiştir. Tez çalışmasının bu bölümünde de görevler arası geçiş süresini dikkate alan model (Denklem 3.34 - Denklem 3.43) ile benzer amaca sahip yeni bir model önerisi sunulmuştur. Denklem 3.34 - Denklem 3.43'te ayrıntıları verilen modelin Denklem 3.37'de yer alan kısıt yapısı ile görevler arası geçiş sürelerinin modele yansıtılması sağlanmıştır. Bu bölümde önerilen matematiksel modelde ise kullanılan bir kısıt yapısı ile bir aşamada yer alan her bir paralel istasyon için bir ceza değeri tanımlanarak montaj hattındaki paralel istasyon sayısının makul seviyelerde tutulması amaçlanmaktadır.

Denklem 3.24 - Denklem 3.33'te verilen sınırlandırılmamış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modelinin yeniden düzenlenmesi ile oluşturulan, paralel istasyon açma

cezasını dikkate alan hat dengeleme modelinin ayrıntıları ve bu modelde kullanılan notasyona ilişkin bilgiler şu şekildedir:

İndisler:

- i görevler, $i = \{1, \dots, N\}$
 j bir aşamada yer alan paralel istasyon sayısı, $j = \{1, \dots, M\}$
 k aşamalar, $k = \{1, \dots, K\}$

Parametreler:

- N toplam görev sayısı
 M bir aşamadaki toplam iş istasyonu sayısı
 t_i i . görevin işlem süresi
 P_i i . görevin öncüllerini içeren küme
 $hmaks$ montaj hattı boyunca (paralel istasyonlar da dâhil) kullanılacak maksimum istasyon sayısı
 G büyük bir sayı değeri
 F_s bir aşamada yer alan her bir paralel istasyon için dikkate alınan ceza katsayısı değeri

Karar Değişkenleri:

- x_{ik} $\begin{cases} 1, & i. \text{ görev } k. \text{ aşamaya atanırsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
 y_{kj} $\begin{cases} 1, & k. \text{ aşamada } j \text{ sayıda istasyon yer alıyorsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
 C çevrim süresi

Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeline ilişkin indis, parametre ve karar değişkenleri yukarıda belirtilmiştir. Denklem 3.24 - Denklem 3.33'te sunulan sınırlandırılmamış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli üzerinde yapılan düzenlemelerle birlikte önerilen yeni model, görevler arası geçiş süresini dikkate

alan hat dengeleme modelinin amaç fonksiyonu ve kısıt yapıları ise Denklem 3.44 - Denklem 3.53'te sunulduğu gibidir:

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{Minimize } Z = C \quad (3.44)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{k=1}^K x_{ik} = 1 \quad \forall i \quad (3.45)$$

$$\sum_{k=1}^K k x_{pk} \leq \sum_{k=1}^K k x_{ik} \quad \forall i, p \in P_i \quad (3.46)$$

$$\sum_{i=1}^N t_i x_{ik} + FS (j y_{kj} - 1) \leq jC + G(1 - y_{kj}) \quad \forall k, j \quad (3.47)$$

$$\sum_{j=1}^M y_{kj} \leq 1 \quad \forall k \quad (3.48)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{ik} \leq \sum_{j=1}^M y_{kj} G \quad \forall k \quad (3.49)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M j y_{kj} \leq h_{maks} \quad (3.50)$$

$$x_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i, k \quad (3.51)$$

$$y_{kj} \in \{0,1\} \quad \forall k, j \quad (3.52)$$

$$C \geq 0 \quad (3.53)$$

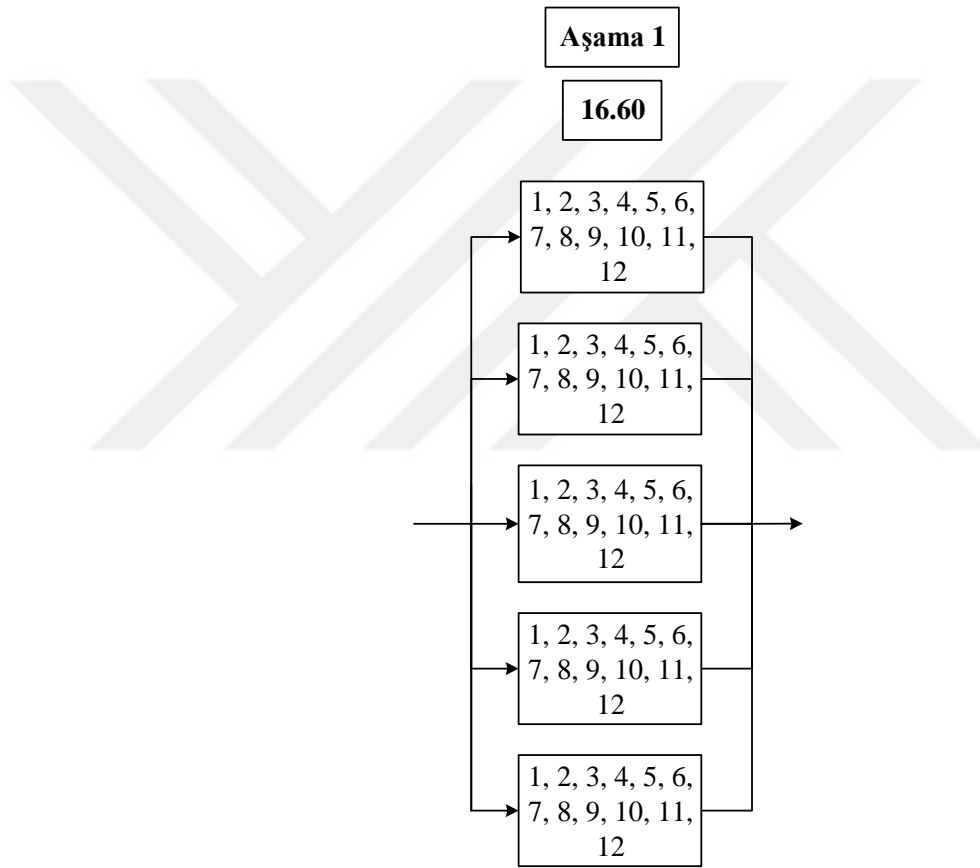
Önceki bölümlerde önerilen diğer modellerde olduğu gibi, bu bölümde sunulan paralel istasyon açma cezalı hat dengeleme modelinin amaç fonksiyonu da çevrim süresinin

minimizasyonuna yöneliktir (Denklem 3.44). Bu modelin diğer paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modellerinden farki ise hattaki aşama sayısı ve paralel istasyon sayısı belirlenirken, açılan her bir paralel istasyon için geçerli bir ceza katsayısının dikkate alınmasıdır (F_s). Bu ceza katsayısının dikkate alınması sayesinde bütün görevlerin bir istasyona atanması ve bu istasyonların hepsinin birbirine paralel olarak bir aşamada yer alması durumu engellenebilmektedir (bkz. Şekil 3.4). Denklem 3.45'te her bir görevin yalnızca bir aşamaya atanması sağlanmaktadır. Bir sonraki kısıt yapısında ise, “ p ”, “ i ” nin öncülü ve P_i kümesinin elemanı olmak üzere; “ p ” görevinin “ i ” görevi ile aynı ya da daha önceki istasyonlarda yer alması sağlanarak, görev-istasyon atamalarının öncelik ilişkilerine göre yapılması sağlanmaktadır (Denklem 3.46). Denklem 3.47'de diğer paralel istasyonlu hat dengeleme modellerinden farklı yapıda bir çevrim süresi kısıtı yer almaktadır. Bu modeldeki çevrim süresi kısıtının farki ise bir aşamada yer alan paralel istasyon sayısının bir ceza katsayısı (F_s) değeri ile sınırlandırılmasından kaynaklanmaktadır. F_s ceza katsayısı değeri, montaj hattının herhangi bir aşamasında oluşturulan her bir paralel istasyon için geçerlidir. Bu ceza katsayısı sayesinde bütün istasyonların bir aşamada paralel olarak yer alması durumunun ortaya çıkması engellenmektedir. Bir aşamadaki paralel istasyon sayısı sınırlandırılarak bir anlamda istasyonlara atanan görev sayısının da makul seviyelerde dengelenmesi sağlanmaktadır. Bu sebeple Denklem 3.37 ve Denklem 3.47'de sunulan kısıt yapılarının aynı amaç doğrultusunda kullanıldıkları görülmektedir. F_s ceza katsayısının değeri de görevler arası geçiş süresini yansıtan F_w katsayısı gibi iteratif bir şekilde belirlenmelidir. Denklem 3.48'de belirtilen kısıt ile de her bir aşamadaki paralel istasyon sayısının model tarafından otomatik olarak belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bir sonraki kısıt yapısında ise bir aşamaya en az bir görev ataması yapıldığında ilgili aşamada bir istasyon açılması sağlanmaktadır (Denklem 3.49). Denklem 3.50'de de paralel istasyonlar da dâhil olmak üzere açılan toplam istasyon sayısının önceden belirlenen bir üst sınırı ($hmaks$) aşması engellenmektedir. Önerilen matematiksel modelin son bölümünde ise karar değişkenlerine ait tanım aralıkları ve işaret kısıtları yer almaktadır (Denklem 3.51 - Denklem 3.53).

Tez çalışmasının bu bölümünde ele alınan, paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modelinde en önemli aşamalardan birisi söz konusu ceza katsayısı F_s 'nin

değerinin belirlenmesidir. F_s , montaj hattı dengeleme problemine göre değişkenlik gösterebilen ve sabit olmayan bir parametredir. Problem çeşitli F_s değerlerine göre çözülerek bu parametrenin değerinin iteratif bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 3.1’de öncelik diyagramı verilen örnek problem yardımıyla çeşitli F_s değerlerine karşın elde edilen hat yerleşimleri ve sonuçlar analiz edilmiştir.

İlk olarak, önceki analizlerde de olduğu gibi F_s değerinin 0 olduğu durum incelenmiştir. Bu duruma ilişkin elde edilen hat yerleşimi Şekil 3.24’te görülmektedir.

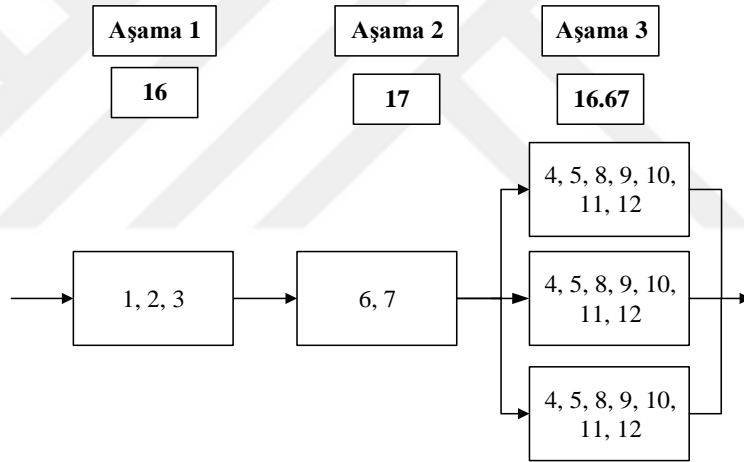


Şekil 3.24. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 0$)

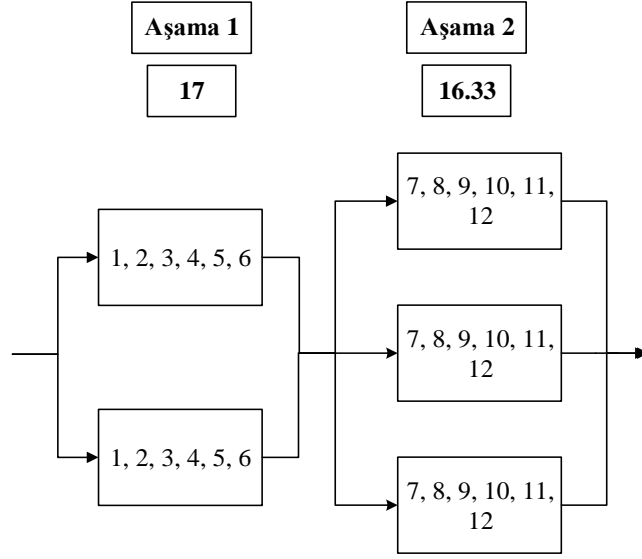
F_s parametresinin sıfır değerini aldığı duruma ilişkin hat yerleşimi incelendiğinde, bütün istasyonların birbirine paralel şekilde yer aldığı ve bir istasyondaki toplam görev sayısının ortalama değerinin en üst seviyeye ulaştığı görülmektedir (Şekil 3.24). F_s parametresinin sıfır değerini alması durumunda ceza katsayısının modeldeki etkisi ortadan

kaldırılmaktadır. Bu sebeple örnek problemin, paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ve sınırlandırılmamış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modelleri ile çözümlenmesi sonucunda elde edilen hat yerleşimleri aynıdır. Fs parametresinin sıfırdan farklı bir değer alması durumunda ise ceza katsayısı değerinin modeldeki etkisini gösterdiği ve bütün istasyonların paralel halde düzenlenmesi durumunun engellendiği görülmektedir.

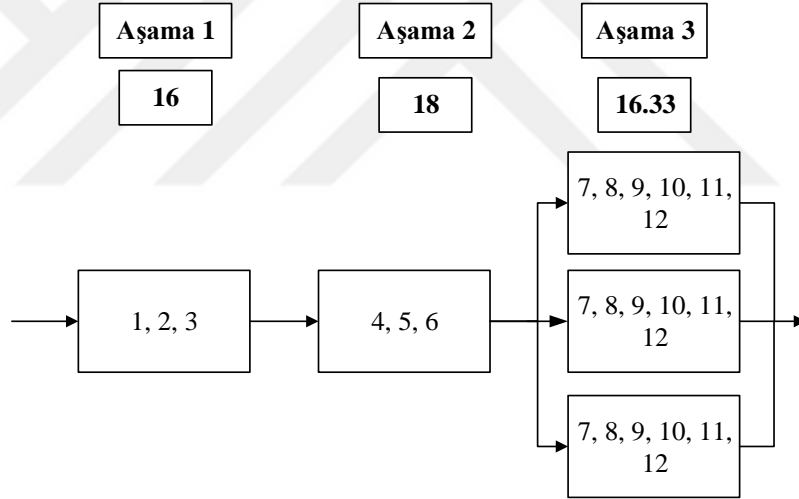
Bir aşamada oluşturulan paralel istasyon sayısının kontrol edilmesine yönelik olarak modele eklenen cezası katsayısı (Fs) parametresinin değişimine göre elde edilen hat yerleşimleri Şekil 3.25, Şekil 3.26, Şekil 3.27, Şekil 3.28, Şekil 3.29, Şekil 3.30, Şekil 3.31, Şekil 3.32, Şekil 3.33, Şekil 3.34, Şekil 3.35, Şekil 3.36, Şekil 3.37, Şekil 3.38, Şekil 3.39 ve Şekil 3.40'da verilmiştir.



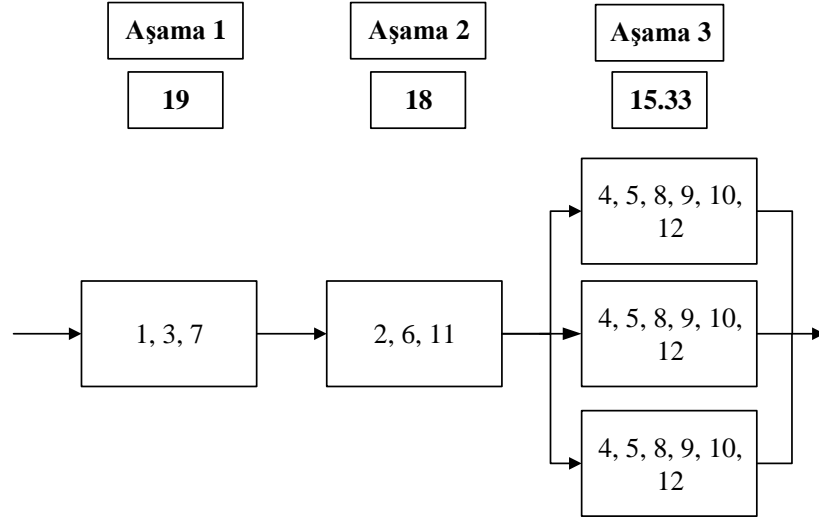
Şekil 3.25. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fs = 1$)



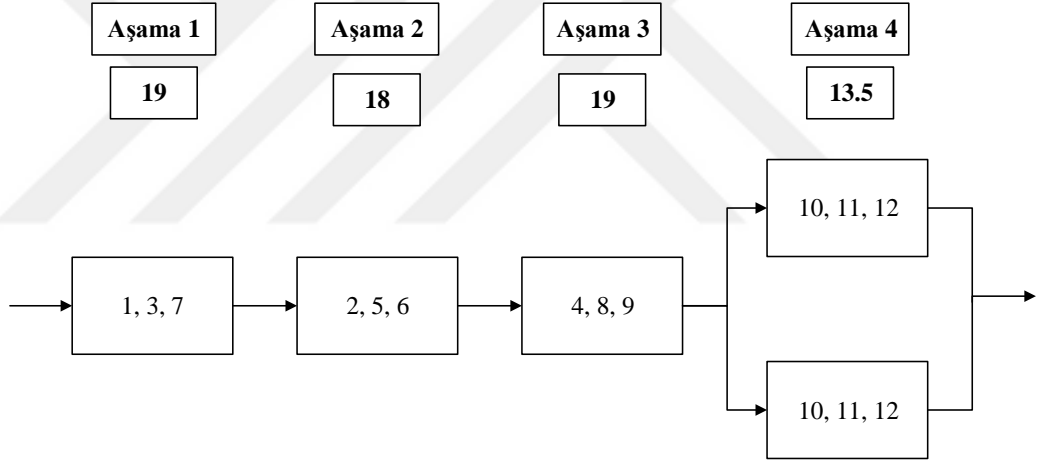
Şekil 3.26. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fs = 2$)



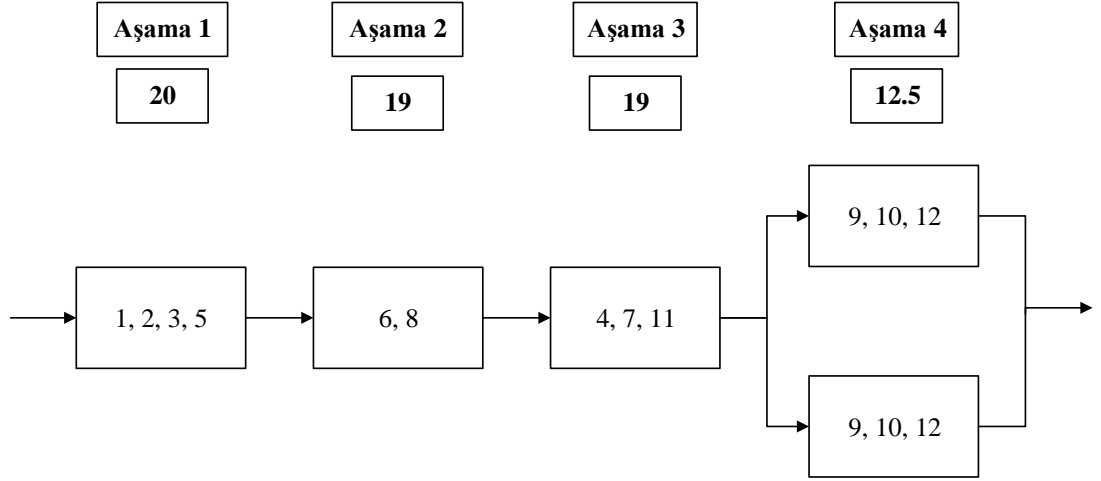
Şekil 3.27. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fs = 3$)



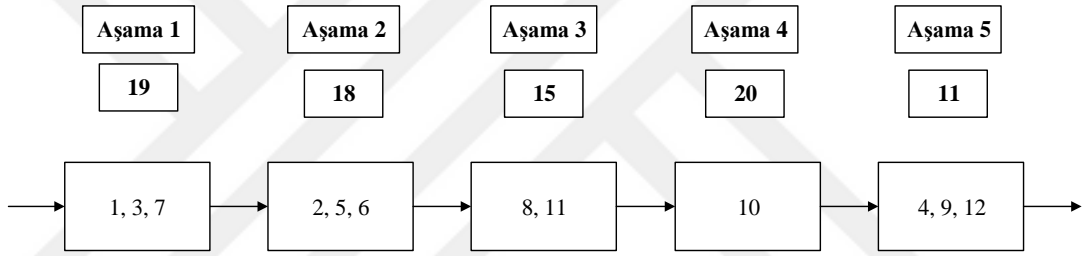
Şekil 3.28. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fs = 5$)



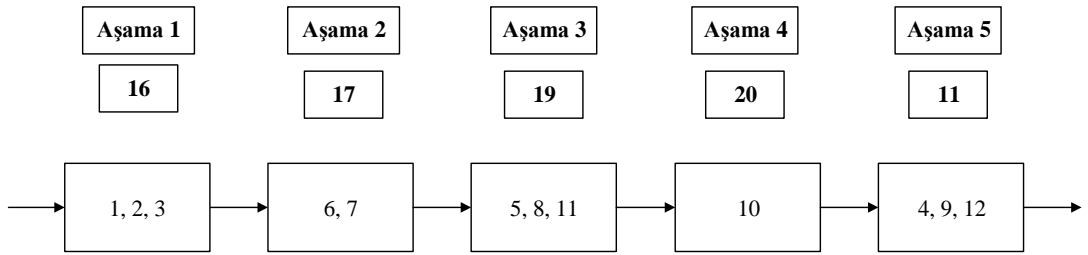
Şekil 3.29. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fs = 10$)



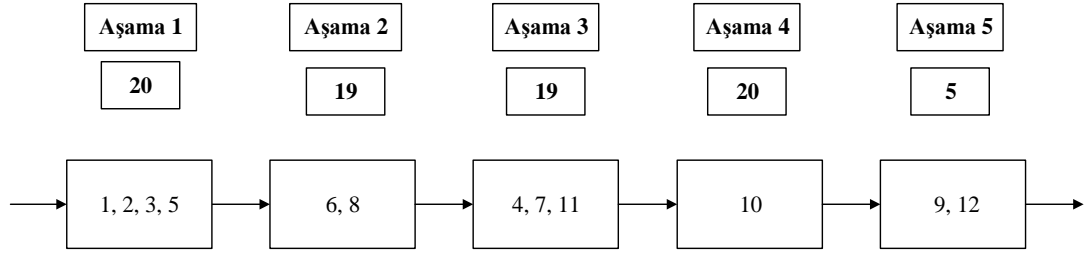
Şekil 3.30. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fs = 15$)



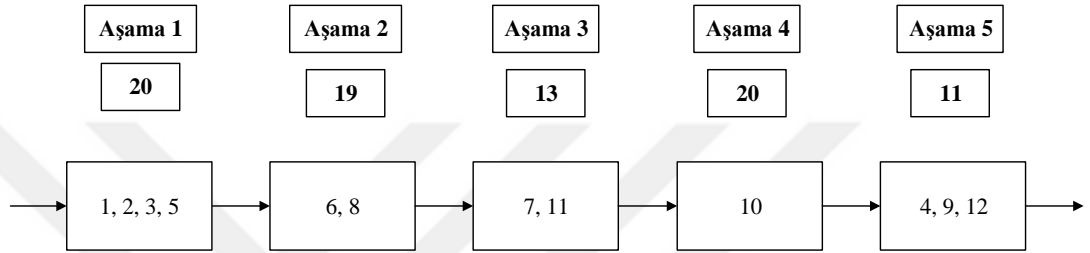
Şekil 3.31. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fs = 20$)



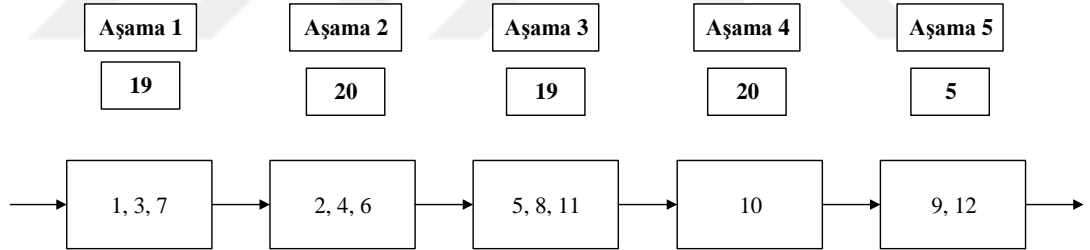
Şekil 3.32. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fs = 25$)



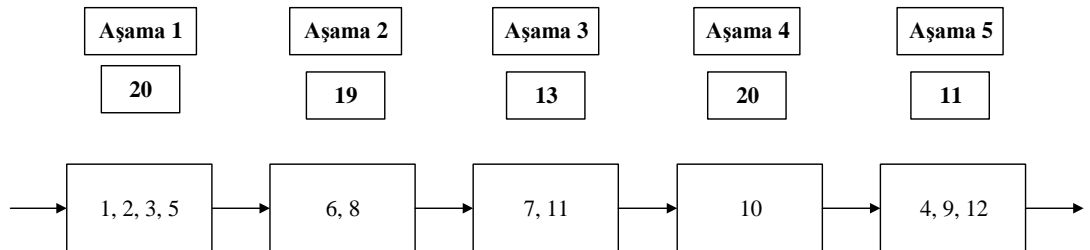
Şekil 3.33. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fs = 50$)



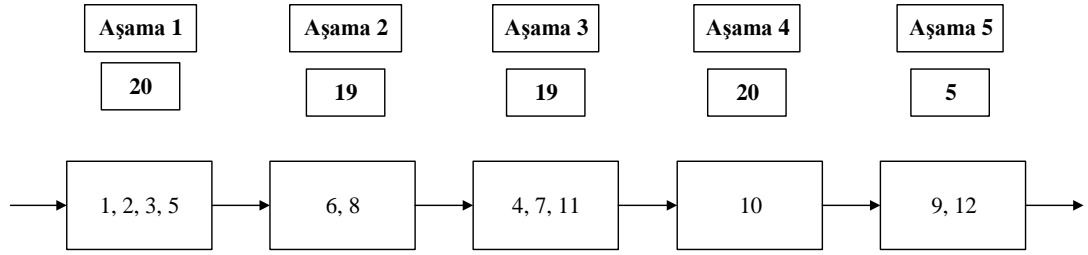
Şekil 3.34. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fs = 100$)



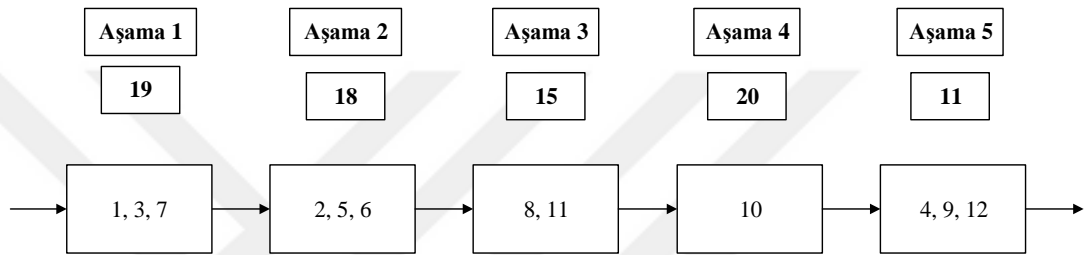
Şekil 3.35. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fs = 150$)



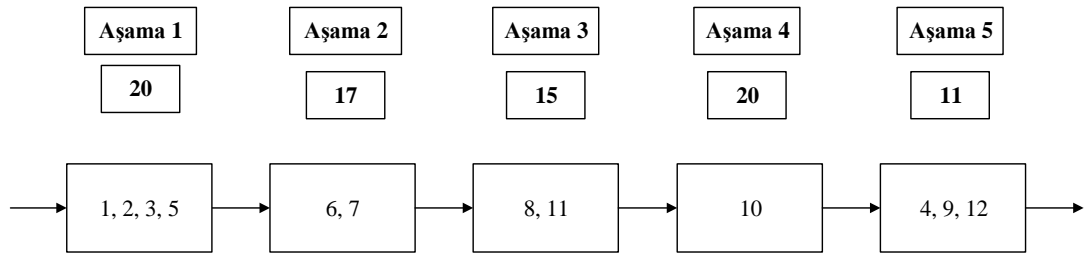
Şekil 3.36. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fs = 200$)



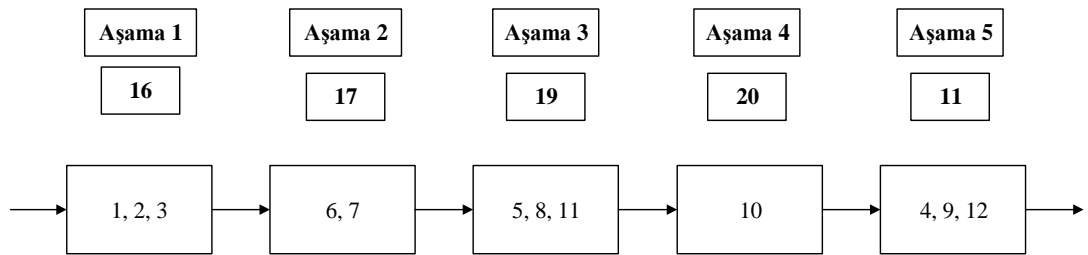
Şekil 3.37. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fs = 250$)



Şekil 3.38. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fs = 300$)

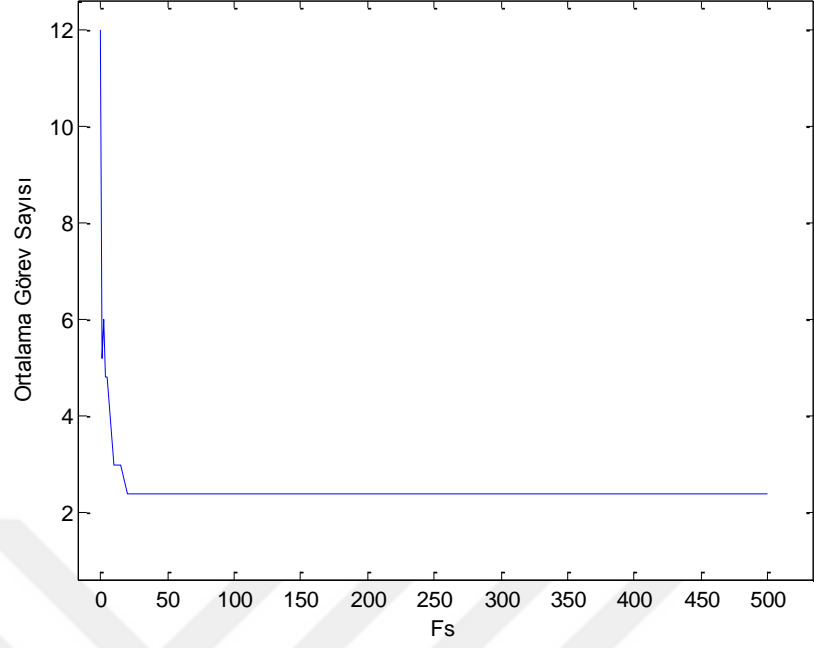


Şekil 3.39. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fs = 400$)

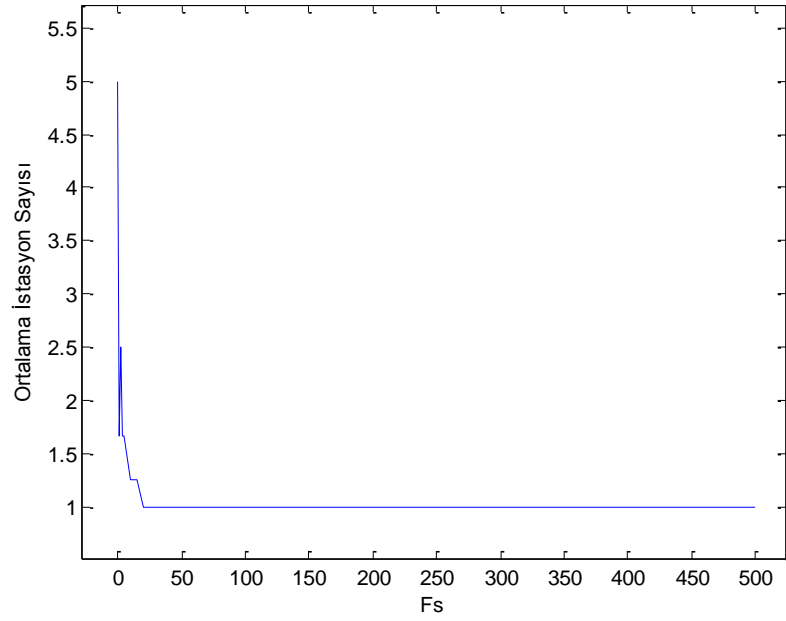


Şekil 3.40. Örnek problemin paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 500$)

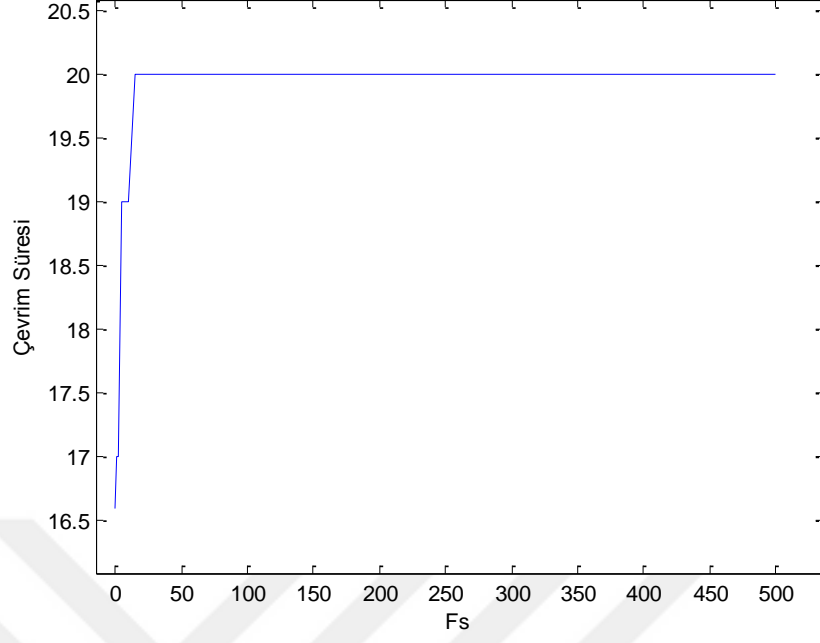
Paralel istasyon oluşturma cezasının dikkate alındığı paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modelinde (Denklem 3.44 - Denklem 3.53) F_s parametresinin değişimi sonucu elde edilen hat yerleşimleri incelendiğinde; F_s değerinin 0 olduğu durumda istasyonlara atanan görev sayısının ortalama değeri ve bir aşamadaki paralel istasyon sayısı değerinin en yüksek seviyeye ulaştığı görülmektedir. F_s parametresinin sıfırdan farklı bir değer alması ve giderek artması durumunda istasyonlara atanan ortalama görev sayısının giderek azaldığı ve 2.4 değerinde dengelendiği tespit edilmiştir (Şekil 3.41). Önerilen modelde asıl amaçlanan; F_s ceza değerinin artışı ile Önerilen modelde F_s parametresinin asıl kullanım amacı bir aşamadaki istasyon sayısının makul seviyelere çekilmesidir. (Denklem 3.47). Sonuçlara bu açıdan bakılacak olursa; F_s parametresinin değeri arttıkça açılan paralel istasyonu sayısının da gittikçe azalarak 1 seviyesinde dengelendiği görülmektedir (Şekil 3.42). F_s 'nin 20 ve üzerindeki değerleri için montaj hattındaki bütün istasyonların seri olarak düzenlendiği belirlenmiştir. Dolayısıyla elde edilen test sonuçları, Denklem 3.47'de kullanılan kısıt yapısının bu amacı sağladığını göstermektedir. Şekil 3.43'te de çevrim süresinin F_s parametresine göre değişimine ilişkin bir grafiğe yer verilmiştir. F_s parametresinin artışına bağlı olarak bir aşamadaki paralel istasyon sayısının azaldığı, bunun bir sonucu olarak da çevrim süresinin 16.60 olan ideal değerden uzaklaştığı görülmektedir. Şekil 3.44'te ise çevrim süresi, ortalama görev sayısı ve ortalama paralel istasyon sayısı gibi ölçütlerin F_s parametresindeki değişime göre değişimlerinin bir grafik üzerinde ifade edilmesi sağlanmıştır.



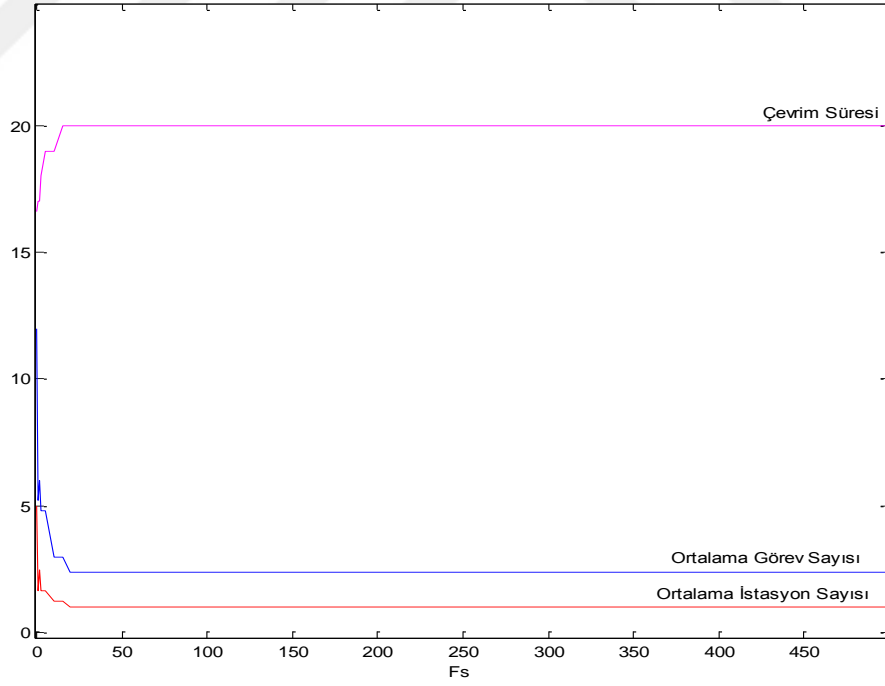
Şekil 3.41. İş istasyonu başına düşen ortalama görev sayısının F_s parametresine göre değişimi



Şekil 3.42. Bir aşamadaki ortalama istasyon sayısının F_s parametresine göre değişimi



Şekil 3.43. Çevrim süresinin F_s parametresine göre değişimi



Şekil 3.44. F_s parametresine göre bütün ölçütlerdeki değişimin karşılaştırılmalı gösterimi

3.2.3. Paralel istasyon oluşturma sezgiseli

Tez çalışmasının bu bölümünde montaj hattı dengeleme problemlerinin üzümünde kullanılmak üzere, paralel istasyon oluşturma yaklaşımını temel alan bir sezgisel yöntem nerisi sunulmuştur. Bu sezgisel yönteme ait akış şeması Şekil 3.45'te belirtildiği gibidir. Bu akış şemasından da yola çıkılarak önerilen sezgisel yöntemi oluşturan basamaklar aşağıdaki gibi açıklanabilir:

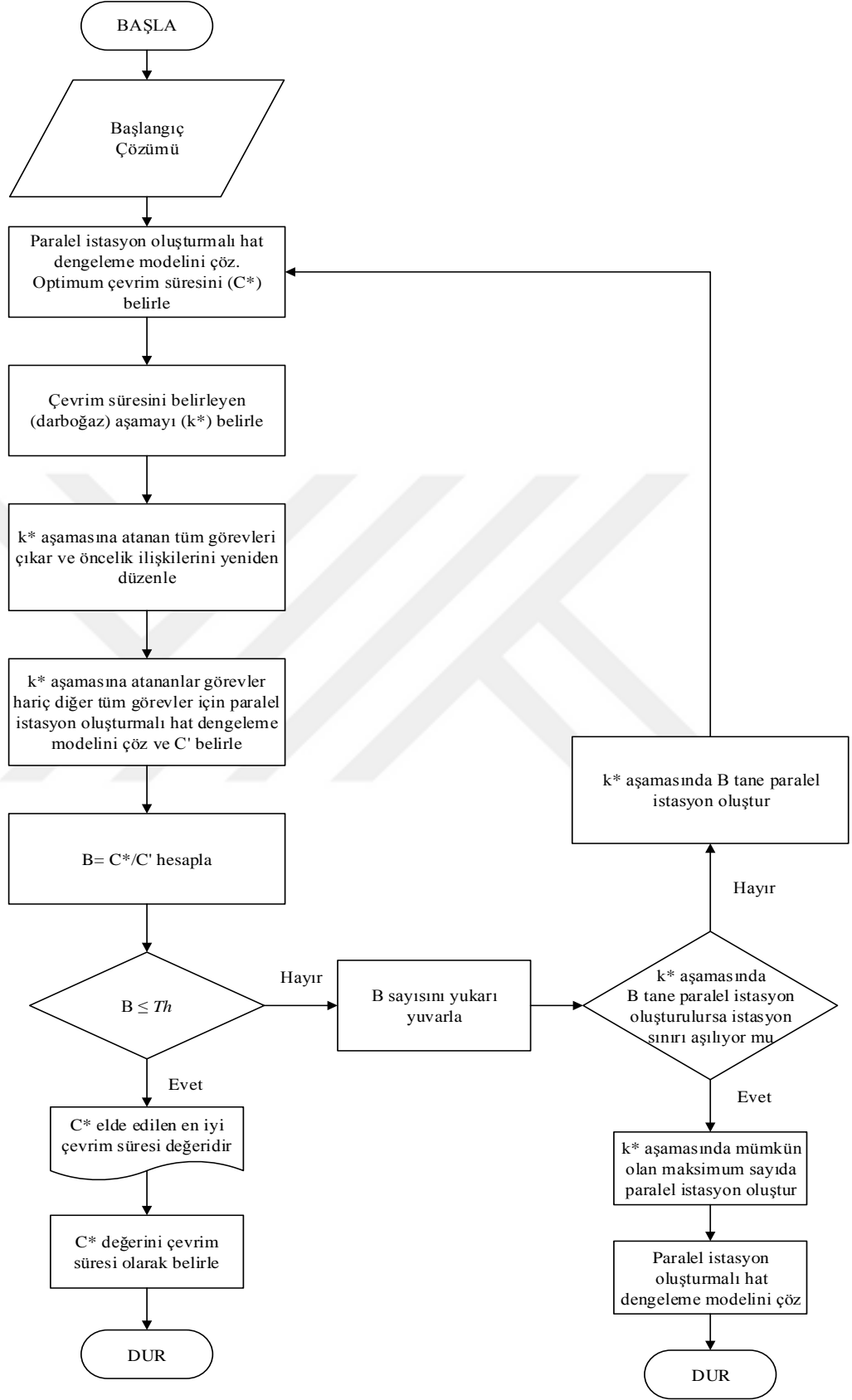
- i. Paralel istasyon oluşturma sezgiseli (PIOS) olarak adlandırılan bu sezgisel yöntemde, bir başlangıç üzümünden yola çıkılarak çeşitli adımların takip edilmesi sağlanmaktadır. Bu başlangıç zm için ise ilk olarak bazı parametrelerin, $K = hmaks$ olmak üzere; $\forall k$ için $j = 1$ şeklinde ayarlanması gerekmektedir. Bu adımda, aşama sayısının maksimum istasyon sayısına eşitlenmesi ve bütün aşamalar için açılan istasyon sayısının bire eşitlenmesi ile bütün istasyonların seri bir şekilde düzenlenmesi sağlanmuştur. Başlangıç zm bir anlamda, problemin klasik Tip-II problemi olarak üzülmesi ile eşdeğerdir.
- ii. İlgili parametrelerin belirtilen şekilde düzenlenmesinin ardından problemin, Denklem 3.24 - Denklem 3.33'te ayrıntıları verilen sınırlandırılmamış paralel istasyon oluşturmalı hat dengeleme modeli ile üzülmesi sonucunda çevrim süresi değeri (C^*) elde edilmektedir. Elde edilen ilk C^* değeri bir başlangıç zm olmakla birlikte, paralel istasyon oluşturma sezgisel için bir sınır değerini ifade etmektedir. Çünkü paralel istasyon oluşturma sezgiseli sonucu elde edilen en iyi çevrim süresi değeri bu başlangıç üzümünden daha kötü bir sonuç olamaz. Bir başka deyişle, PİOS yönteminin uygulanması ile elde edilen çevrim süresi değerini ya C^* değerine eşit ya da daha bu değerden daha iyi bir zm vermektedir.
- iii. Parametre düzenlemeleri yapılan matematiksel programlama modelinin zdrlmesi ile elde edilen ilk C^* değerini başlangıç üzümünü ifade etmektedir ve sezgisel yöntemin her bir döngüsünde bu değer kaydedilmektedir. Bununla birlikte bu aşamada, bu çevrim süresi değerini belirleyen darboğaz aşamanın da tespit edilmesi gerekmektedir. Belirlenen darboğaz aşama (k^*) başlangıç zm için darboğaz istasyon anlamına da gelmektedir. Darboğaz aşamanın birden fazla

olması durumunda ise en az sayıda görevi içeren aşamanın k^* olarak belirlenmektedir.

- iv. Sonraki adımda ise belirlenen k^* aşamasındaki bütün görevler çıkarılarak, kalan bütün görevler için öncelik ilişkileri yeniden düzenlenmelidir.
- v. Öncelik ilişkileri yeniden düzenlenen problem için sınırlandırılmamış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli yeniden çözdürülerek C' değeri elde edilmelidir.
- vi. Elde edilen C^* ve C' değerleri kullanılarak B parametresi hesaplanmalıdır. Hesaplanan B parametresinin önceden belirlenen bir eşik değerinden (Th) küçük veya büyük olması durumuna göre sonraki adımlar takip edilmelidir.
- vii. B parametresinin eşik değerden küçük veya eşit olması durumunda hesaplanan C^* değerinin elde edilen en iyi çevrim süresi olduğuna karar verilerek, C^* değerinin çevrim süresi olarak belirlenmesi sağlanmalı ve sezgisel algoritma sonuçlandırılmalıdır.
- viii. B parametresinin belirlenen eşik değerden büyük olması durumunda ise B değerinin yukarı yuvarlanması sağlanmaktadır. Bu adımda B 'nin ondalık kısmı 0.7'den büyükse bu değer 2 yukarı, küçük ise 1 yukarı tamsayıya yuvarlanmalıdır. Bu eşik değerleri ise probleme veya incelenen sisteme göre değişiklik gösterebilir. Bir sonraki adım da ise belirlenen k^* aşamasında B tane paralel istasyon oluşturulması halinde toplam istasyon sınırının aşılması durumu kontrol edilmelidir.
- ix. Eğer belirlenen darboğaz aşamasında B tane paralel istasyon oluşturulduğunda toplam istasyon sınırı aşıyorsa, k^* aşamasına mümkün olan en fazla sayıda paralel istasyon atanmalıdır. İlgili parametreler de bu doğrultuda yeniden düzenlenerek matematiksel programlama modeli yeniden çözdürülmelidir. Son olarak da elde edilen sonuca göre çevrim süresi belirlenmeli ve algoritma sonuçlandırılmalıdır.

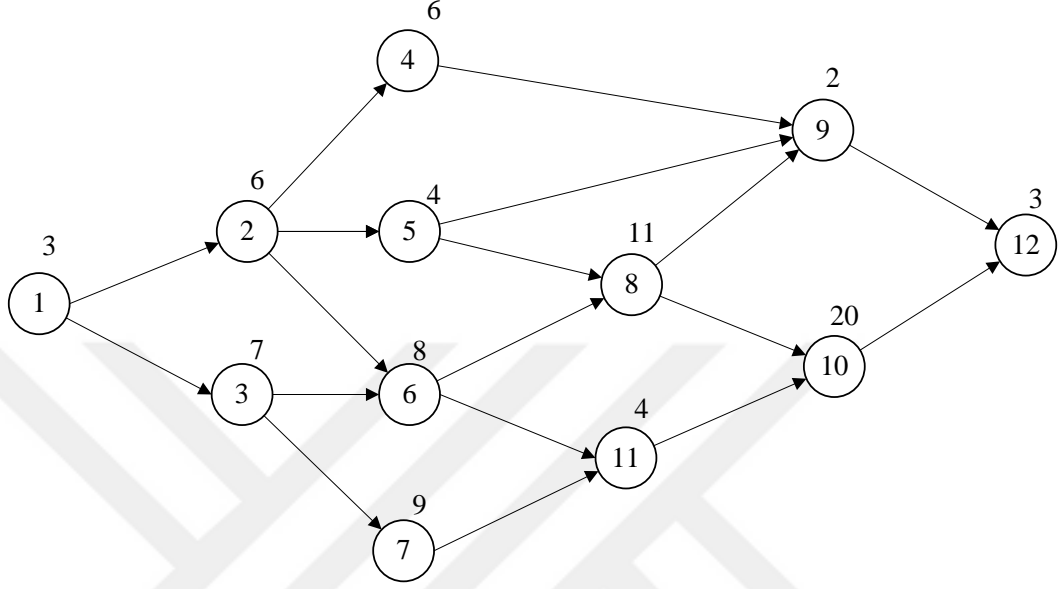
- x. Belirlenen darboğaz aşamasında B tane paralel istasyon oluşturulduğunda toplam istasyon sınırı aşılmıyor ise; k^* aşamasında B tane paralel istasyon açılmalıdır. Parametreler düzenlenerek matematiksel model yeniden çözdürülmelidir.





Şekil 3.45. Paralel istasyon oluşturma sezgiseli (PIOS) için akış şeması

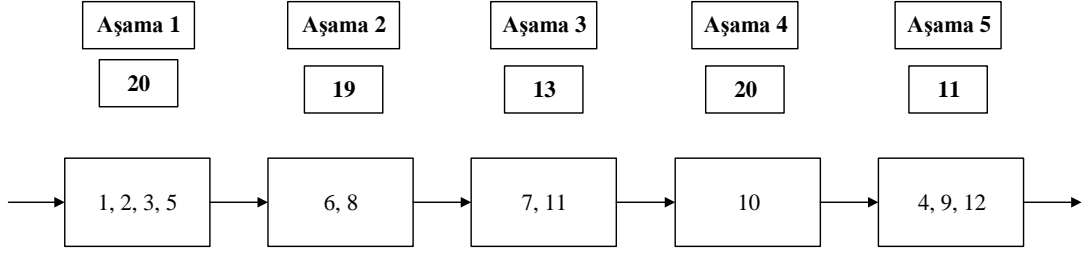
Tez çalışmasının bu kısmında, ayrıntıları önceki bölümde sunulan paralel istasyon oluşturma sezgiseli kullanılarak örnek bir hat dengeleme probleminin çözülmesi sağlanmıştır. Örnek probleme ait öncelik diyagramı ise Şekil 3.46’da verilmiştir.



Şekil 3.46. PİOS yöntemi için kullanılan örnek probleme ait öncelik diyagramı

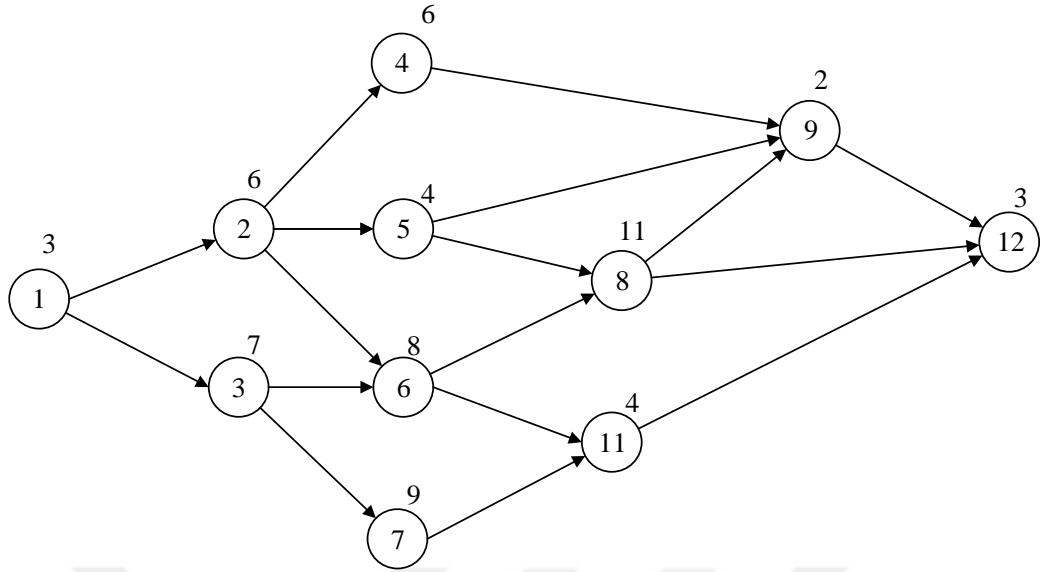
Önerilen PİOS yönteminin daha iyi açıklanması ve sonuçların analiz edilebilmesi amacıyla daha önceki bölümlerde de kullanılan Şekil 3.46’daki örnek problemden yararlanılmıştır. Problemin sezgisel algoritma ile çözümü ise aşamalarıyla birlikte aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

- i. Paralel istasyon oluşturma sezgiselinin ilk adımı olarak başlangıç çözümünün elde edilmesi gerekmektedir. Bu sebeple, $K = h_{maks}$ olmak üzere; $\forall k$ için $j=1$ şeklinde ayarlanarak parametreler düzenlenmiştir. Düzenlenen parametre değerleri ile birlikte Denklem 3.24 - Denklem 3.33’te ayrıntıları verilen matematiksel programlama modeli çözdürülmüştür. Matematiksel modelin çözümü ile elde edilen hat yerleşimi ise Şekil 3.47’de verildiği gibidir.



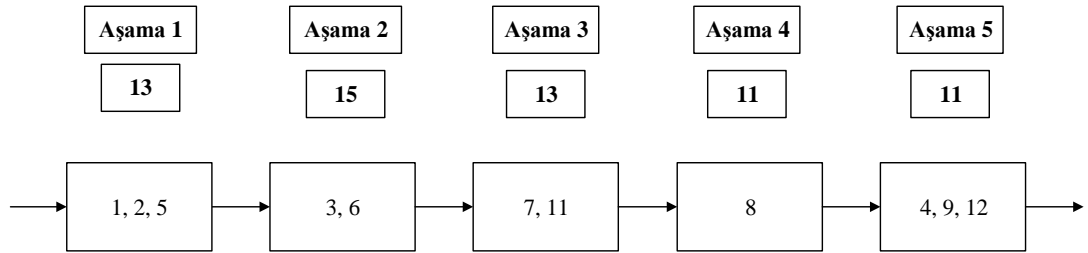
Şekil 3.47. Örnek problemin PİOS ile çözümüne ilişkin elde edilen başlangıç çözümü

- ii. Şekil 3.47’de hat yerleşimi sunulan başlangıç çözümünden yola çıkılarak, C^* ölçütünün değeri 20 olarak belirlenmiştir. Bu başlangıç çözümü değeri aynı zamanda önerilen sezgisel yöntem için bir sınır değeridir. Yani problemin PİOS ile çözülmesi sonucu elde edilecek çevrim süresi değerinin 20’ye eşit veya 20’den daha iyi bir değer olacağı bilinmektedir.
- iii. Sonraki adım da ise başlangıç çözümünden yararlanarak, C^* değerini belirleyen yani istasyon çevrim süresi 20’e eşit olan aşamalar darboğaz aşama olarak değerlendirilmektedir. Dolayısıyla Şekil 3.47’de 1. ve 4. aşamalar darboğaz aşamalar olduğu görülmektedir. Ancak bu problemde de olduğu gibi darboğaz aşamanın birden fazla olması durumunda en az sayıda görevi içeren aşamanın k^* olarak belirlenmesi gerekmektedir. Bu sebeple sadece bir görev içerdiği için 4. aşama k^* aşaması olarak belirlenmiştir.
- iv. 4. Aşama k^* aşama olarak belirlendiği için bu aşamaya atanan bütün görevler çıkarılarak öncelik ilişkilerinin yeniden düzenlenmesi gerekmektedir. Yeniden düzenlenen öncelik ilişkilerini gösteren öncelik diyagramı ise Şekil 3.48’de verilmiştir.



Şekil 3.48. PİOS yöntemi için kullanılan örnek probleme ait yeniden düzenlenen öncelik diyagramı

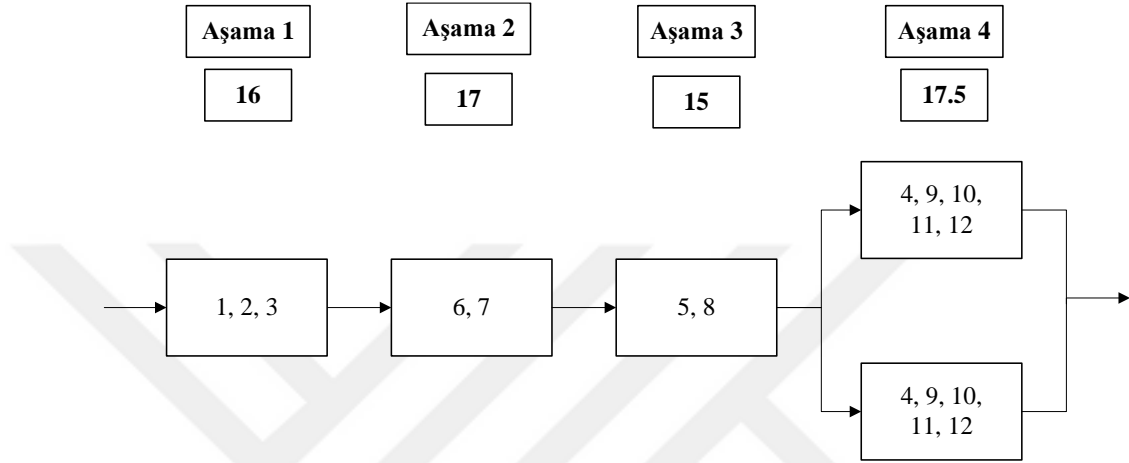
- v. Bu adımda ise öncelik ilişkileri yeniden düzenlenen problem için sınırlandırılmamış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli yeniden çözdürülerek C' değerinin hesaplanması gerekmektedir. Şekil 3.49'da yeniden düzenlenen öncelik ilişkilerine göre elde edilen hat yerleşimine yer verilmiştir. Buna göre C' değeri ise 15 olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 3.49. Öncelik ilişkilerinin yeniden düzenlenmesi sonucunda elde edilen hat yerleşimi

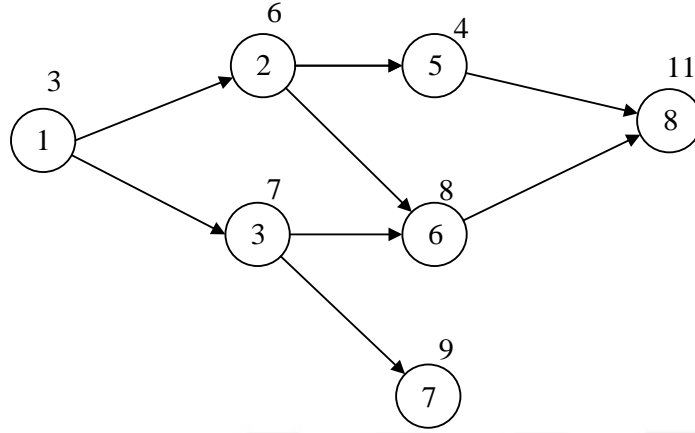
- vi. Elde edilen C^* değeri C' değerine bölünerek B değeri 1.33 olarak hesaplanmıştır. B parametresinin değerinin bu problem için belirlenen 1.3 eşik değerinden (Th) büyük olması sebebiyle B parametresinin değeri bir üst tamsayıya yani 2 değerine yuvarlanmaktadır. Bu sonuç göre de k^* aşamasında 2 adet paralel istasyon

oluşturulması gerekmektedir. Oluşturulan paralel istasyon miktarı, toplam istasyon sınırı ($hmaks$) olan 5 değerini aşmadığı için k^* aşamasında 2 adet paralel istasyon oluşturulacak şekilde parametreler yeniden düzenlenir ve matematiksel model yeniden çözülür. Bu parametre değişikliği sonucunda elde edilen yeni hat yerleşimi ise Şekil 3.50’de sunulmuştur.

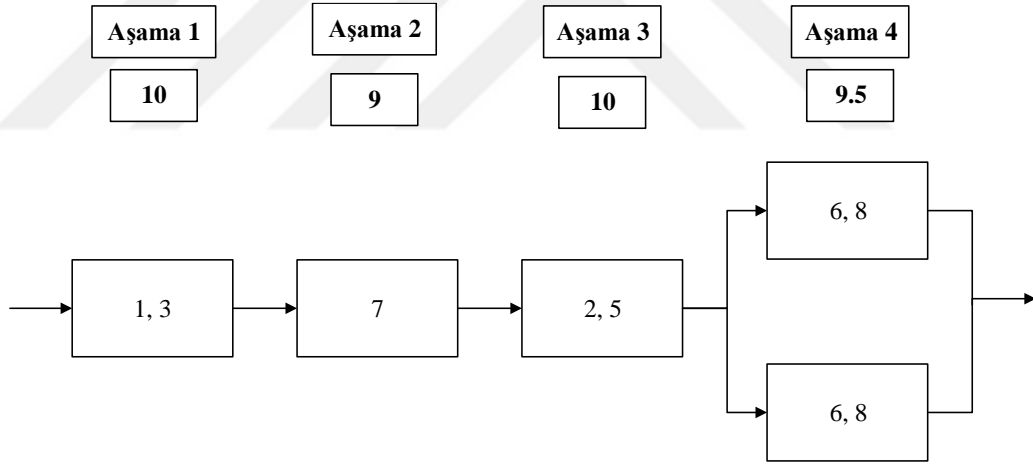


Şekil 3.50. Parametrelerin değişikliği sonucunda elde edilen yeni hat yerleşimi

vii. Parametrelerin yeniden düzenlenerek elde edilen Şekil 3.50’deki hat yerleşimi PİOS yönteminin 2. döngüsüne aittir. Dolayısıyla bu aşamadan sonra önerilen sezgisel yöntemin başına dönülerek gerekli adımlar 1. döngüde olduğu gibi tekrarlanmaktadır. Yeni C^* değerinin 17.5 olduğu ve k^* aşamasının 4. aşama olduğu görülmektedir. Bu aşamadaki görevler çıkarılarak öncelik ilişkileri yeniden düzenlenmiştir (Şekil 3.51).



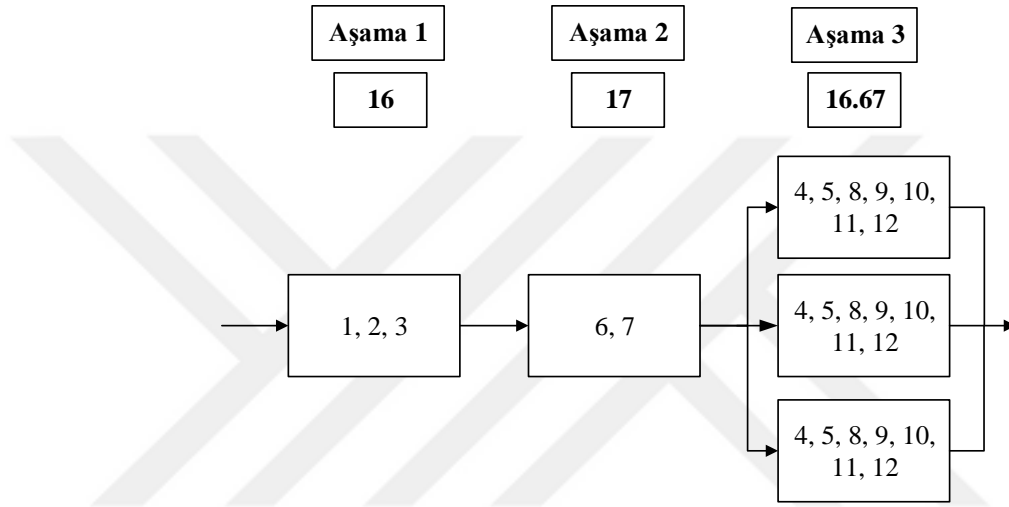
Şekil 3.51. PİOS yöntemi için kullanılan örnek probleme ait yeniden düzenlenen öncelik diyagramı (2. iterasyon)



Şekil 3.52. Öncelik ilişkilerinin yeniden düzenlenmesi sonucunda elde edilen hat yerleşimi (2. iterasyon)

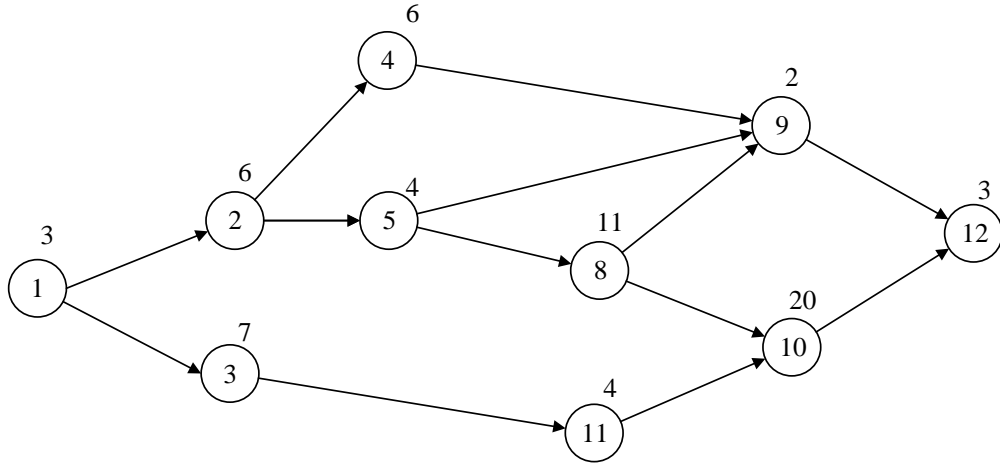
viii. 2. iterasyonda öncelik ilişkilerinin yeniden düzenlenmesi sonucu elde edilen hat yerleşiminden yararlanarak C' değerinin 10 olduğu görülmektedir. Bu bilgilerden yararlanarak da B değeri 1.75 olarak hesaplanmaktadır. Dolayısıyla B 'nin değeri 2 üst sayıya yuvarlanarak 3 olarak belirlenir.

ix. Elde edilen parametre değerlerine göre de k^* aşamasında 3 adet paralel istasyon oluşturulması gerektiği sonucuna varılmaktadır. Oluşturulan paralel istasyon miktarı, toplam istasyon sınırı ($hmaks$) olan 5 değerini aşmadığı için k^* aşamasında 3 adet paralel istasyon oluşturulacak şekilde parametreler yeniden düzenlenmeli ve matematiksel model yeniden çözülmelidir. Bu parametre değişimleri sonucunda elde edilen yeni hat yerleşimi ise Şekil 3.53'te sunulmuştur.

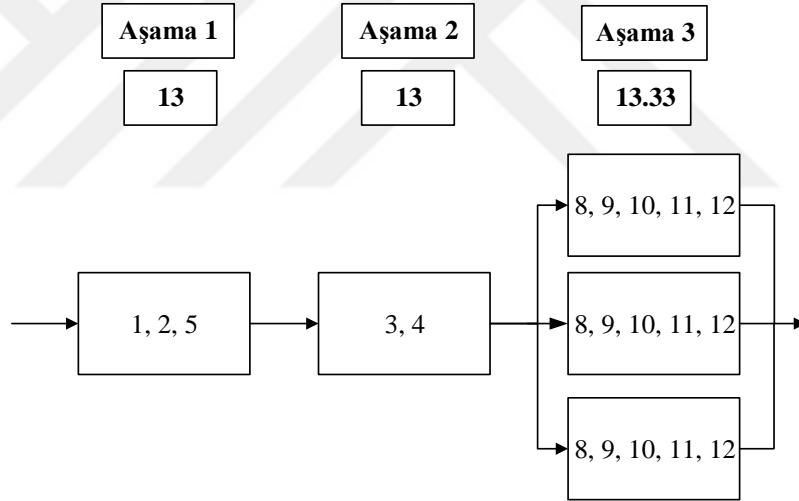


Şekil 3.53. Parametrelerin değişimi sonucunda elde edilen yeni hat yerleşimi (2. iterasyon)

x. Şekil 3.53'te 2. iterasyon sonucunda elde edilen hat yerleşimi ile yeni çevrim süresi değerinin 17 olduğu görülmektedir. Bu bilgilerden yararlanılarak C^* değeri 17 ve k^* değeri de 2 şeklinde güncellenmektedir. 2. aşamadaki 6 ve 7 nolu görevler çıkarılarak öncelik ilişkileri yeniden düzenlenmiştir (Şekil 3.54). Yeniden düzenlenen öncelik ilişkileri sonucunda Şekil 3.55'teki hat yerleşimi elde edilmiştir ve C' değeri 13.33 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.54. PİOS yöntemi için kullanılan örnek probleme ait yeniden düzenlenen öncelik diyagramı (3. iterasyon)



Şekil 3.55. Öncelik ilişkilerinin yeniden düzenlenmesi sonucunda elde edilen hat yerleşimi (3. iterasyon)

- xi. Hesaplanan B değeri ($17/13.33= 1.27$) bu problem için belirlenen eşik değerinden ($Th= 1.3$) küçük olduğu için en son hesaplanan C^* değeri PİOS yöntemi ile elde edilen en iyi çevrim süresi değeri olarak kabul edilmektedir. 3. iterasyon sonucunda bulunan 17 değeri çevrim süresi olarak belirlenerek önerilen sezgisel algoritma sonuçlandırılır.

Sonuç olarak, bir örnek problemten de yararlanarak önerilen paralel istasyon oluşturma sezgiseli (PİOS) algoritmasının işlerliği test edilmiştir. PİOS algoritmasının kullanılması esnasında dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan birisi ise eşik değerlerinin (Th) probleme uygun olarak belirlenmesidir. Bu problem özelinde paralel istasyon oluşturma kararı için 1.3; açılan paralel istasyon sayısı için de 0.7 eşik değerleri kullanılmıştır. Ancak farklı problemler ve montaj hattı sistemleri için farklı eşik değerleri kullanılarak PİOS algoritması uygulanabilir.

3.3. Önerilen Yaklaşımların Test Problemleri ile Karşılaştırılması

Çalışmanın bu bölümünde, paralel görev atama yaklaşımı ve paralel istasyon atama yaklaşımlarını temel alan paralel görev atamalı hat dengeleme modeli ve sınırlandırılmış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modellerinin literatürdeki bilinen problemler yardımıyla test edilmesi sağlanmıştır. Kullanılan test problemleri ve bu problemlerin özellikleri Çizelge 3.1’de verildiği gibidir. Hat dengeleme literatüründe önerilen modellerin test edilmesi amacıyla sıklıkla kullanılan bu örnek problemler, içerdikleri görev sayıları ve hesaplama karmaşıklığı bakımından farklı özelliklere sahiptir (Ek 1, Ek 2, Ek 3, Ek 4, Ek 5, Ek 6, Ek 7).

Test problemlerinin önerilen matematiksel programlama modelleri ile çözümlerine ilişkin elde edilen sonuçlar Çizelge 3.2’de verilmiştir. Önceki bölümlerde ayrıntılı bir şekilde açıklanan matematiksel programlama modelleri; paralel görev atamalı hat dengeleme modeli (PGA), sınırlandırılmış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli (PİO) ve geleneksel Tip-II modeli (KY) kullanılarak test problemlerinin çözümüne ilişkin elde edilen çevrim süresi değerleri Çizelge 3.2’de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Belirlenen test problemlerinin çözümünde, Intel® Core™ 2 Duo 2.27 GHz işlemci ve 3 GB geçici belleğe sahip bir bilgisayar, MPL paket programı ve Gurobi çözücüsü kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. Test problemleri ve bu problemlerin özellikleri

Test problemi	Görev sayısı	Toplam işlem süresi	Maks işlem süresi	Min işlem süresi	Maks/Min İşlem süreleri oranı
Pinto (Pinto ve ark. 1975)	10	193	62	8	7.75
Mansoor (Mansoor 1964)	11	185	45	2	22.5
Mitchell (Mitchell 1957)	21	105	13	1	6.5
Buxey (Buxey 1974)	29	324	25	1	12.5
Kilbridge (Kilbridge ve Wester 1961)	45	544	55	1	27.5
Hahn (Hahn 1972)	53	14056	1775	40	887.5
Tonge (Tonge 1960)	70	3510	156	1	78

Çizelge 3.2’de verilen sonuçlar incelendiğinde, önerilen matematiksel programlama modellerinin (PGA ve PİO), geleneksel Tip-II modeline göre çevrim süresi açısından eşit ya da daha iyi çözümler ürettiği görülmektedir. Bu sonuçlar önerilen yaklaşımların bazı durumlarda klasik yaklaşıma göre daha başarılı olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 3.2’de de görüleceği üzere; PGA ve PİO çözüm yaklaşımları ile bazı problemler için makul süreler içerisinde optimum çözüme erişilememiştir. Optimum çözümün elde edilemediği bu durumlarda ise, matematiksel programlama modeli 600 saniye çalıştırılarak elde edilen optimuma yakın çözümler dikkate alınmıştır.

Pinto örnek probleminin, klasik yaklaşım ve PGA ile çözümünde 67 saniye ile iki yöntem için de eşit çevrim süresi değerleri elde edilmiştir. Aynı problemin PİO yaklaşımı ile çözülmesi sonucunda ise her iki yönetime göre de daha verimli sonuçlar elde edilmiştir. Üstelik, Pinto örnek probleminde optimum çözüme en hızlı ulaşılan yöntemin de bu

çalışmada önerilen paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli olduğu gör÷lmektedir.

Çizelge 3.2. Önerilen yaklaşımların test problemleri yardımıyla karşılaştırılması

Test Problemi	Görev sayısı	Çözüm yaklaşımı	İstasyon Sayısı	Çevrim süresi (sn)	Hat Etkinliği (%)	Çözüm Süresi	Optimal çözüm
Pinto	10	PGA	3	67	96.02	0.06	✓
		KY		67	96.02	0.06	✓
		PİO		64.5	99.74	0.01	✓
Mansoor	11	PGA	3	62	99.46	0.08	✓
		KY		62	99.46	0.01	✓
		PİO		62	99.46	0.09	✓
Mitchell	21	PGA	6	18	97.22	10.02	✓
		KY		18	97.22	0.25	✓
		PİO		18	97.22	0.22	✓
Buxey	29	PGA	7	47	98.48	600	-
		KY		47	98.48	2.34	✓
		PİO		46.5	99.54	17.22	-
Kildbridge	45	PGA	10	55	98.91	600	-
		KY		55	98.91	1.3	✓
		PİO		55	98.91	600	-
Hahn	53	PGA	11	1 392.5	91.76	600	-
		KY		1 775	71.99	2.89	✓
		PİO		1 295	98.67	158	✓
Tonge	70	PGA	7	502	99.89	600	-
		KY		502	99.89	5.77	✓
		PİO		501.5	99.99	600	-

Mansoor, Mitchell, Buxey, Kildbridge ve Tonge'nin örnek problemlerinde ise üç matematiksel model ile de küçük farklılıklar dışında, birbirine çok yakın çevrim süresi değerlerinin elde edildiği gör÷lmektedir. Hahn'nın test probleminin çözümüne ilişkin

elde edilen sonuçlar ise önerilen modellerin klasik yaklaşıma karşı olan üstünlüğünü kanıtlar niteliktedir. Hahn probleminde, KY sonucu elde edilen optimum çevrim süresi değeri 1 775 saniye olarak hesaplanmış iken; PGA ile bu değer 1 392.5 saniye, PİO ile de 1 295 saniye olarak bulunmuştur. Bu üstünlük hat etkinliği değerlerine de yansımıştır. Hahn probleminde klasik yaklaşım ile elde edilen optimum hat tasarımında hat etkinliği değerinin % 71.99 gibi oldukça düşük bir değer olduğu görülmektedir. Buna karşın, PGA ile elde edilen hat etkinliği değeri % 91.76, PİO ile elde edilen hat etkinliği değeri de % 98.67'dir.

Bu sonuçlara göre genel bir değerlendirme yapmak gerekirse, önerilen çözüm yaklaşımlarının belirlenen test problemleri üzerinde başarılı sonuçlar ürettikleri görülmektedir. Ancak bu sonuçların bazı problemlerde daha açık bir şekilde görünmesi problemin özelliği ve karmaşıklığıyla doğrudan ilişkilidir. Önceki bölümlerde de ifade edildiği gibi bu çalışmada önerilen PGA ve PİO yaklaşımlarının en başarılı olduğu problem tipleri, bazı görevlerin çevrim süresinden büyük olduğu ve işlem süreleri arasındaki farkın çok yüksek olduğu hat dengeleme problemleridir. Bu amaç doğrultusunda önerilen PGA ve PİO yaklaşımlarının çözüm performansının en net görüldüğü problemin Hahn problemi olması tesadüf değildir. Problemin özelliğine dikkat edilecek olursa, Hahn probleminde en büyük işlem süresi ile en küçük işlem süresinin oranının 887.5 olduğu görülmektedir. Dolayısıyla elde edilen bu sonuçlar, önerilen PGA ve PİO yaklaşımlarının özellikle hedef olarak seçilen tipteki problemlerde klasik Tip-II modeline göre çok daha verimli çözümler ürettiğini göstermektedir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Çalışmanın bu bölümünde, önerilen matematiksel programlama modellerinin işlerliğinin test edilmesi amacıyla bir gerçek hayat uygulaması sunulmuştur. Bu uygulama çalışması, Bursa ilinde faaliyet gösteren ve otomotiv sektörünün önemli tedarikçileri arasında yer alan bir firmada gerçekleştirilmiştir.

Söz konusu firmada üretimin önemli bir bölümü montaj hatları aracılığıyla sağlanmaktadır. Mevcut yerleşim itibariyle 11 adet iş istasyonunun yer aldığı montaj hattında, iki farklı ana ürün grubuna ait 35 adet ürün çeşidinin imalatı gerçekleştirilmektedir. Konveyör hattı bulunmayan montaj hattında, malzeme iletimi için özel olarak tasarlanmış dört tekerlekli araçlar kullanılmaktadır. Montaj hattında yapılan incelemeler sonucunda, mevcut iş yükünün istasyonlar arasında dengesiz bir şekilde dağıtıldığı ve bu sebeple bazı istasyonlarda darboğazların oluştuğunu gözlenmiştir. Oluşan bu darboğazların ve istasyon çevrim sürelerindeki dengesizliklerinin ise hedeflenen üretim oranlarına ulaşılmasına engel olduğu tespit edilmiştir (Akbiyık ve Mammayew 2013).

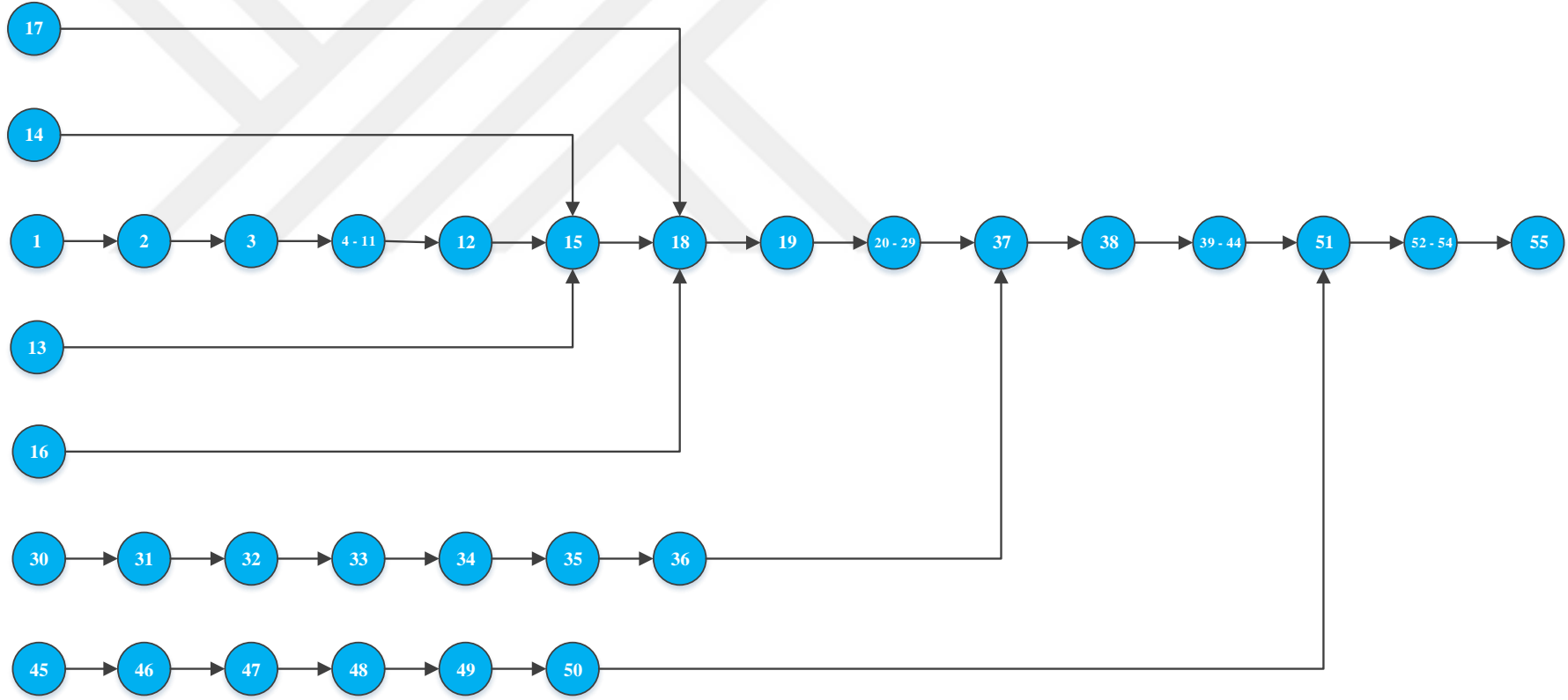
Örnek uygulama olarak ele alınan bu montaj hattında Şekil 4.1'deki öncelik diyagramında da görüleceği üzere 55 adet görev bulunmaktadır. Montaj hattına ait öncelik diyagramının görsel açıdan daha az yer kaplaması amacıyla 20-29 arasındaki birbiri ardına sıralanmış görevlerde olduğu gibi bazı görevlerin gösteriminde sadeleştirmeye gidilmiştir. Görevler arasındaki öncelik ilişkileri görev süreleri ile birlikte Çizelge 4.1'de de görülmektedir.

Uygulama çalışmasının ilk aşamasında daha önce hiçbir dengeleme çalışması yapılmamış olan montaj hattında geleneksel Tip-II modeli (Denklem 2.20 - Denklem 2.25) kullanılarak çevrim süresinin minimum değerini sağlayan optimum görev-istasyon atamaları belirlenmiş ve modelin çözümüne ilişkin sonuçların analizi gerçekleştirilmiştir. Sonraki aşamada ise uygulama örneği, önceki bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanan paralel görev atama ve paralel istasyon oluşturma yaklaşımlarını temel alan paralel görev atamalı hat dengeleme modeli ve sınırlandırılmış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modelleri kullanılarak çözülmüştür. Son olarak da geleneksel yaklaşım ve

önerilen matematiksel modellerden elde edilen çözümler karşılaştırılmıştır. Bu sayede önerilen matematiksel modellerin (Denklem 3.1 - Denklem 3.12 ve Denklem 3.15 - Denklem 3.23) montaj hattı dengeleme probleminin çözümündeki başarısı bir sanayi uygulamasından da yararlanılarak test edilmiştir.

Çizelge 4.1. Uygulama örneğine ilişkin görevler, görev süreleri (sn) ve öncelik ilişkileri

Görev numarası	Görev süresi	Öncüller	Görev numarası	Görev süresi	Öncüller
1	53.09	-	29	124.11	28
2	13.89	1	30	33.56	-
3	8.79	2	31	20.29	30
4	41.31	3	32	68.28	31
5	99.67	4	33	58.21	32
6	86.48	5	34	40.06	33
7	132	6	35	45.93	34
8	7.3	7	36	12.77	35
9	88.4	8	37	96.06	29, 36
10	103.2	9	38	37.03	37
11	34.9	10	39	90.13	38
12	15.7	11	40	25.91	39
13	238.5	-	41	14.64	40
14	90.1	-	42	173.4	41
15	339.9	12, 13, 14	43	194	42
16	67	-	44	102.18	43
17	66.4	-	45	50.41	-
18	70	15, 16, 17	46	28.59	45
19	691.68	18	47	31.56	46
20	62.73	19	48	114.7	47
21	90.8	20	49	65.98	48
22	154.92	21	50	9.77	49
23	20.84	22	51	423.11	50, 44
24	30.91	23	52	38.84	51
25	60.21	24	53	171.1	52
26	29.2	25	54	24.56	53
27	127.72	26	55	241.4	54
28	112.76	27			



Şekil 4.1. Uygulama örneğine ilişkin öncelik diyagramı

4.1. Uygulama Örneğinin Geleneksel Tip-II Problemi Olarak Çözülmesi

Tez çalışmasının uygulama bölümünde ilk olarak öncelik diyagramı Şekil 4.1’de verilen örnek problemin, Denklem 2.20 - Denklem 2.25’te ile ayrıntıları sunulan geleneksel Tip-II modeli kullanılarak çözümü gerçekleştirilmiştir.

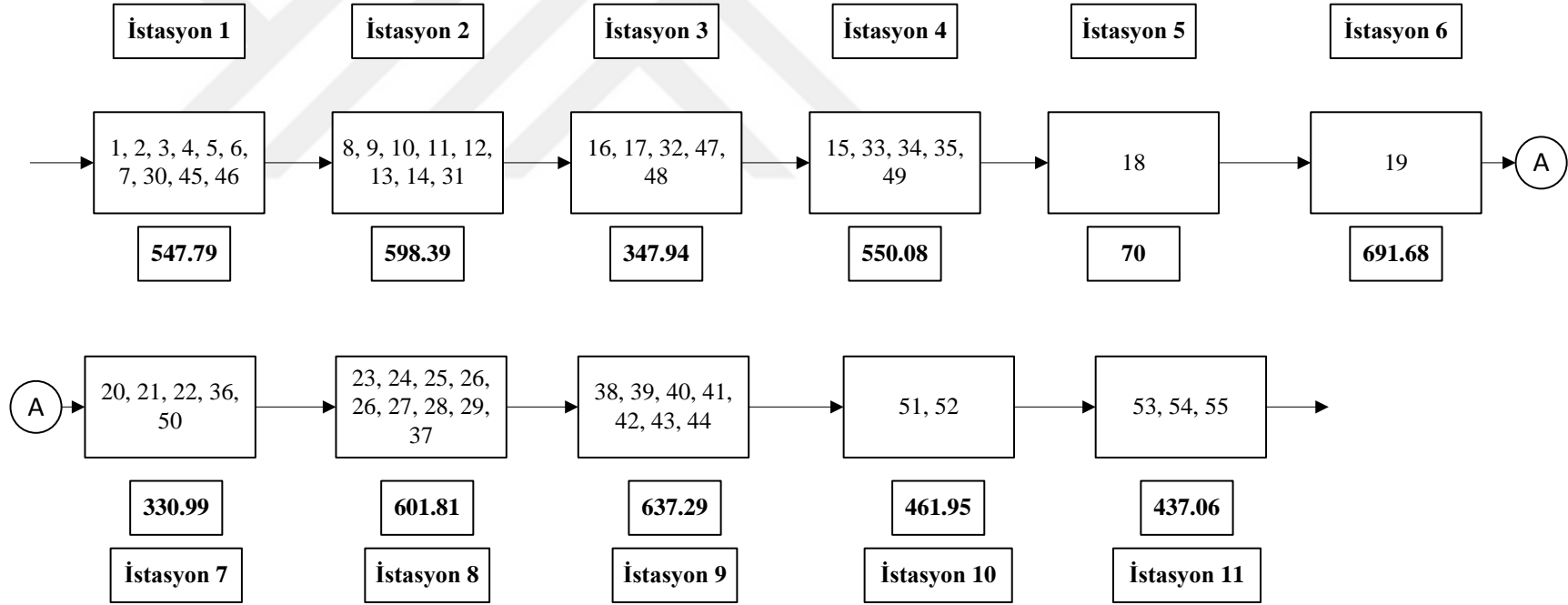
Örnek uygulama olarak ele alınan montaj hattının mevcut yerleşiminde 11 adet iş istasyonu bulunduğu için dengeleme çalışması yapılacak yeni hat yerleşiminde de kullanılan iş istasyonu sayısı 11 olarak belirlenmiştir. Çalışmanın bu bölümünde de çevrim süresinin minimizasyonunu hedefleyen bütün matematiksel programlama modellerinin çözümünde MPL (Mathematical Programming Language) paket programı ve Gurobi çözücüsü kullanılmıştır.

Uygulama probleminin, Denklem 2.20 – Denklem 2.25’de ayrıntıları sunulan klasik Tip-II montaj hattı dengeleme modelinin çözümü ile 2.39 saniye ve 13 909 iterasyon sonucunda optimum çevrim süresi, 691.68 saniye olarak bulunmuştur. Matematiksel modelin çözümünden elde edilen istasyon-görev atamaları ise Şekil 4.2’de görüldüğü gibidir.

Sonuçlar analiz edildiğinde, istasyon çevrim süreleri arasındaki dengesizlikler açıkça görülmektedir. Örneğin; 5. istasyon ve 6. istasyonun çevrim süreleri arasındaki fark 621.68 saniye yani neredeyse bir çevrim süresi kadardır. Klasik yöntemle elde edilen sonuçların verimsizliği % 33.29 olarak bulunan denge kaybı değeri ile doğrulanmaktadır. Hat etkinliğinin % 69.71 gibi düşük bir değer almasının en önemli nedeni daha önceki bölümlerde de ifade edilen; hat üzerindeki bazı görevlerin sürelerinin, diğer görevlerin sürelerinden neredeyse 2-3 kat daha büyük olmasıdır. Bu uygulama çalışmasında da görüldüğü gibi; montaj hattı üzerindeki bazı görevlerin işlem süreleri ile diğer görevlerin işlem süreleri arasında önemli derecede fark olduğu durumda, hat dengelemede klasik montaj hattı dengeleme yaklaşımları ile verimli sonuçlar elde edilememektedir. Uygulama örneğinde de 19 ve 51 numaralı görevlerin sürelerinin diğer görevlerin sürelerinden çok daha büyük olması dengesiz bir hat yerleşimine sebep

olmaktadır. Montaj hattı üzerindeki bu dengesiz yerleşimin ise üretim hattında birçok probleme yol açması kaçınılmazdır. Örneğin, 6 numaralı istasyonun önünde ciddi miktarda birikmelerin olacağı açıktır. Dolayısıyla böyle bir montaj hattı tasarımı ile istenilen üretim oranlarına ulaşılması pek de mümkün görünmemektedir. Ancak bu tez çalışmasında önerilen paralel görev atama yaklaşımı ve paralel istasyon oluşturma yaklaşımından yararlanılarak bu özel durumundan kaynaklanan dezavantajlar ortadan kaldırılabilir.





Şekil 4.2. Uygulama örneğinin Geleneksel Tip-II problemi olarak çözümü

4.2. Uygulama Örneğinin Paralel Görev Atamalı Hat Dengeleme Modeli ile Çözülmesi

Önceki bölümlerde ayrıntıları sunulan uygulama örneğinin klasik Tip-II problemi olarak değerlendirilmesi sonucunda elde edilen en iyi çevrim süresi değeri 691.68 saniye olarak belirlenmiştir. Çalışmanın bu kısmında ise, montaj hattı dengeleme problemlerinin çözümünde yeni bir teknik olan paralel görev atamalı hat dengeleme modeli ile uygulama probleminin çözülmesi sağlanmıştır.

Paralel görev atamalı hat dengeleme modelini diğer hat dengeleme modellerinden ayıran temel özellik; bazı görevlerin birden fazla iş istasyonunda yer almasına olanak tanınmasıdır. Bu sayede işlem süresi diğer görevlerden aşırı derecede büyük olan bir görevin birden fazla istasyona atanması sağlanarak; bu görevin çevrim süresini sınırlandırması önlenmektedir. Örneğin; öncelik ilişkileri gözetilerek iki farklı istasyona atanan işlem süresi çevrim süresinden veya diğer görevlerin işlem sürelerinden çok büyük olan görevler eş zamanlı olarak yapılmakta, bu sayede bu görevlerin işlem süreleri çoklanma seviyesi oranında azaltılmaktadır.

Paralel görev atamalı hat dengeleme modeli (Denklem 3.1 - Denklem 3.12) örnek uygulamanın çeşitli senaryoları için yeniden düzenlenerek; Intel® Core™ 2 Duo 2.27 GHz işlemci ve 3 GB geçici belleğe sahip bir bilgisayarda, MPL paket programı ve Gurobi çözücüsü kullanılarak çözdürülmüştür.

Çalışmanın bu bölümünde, paralel görev atama yaklaşımına yönelik olarak geliştirilen matematiksel model (Denklem 3.1 - Denklem 3.12) ve U parametresine bağlı olarak üretilen 5 farklı senaryo kullanılarak uygulama probleminin çözümü gerçekleştirilmiştir. Denklem 3.9'daki kısıtta da görüleceği üzere U parametresi, birden fazla istasyonda yer alabilecek görev sayısının üst sınırını ifade etmektedir. Bu 5 farklı senaryo belirlenirken; öncelikle U parametresi için bir sınırlandırma uygulanmamış (serbest bırakılmış), sonrasında ise paralel görev sayısı üst sınırı (U) sırasıyla; 1, 2, 3 ve 5 şeklinde düzenlenmiştir.

Bilindiği üzere montaj hattı dengeleme problemi NP-Hard tipinde bir problemidir. Paralel görev atama yaklaşımı temel alınarak geliştirilen matematiksel modelin örnek uygulamanın çözümünde kullanılması ile elde edilen hesaplama sonuçları da bunu destekler niteliktedir. Çünkü, uygulama problemine ait 5 farklı senaryo için yeniden düzenlenen matematiksel programlama modelinin yukarıda özellikleri belirtilen kişisel bilgisayar üzerinde, MPL paket programı ve Gurobi çözücüsü kullanılarak koşturulması sunucunda makul süreler içerisinde optimum çevrim süreleri elde edilememiştir. Örneğin; çoklanan görev sayısının sınırlandırılmadığı 1. senaryo için 55 900 saniye (15 saat 31 dakika ve 40 saniye) sonucunda optimum çözüm elde edilememiştir. Bu sebeple çeşitli senaryolar ve önerilen yaklaşımlar için elde edilen sonuçların karşılaştırılabilmesi amacıyla kullanılan MPL paket programı için çözüm süresi 7 200 saniye olarak sınırlandırılmıştır. Bu süre içerisinde optimum çevrim süresine ulaşılamayan durumlarda ise elde edilen sonuçlar yaklaşık çözüm olarak değerlendirilmiştir.

U parametresinin ve çözüm süresinin sınırlandırılmadığı duruma ilişkin sonuçlar Çizelge 4.2’de ve bu sonuçlar ile elde edilen istasyon-görev atamaları Şekil 4.3’te sunulmuştur. Paralel görev atama yaklaşımını temel alan, 1 265 adet 0-1 tamsayı olmak üzere toplamda 1 277 değişken ve 7 932 kısıt yapısı içeren matematiksel programlama modelinin 55 900 saniye çalıştırılması ve 60 833 682 iterasyon sayısı sonucunda optimum çevrim süresi elde edilememiştir. Belirtilen çözüm süresi ve iterasyon sayısı ile ulaşılan yaklaşık çözüm değeri ise 483.96 saniye olarak bulunmuştur.

Öncelikle uygulama problemi, klasik Tip-II problemi olarak ele alınmış ve bu yaklaşıma göre çevrim süresinin optimum değeri 691.68 olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu çevrim süresi ve % 33,29’lik denge kaybı değerlerinin oldukça yüksek değerler almasının sebepleri önceki bölümde ifade edilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde ise klasik yaklaşımla çözülen aynı örnek uygulamanın önerilen paralel görev atamalı hat dengeleme modeli ile çözümüne yer verilerek, iki yaklaşıma göre bulunan sonuçların karşılaştırılması sağlanmıştır. Paralel görev atama yaklaşımı kullanılarak elde edilen 483.96 çevrim süresi değeri optimum sonuç olmasa da, klasik yaklaşım ile bulunan çevrim süresi değerine göre % 30.03 oranında bir iyileştirme sağlamıştır. Çevrim

süresindeki bu kazancın yanı sıra % 99.09 hat etkinliği değerinin de klasik yaklaşımla bulunan % 66.71 hat etkinliği değerine göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir.

Elde edilen bu sonuçlar önerilen paralel görev atamalı hat dengeleme modelinin montaj hattı dengeleme problemlerinin çözümünde sağladığı kazanımları açıkça ortaya koymaktadır. Bu sonuçlara ilişkin sayısal değerler Çizelge 4.2’de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Çizelge 4.2. Uygulama örneğinin iki ayrı yaklaşım ile çözümüne ilişkin elde edilen sonuçların karşılaştırmalı analizi

	Atanan Görevler	
	Klasik Yaklaşım	Paralel Görev Atama Yaklaşım
İstasyon 1	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 30, 45, 46	1, 2, 3, 4, 5, 6, 14, 30, 31, <u>32</u>
İstasyon 2	8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 31	7, 8, <u>32</u> , 33, <u>34</u> , 45, 46, 47, 48
İstasyon 3	16, 17, 32, 47, 48	9, 10, 11, 12, 13
İstasyon 4	15, 33, 34, 35, 49	15, 17, <u>34</u> , <u>35</u> , <u>49</u>
İstasyon 5	18	16, 18, <u>19</u>
İstasyon 6	19	<u>19</u> , 20, <u>21</u> , <u>35</u>
İstasyon 7	20, 21, 22, 36, 50	<u>21</u> , 22, 23, 24, 25, 26, 27, 36
İstasyon 8	23, 24, 25, 26, 26, 27, 28, 29, 37	28, 29, 37, 38, 39, <u>40</u>
İstasyon 9	38, 39, 40, 41, 42, 43, 44	<u>40</u> , 41, 42, 43, <u>44</u> , <u>49</u> , <u>50</u>
İstasyon 10	51, 52	<u>44</u> , <u>50</u> , 51
İstasyon 11	53, 54, 55	52, 53, 54, 55
	Performans Ölçütleri	
	Klasik Yaklaşım	Paralel Görev Atama Yaklaşım
Çevrim Süresi	691.68	483.96
Atıl Süre	2 333.5	48.56
Denge Kaybı	% 33.29	% 0.91
Hat Etkinliği	% 66.71	% 99.09

Önceki paragraflarda uygulama probleminin paralel görev atamalı hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin sonuçlar belirtilmiştir. Çalışmanın devamında ise paralel görev atama yaklaşımı için üretilen çeşitli senaryolar ve bu senaryolar için elde edilen sonuçlara değinilmiştir.

Paralel görev atamalı hat dengeleme modeline yönelik olarak üretilen senaryolar; Denklem 3.1 - Denklem 3.12’de belirtilen matematiksel programlama modelinin paralel görev sayısı (U) parametresinde yapılan değişimlerden yararlanılarak oluşturulmuştur (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.3. Paralel görev atama yaklaşımına yönelik üretilen senaryolar ve elde edilen sonuçlar

Senaryolar	Paralel Görev Sayısı Üst Sınırı (U)	Çevrim Süresi Değeri (sn)	Hat Etkinliği
1. Senaryo	Sınırlanmamış	483.96	% 99.09
2. Senaryo	1	488.81	% 98.10
3. Senaryo	2	486.64	% 98.54
4. Senaryo	3	484.47	% 98.98
5. Senaryo	5	483.97	% 99.085

Örnek uygulamanın paralel görev atamalı hat dengeleme modeli kullanılarak çözümüne ilişkin üretilen senaryolar Çizelge 4.3’te verilmiştir. Denklem 3.1 - Denklem 3.12’de ayrıntıları sunulan matematiksel programlama modelinde gerekli düzenlemeler yapılmış ve 7 200 saniye maksimum çözüm süresi ile her bir senaryo MPL paket programı ve Gurobi çözücüsü yardımıyla çözdürülmüştür. Bazı senaryolar için makul süreler içerisinde çevrim süresi değerlerine erişilmiştir. Örneğin U parametresinin 1 görev ile sınırlandırıldığı 2. senaryo için çevrim süresi 488.81 saniye olarak bulunmuştur. Makul süreler içerisinde çözüme erişilemeyen diğer her bir senaryo için ise 7 200 saniye çözüm süresi sonunda elde edilen yaklaşık çözümler de Çizelge 4.3’te verilmiştir. Bu çözüm değerleri üretilen senaryolar için en iyi çevrim süreleri olmasa da belirlenen maksimum çözüm süresine göre en iyi çevrim süresine yakın değerlerdir.

İlk senaryoda U parametresi sınırlandırılmamış ve maksimum çözüm süresi 7 200 saniye olarak belirlenmiştir. Bu değişiklikler matematiksel modele uygulanarak 1. senaryonun çözülmesi sağlanmış ve çevrim süresi değeri 483.96 saniye olarak bulunmuştur. Bu değer optimum çevrim süresi olmasa da optimuma yaklaşık bir sonuç olarak kabul edilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre hat etkinliği değeri de % 99.09 olarak belirlenmiştir. 1. senaryo olarak belirtilen bu problemin çözüme ilişkin hat yerleşimi Şekil 4.4'te verildiği gibidir. Bu yerleşime göre birden fazla istasyona atanarak paralel hale getirilen görevlerin; 19, 21, 35, 40, 44, 45, 49 ve 50 numaralı görevler olduğu görülmektedir.

1. senaryonun çözümü ile U parametresinin sınırlandırılmadığı durumlarda paralel görev sayısının oldukça yüksek değerlere ulaşabileceği gerçeği ortaya çıkmıştır. Paralel görev atama yaklaşımı sonucu bazı görevlerin birden fazla istasyonda eş zamanlı olarak işlem görmesine müsaade edilmektedir. Bu yaklaşımın üretim oranlarında ciddi artışlar sağlaması gibi avantajları olduğu kadar bazı dezavantajları da mevcuttur. Bu dezavantajlardan birisi de bu yaklaşımın montaj hatları için kontrolü ve denetimi oldukça zor bir durumu ortaya çıkarmasıdır. Çünkü işlem görmek üzere hatta yüklenen bir parça için, birden fazla istasyona atanan bir görevin hangi istasyonda uygulanacağı emek yoğun özellikteki montaj hatlarında bazı karmaşıklıklara yol açabilmektedir. Üretim hattındaki bu karmaşıklıkların ise birtakım gecikme ve aksaklıklara sebebiyet vermesi kaçınılmazdır. Bu sebeple zaten kontrolü ve denetimi zor olan bu yaklaşım ile tasarlanan hatlarda paralellik seviyesinin artması, karmaşıklığı giderek arttırmaktadır. Dolayısıyla paralel hale getirilen görev sayısının üst sınırını temsil eden U parametresi de paralel görev sayısının belirli seviyelerde tutularak bu karmaşıklığın önüne geçilmesi amacıyla kullanılmaktadır.

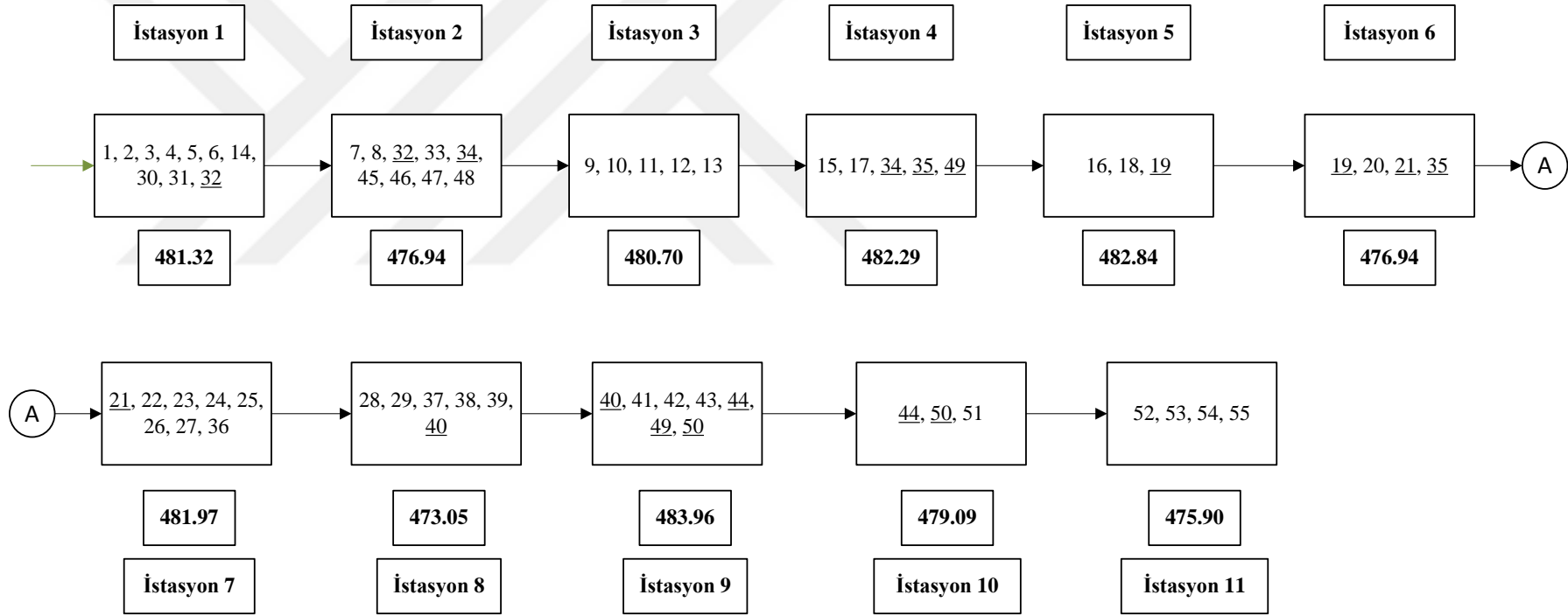
Oluşturulan 2. senaryoda da U parametresinin değeri 1 olarak belirlenmiştir. Bu da hat boyunca en fazla bir adet görevin paralel hale getirilmesine müsaade edileceği anlamına gelmektedir. 2. senaryonun çözümüne ilişkin hat yerleşimi Şekil 4.5'te verilmiştir. Oluşturulan diğer senaryoların aksine 2. senaryoda 290 saniyede bir çevrim süresi değerine ulaşılmıştır. 19 numaralı görevin hem 4. hem de 5. istasyonda yer aldığı hat yerleşiminde çevrim süresi 488.81 saniye olarak bulunmuştur. Hat etkinliği değeri ise % 98.10 olarak belirlenmiştir.

Paralel görev sayısının 2 görev ile sınırlandırıldığı 3. senaryo için elde edilen hat yerleşimi de Şekil 4.6'da sunulduğu gibidir. Önerilen matematiksel modelin çözümü ile optimuma yakın çevrim süresi 486.64 saniye ve hat etkinliği değeri de % 98.54 olarak bulunmuştur. Paralel görevlerin ise 19 ve 44 numaralı görevler olduğu görülmektedir.

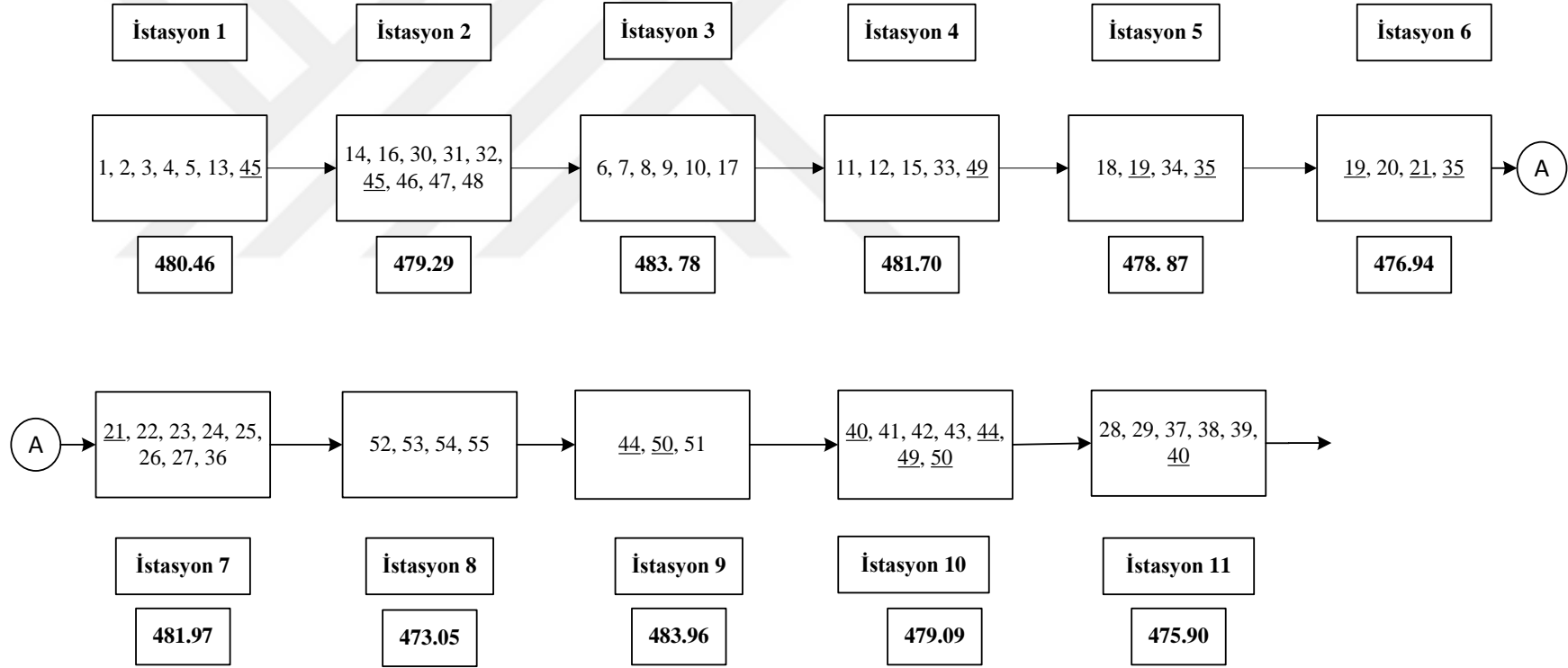
4. senaryo için elde edilen sonuçlara göre elde edilen çevrim süresi değeri 484.47 saniye ve hat etkinliği değeri de % 98.98 olarak belirlenmiştir. Paralel görevlerin ise 19, 32 ve 44 numaralı görevler olduğu Şekil 4.7'de de görülmektedir.

Oluşturulan son örnek durum olan 5. senaryoda da paralel görev sayısı 5 görev ile sınırlandırılmıştır. Bu örnek durumda ise optimuma yakın çevrim süresi değeri 483.97 saniye ve hat etkinliği değeri de % 99.085 olarak hesaplanmıştır. Paralel görevler de 19, 40, 44, 45 ve 49 numaralı görevler olarak sıralanmaktadır (Şekil 4.8)

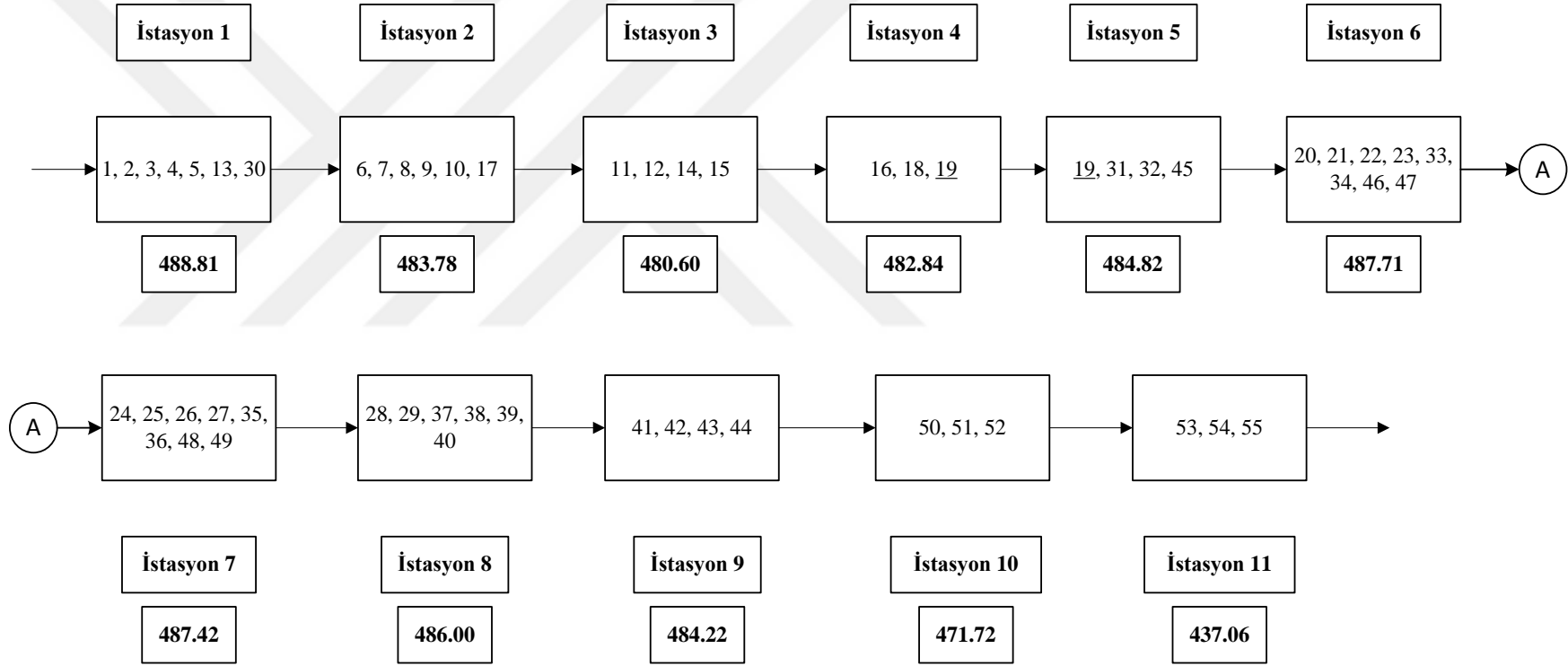
Oluşturulan senaryolar ve elde edilen sonuçlar incelendiğinde paralel görev sayısı arttıkça çevrim süresi ve hat etkinliği değerlerinin de giderek iyileştiği görülmektedir. Ancak sadece bu yaklaşımın sağladığı kazanımlar düşünülerek bu parametrenin sınırsız hale getirilmesi mümkün değildir. Daha önceki paragraflarda da bahsedildiği üzere; paralel görev sayısı arttıkça verimlilik artarken bir yandan da sistemin kontrolü ve idaresi zorlaşmaktadır. Bu sebeple elde edilecek kazanımlar ve karşılaşılması muhtemel denetim problemleri göz önünde bulundurularak dengeli bir çözüm tercih edilmelidir. Bu dengeyi belirleyecek en önemli faktör ise U parametresidir. Dolayısıyla hattın yapısı ve özellikleri dikkate alınarak U parametresi için en uygun değer belirlenmesi son derece önemli hale gelmektedir. U parametresinin değeri arttıkça bir yandan çevrim süresinde olumlu iyileşmeler gözlenirken bir yandan da maliyet unsuru devreye girmekte ve montaj hattının kontrolü zorlaşmaktadır. Dolayısıyla bu parametrenin olabildiğince düşük değerlerde tutulması sistemin kontrol edilebilirliği ve ekstra maliyetlerin düşürülmesi açısından oldukça önemlidir. U parametresinin seçiminde de bu bölümde olduğu gibi aşamalı bir yol izlenebilmektedir. Bunu gerçekleştirmek için de bir başlangıç değeri belirlenmeli ve bu değer aşamalı olarak değiştirilerek sonuçlar analiz edilmelidir.



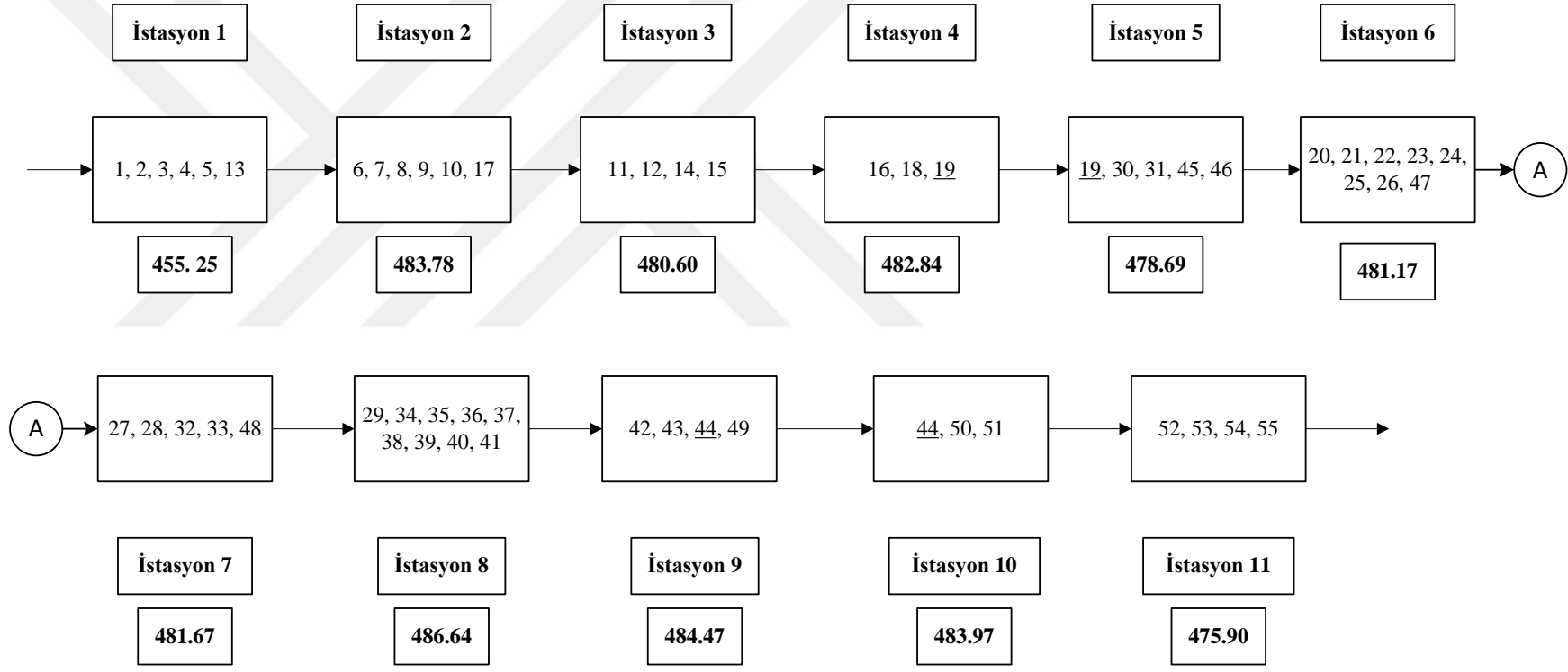
Şekil 4.3. Uygulama örneğinin paralel görev atamalı hat dengeleme modeli ile çözümü (U ve çözüm süresi sınırlanmamış)



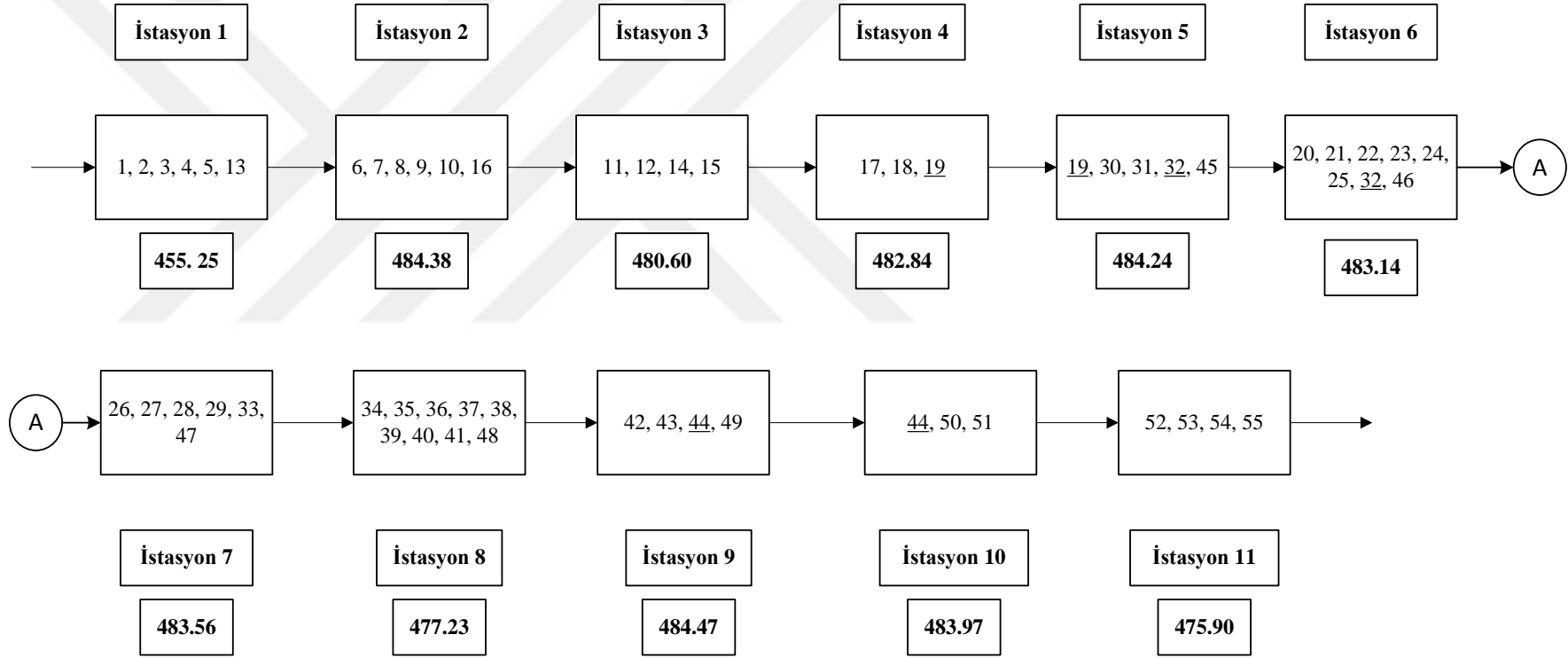
Şekil 4.4. Uygulama örneğinin paralel görev atamalı hat dengeleme modeli ile çözümü (1. senaryo)



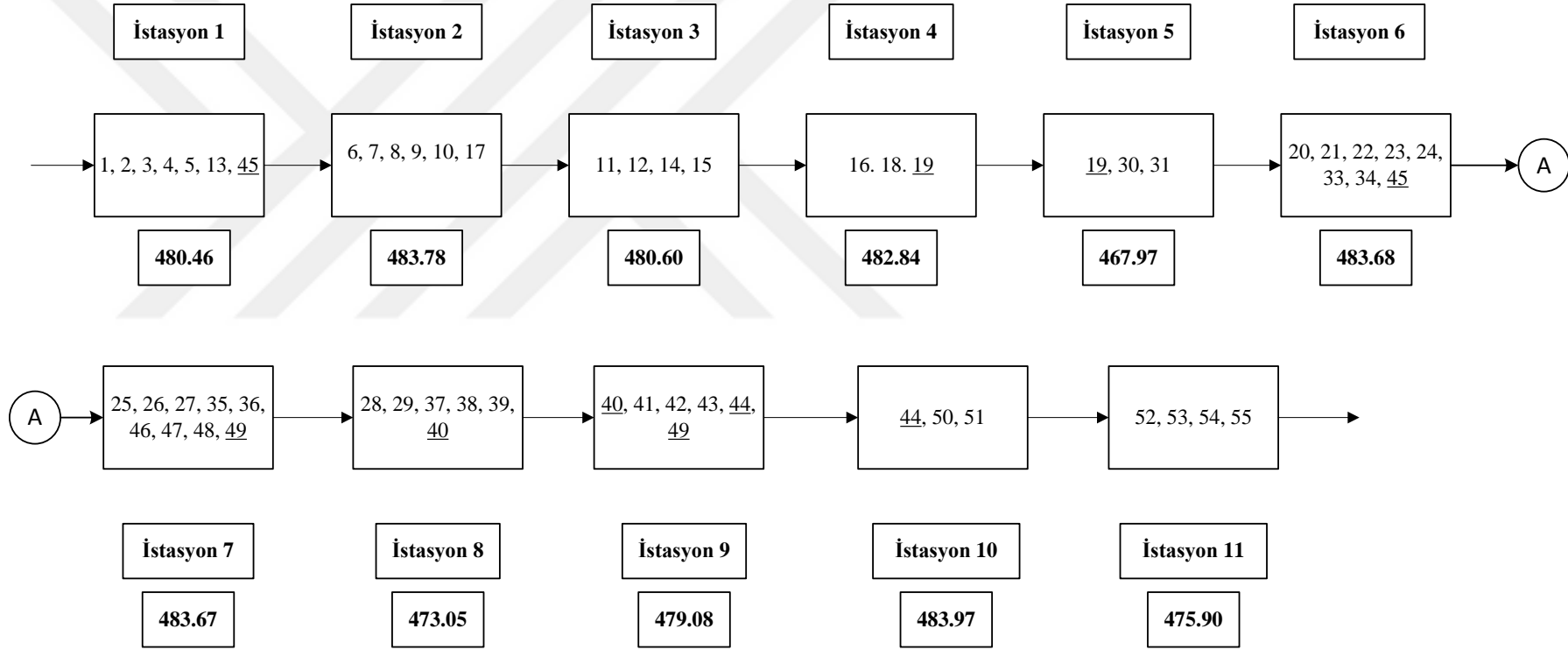
Şekil 4.5. Uygulama örneğinin paralel görev atamalı hat dengeleme modeli ile çözümü (2. senaryo)



Şekil 4.6. Uygulama örneğinin paralel görev atamalı hat dengeleme modeli ile çözümü (3. Senaryo)



Şekil 4.7. Uygulama örneğinin paralel görev atamalı hat dengeleme modeli ile çözümü (4. Senaryo)



Şekil 4.8. Uygulama örneğinin paralel görev atamalı hat dengeleme modeli ile çözümü (5. Senaryo)

4.3. Uygulama Örneğinin Paralel İstasyon Oluşturma Yaklaşımı ile Çözülmesi

Önceki bölümlerde uygulama örneğinin Klasik Tip-II problemi olarak değerlendirilmesi ve bu çalışmada önerilen paralel görev atamalı hat dengeleme modeli kullanılarak çözülmesi ile elde edilen sonuçlara yer verilmiştir. Uygulama örneği geleneksel Tip-II problemi olarak çözüldüğünde çevrim süresi 691.68 saniye ve hat etkinliği değeri de % 66.71 olarak bulunmuştur. Paralel görev atamalı hat dengeleme modeli kullanıldığında ise en iyi çevrim süresi değerine erişilememesine rağmen bulunan 483.96 saniye değeri ile problemin geleneksel Tip-II problemi olarak ele alınması sonucunda elde edilen 691.68 değerinden % 30.03 oranında daha iyi bir sonuç elde edilmiştir. Üstelik paralel görev atamalı hat dengeleme modeli ile bulunan % 99.09 hat etkinliği değerinin de klasik yaklaşımla bulunan sonuçtan çok daha başarılı olduğu görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlar, bu çalışma ile literatüre kazandırılmış paralel görev atamalı hat dengeleme modelinin montaj hattı dengeleme problemlerinin çözümünde sağladığı faydayı açıkça ortaya koymaktadır.

Çalışmanın bu bölümünde ise örnek uygulamanın çözümü, yine bu tez çalışmasında önerilen ve 5. bölümde ayrıntıları sunulan paralel istasyon oluşturma yaklaşımını temel alan hat dengeleme modelleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

4.3.1. Sınırlandırılmış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözülmesi

Paralel istasyon oluşturma yaklaşımı ile montaj hattının herhangi bir sürecinde birbirine eş birkaç istasyonun atanması sağlanarak, işlem süresi çevrim süresinden büyük olan görevlerin üretim oranını sınırlandırması engellenmektedir. Atanan bu denk istasyonlar donanım ve iş yükü bakımından tamamen birbiri ile aynı olmakla birlikte eş zamanlı olarak çalışmaktadırlar. Bu sayede paralel istasyon oluşturulan üretim aşamasındaki toplam iş yükü, kullanılan paralel istasyon sayısı oranında paylaştırılmaktadır.

Sınırlandırılmış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli (Denklem 3.15 - Denklem 3.23) örnek uygulamanın çeşitli senaryoları için yeniden düzenlenerek; diğer modellerde de olduğu gibi, Intel® Core™ 2 Duo 2.27 GHz işlemci ve 3 GB geçici belleğe

sahip bir bilgisayarda, MPL paket programı ve Gurobi çözücüsü kullanılarak çözdürülmüştür.

Çalışmanın bu bölümünde, paralel istasyon atama yaklaşımına yönelik olarak geliştirilen matematiksel modelin (Denklem 3.15 - Denklem 3.23) aşama sayısı (K) ve bir aşamada yer alabilecek paralel istasyon sayısı üst sınırı (M) parametrelerine bağlı olarak üretilen 4 farklı senaryo kullanılarak uygulama probleminin çözümü gerçekleştirilmiştir (Çizelge 4.4). Bu 4 farklı senaryo K parametresinin 7 ve 8, M parametresinin ise 2 ve 3 değerleri ile değiştirilmesi sonucunda elde edilmiştir.

Çizelge 4.4. Sınırlandırılmış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeline yönelik üretilen senaryolar

Senaryolar	Aşama sayısı (K)	Bir aşamada izin verilen paralel istasyon sayısı üst sınırı (M)
1. Senaryo	7	2
2. Senaryo	7	3
3. Senaryo	8	2
4. Senaryo	8	3

Uygulama problemine ait 4 farklı senaryo için yeniden düzenlenen matematiksel programlama modelinin, yukarıda özellikleri belirtilen kişisel bilgisayar üzerinde, MPL paket programı ve Gurobi çözücüsü kullanılarak koşturulması sunucunda makul süreler içerisinde çevrim süresi değerlerinin elde edilmesi sağlanmıştır (Çizelge 4.5).

Oluşturulan 1. senaryo ile montaj hattındaki aşama sayısı 7, bir aşamada yer alabilecek paralel istasyon sayısının üst sınırı 2 olarak belirlenmiştir. Bu senaryo sonucunda elde edilen hat yerleşimi Şekil 4.9'da sunulduğu gibidir. Önerilen matematiksel model çözülmesi ile 52 saniyede çevrim süresi 483.13 saniye olarak hesaplanmıştır. Tasarlanan hat yerleşiminde ise 3, 4, 5 ve 6 numaralı aşamalarda birbirine denk paralel istasyonların olduğu görülmektedir (Şekil 4.9).

Üretilen 2. senaryoda ise aşama sayısı 7 olarak sabit tutulmuş ve paralel istasyon sayısının üst sınırı 3 olacak şekilde değiştirilmiştir. Bu değişiklik ile birlikte çevrim süresi değeri 481.20 saniye ve hat etkinliği değeri % 99.66 bulunarak tüm senaryolar içindeki en iyi sonuçlara ulaşılmıştır. Üstelik çözüm süresi de 221 saniye gibi kabul edilebilir bir değere sahiptir. 2. senaryo için ulaşılan hat yerleşimi Şekil 4.10’da verilmiştir. Bu yerleşime göre 4. ve 6. aşamalarda birbirine paralel 3 istasyonun açıldığı görülmektedir.

3. senaryo için 83 saniye ve 1 670 164 iterasyon sonucunda çevrim süresi 484.22 saniye olarak bulunmuştur. Hat etkinliği değeri ise % 99.03 olarak belirlenmiştir. Şekil 4.11’de verilen hat yerleşimine göre; 4., 5. ve 7. aşamalarda paralel istasyonların oluştuğu görülmektedir.

Diğer senaryolarla çok farklı olmamakla birlikte 4. senaryo için de 1 272 saniye çözüm süresinde ve 8 554 550 iterasyon sonucunda çevrim süresi değeri 482.43 saniye hat etkinliği değeri de % 99.40 olarak hesaplanmıştır. Hat yerleşimine ilişkin sonuçlar ise Şekil 4.12’de ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bu yerleşimde de, 4. aşamada iki ve 7. aşamada üç adet paralel istasyonun oluşturulduğu görülmektedir.

Çizelge 4.5. Paralel istasyon oluşturma yaklaşımı ile elde edilen sonuçlar

Senaryolar	Çevrim Süresi (sn)	Hat Etkinliği	Çözüm süresi (sn)
1. Senaryo	483.13	% 99.26	52
2. Senaryo	481.20*	% 99.66	221
3. Senaryo	484.22	% 99.03	83
4. Senaryo	482.43	% 99.40	1 272

Bu sonuçlar dikkate alındığında uygulanan tüm senaryolar arasındaki en iyi çevrim süresi değerinin 2. senaryo ile elde edildiği görülmektedir (Çizelge 4.5). Hat etkinliği değerlerine ilişkin sonuçlara bakılacak olursa da tüm örnek durumlarda % 99’un üzerinde bir başarı oranına ulaşıldığı görülmektedir.

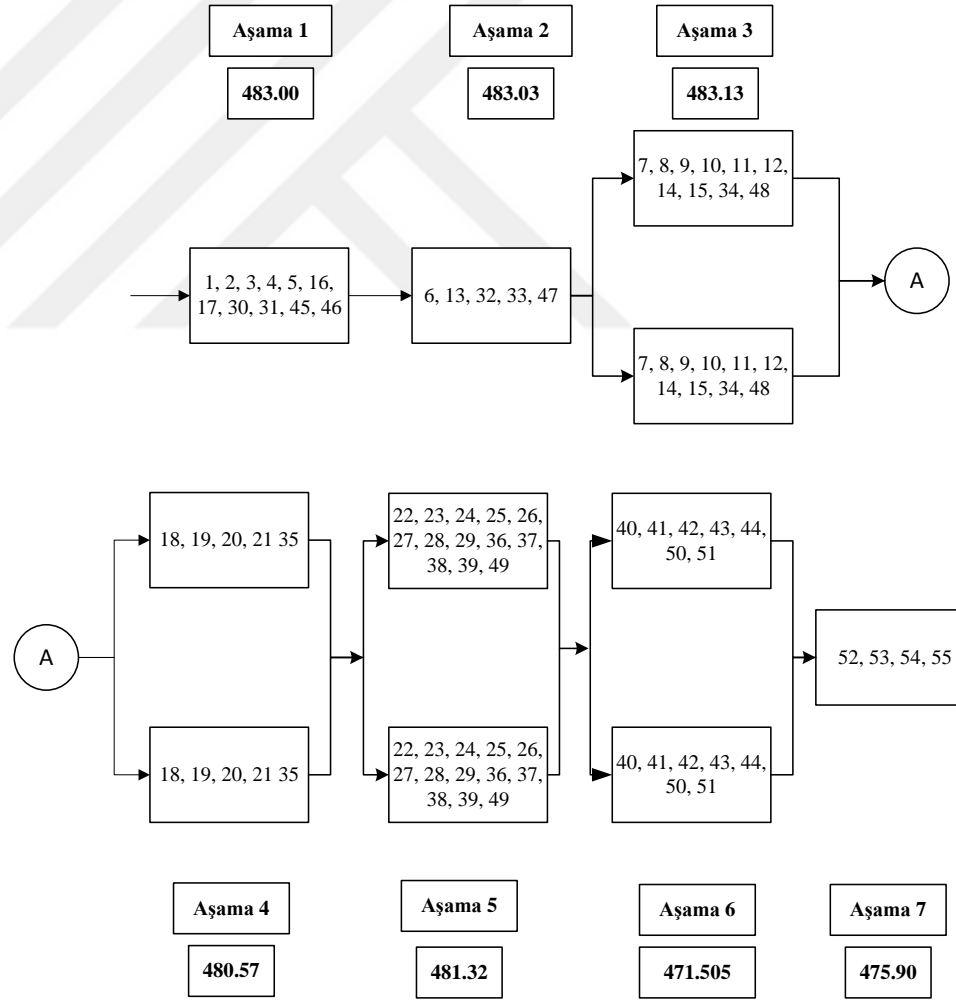
Çizelge 4.5'te belirtilen sonuçlar önerilen sınırlandırılmış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme yaklaşımının montaj hattı dengeleme problemlerinin çözümündeki başarısını açıkça ortaya koymaktadır. Her bir senaryo için matematiksel modelin çözdürülmesi ile elde edilen hat yerleşimleri ise Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de sunulmuştur.

Çizelge 4.6'da ise uygulama çalışmasının üç ayrı yaklaşım; geleneksel yaklaşım, paralel görev atamalı hat dengeleme modeli ve sınırlandırılmış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümlerine ilişkin kıyaslamalara yer verilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, bu tez çalışmasında önerilen iki yeni yaklaşımın da klasik yaklaşıma göre çok daha başarılı sonuçlar ürettiği açıkça görülmektedir. Önerilen iki yaklaşım arasındaki kıyaslamada ise paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli yaklaşımının paralel görev atamalı hat dengeleme modeli yaklaşımına göre hem çözüm süresi hem de çevrim süresi açısından daha başarılı çözümler ürettiği açıkça görülmektedir.

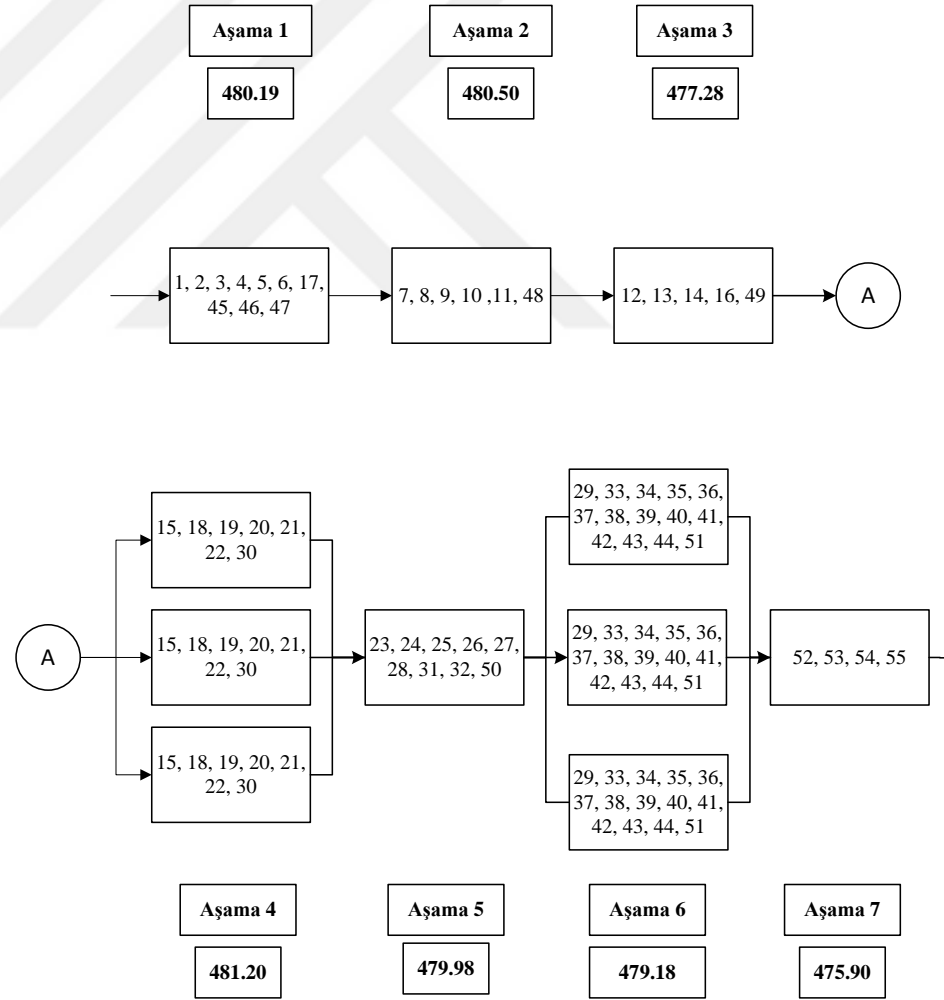
Önerilen yaklaşımlara ilişkin bir başka karşılaştırma ise uygulama zorluğu açısından yapılabilir. Önceki bölümlerde paralel görev atama yaklaşımının denetim ve kontrol açısından bazı sorunlara yol açabileceğine değinilmiştir. Paralel istasyon oluşturma yaklaşımı ise paralel görev atama yaklaşımına göre daha az risk içeren bir yaklaşımdır.

Çizelge 4.6. Çözüm yaklaşımlarının karşılaştırılması

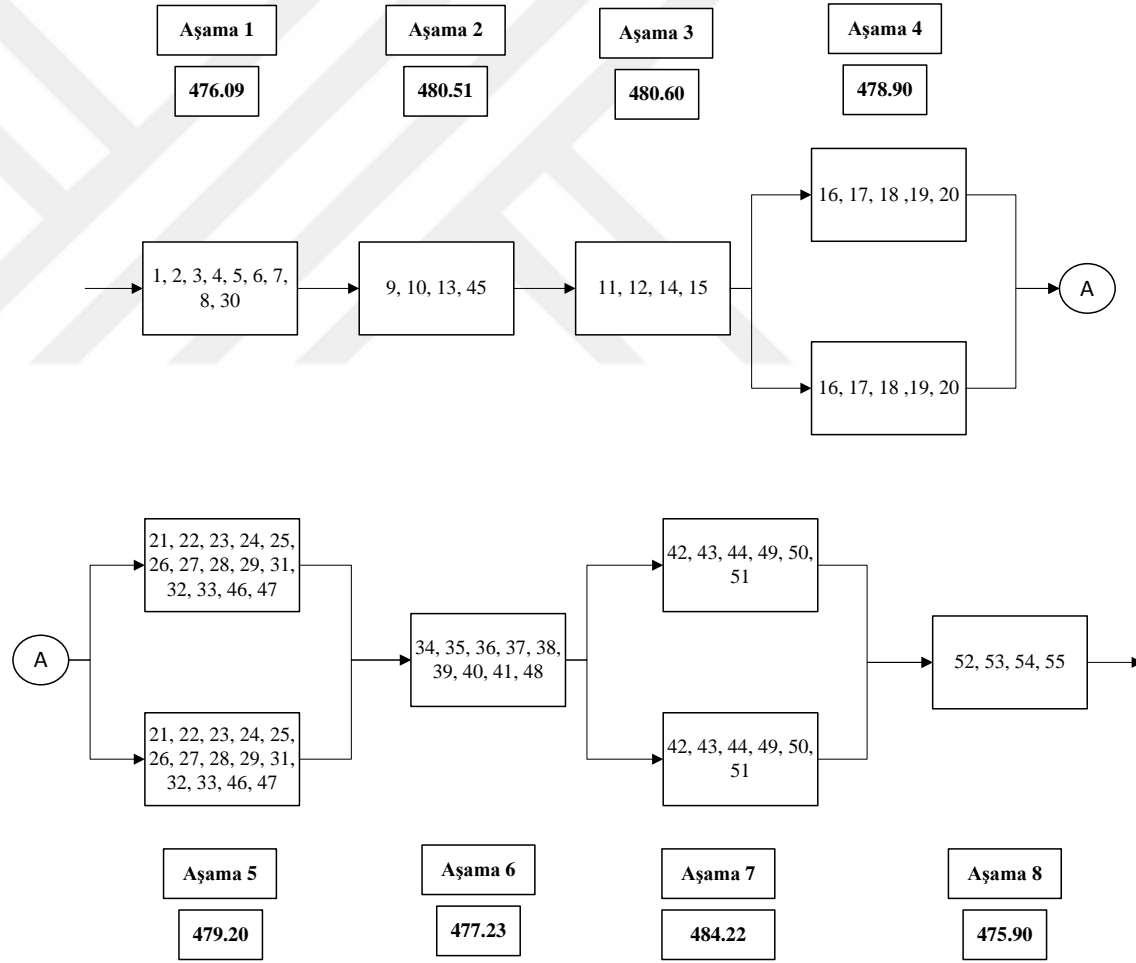
Çözüm Yaklaşımlarının Karşılaştırılması			
Performans Ölçütleri	Klasik Yaklaşım	Paralel Görev Atama Yaklaşımı	Paralel İstasyon Oluşturma Yaklaşımı
Çevrim Süresi (sn)	691.68	483.96	481.20
Atıl Süre	2 333.5	48.56	17.93
Denge Kaybı	% 33.29	% 0.91	% 0.34
Hat Etkinliği	% 66.71	% 99.09	% 99.66
Çözüm Süresi (sn)	2.39	55 900	221



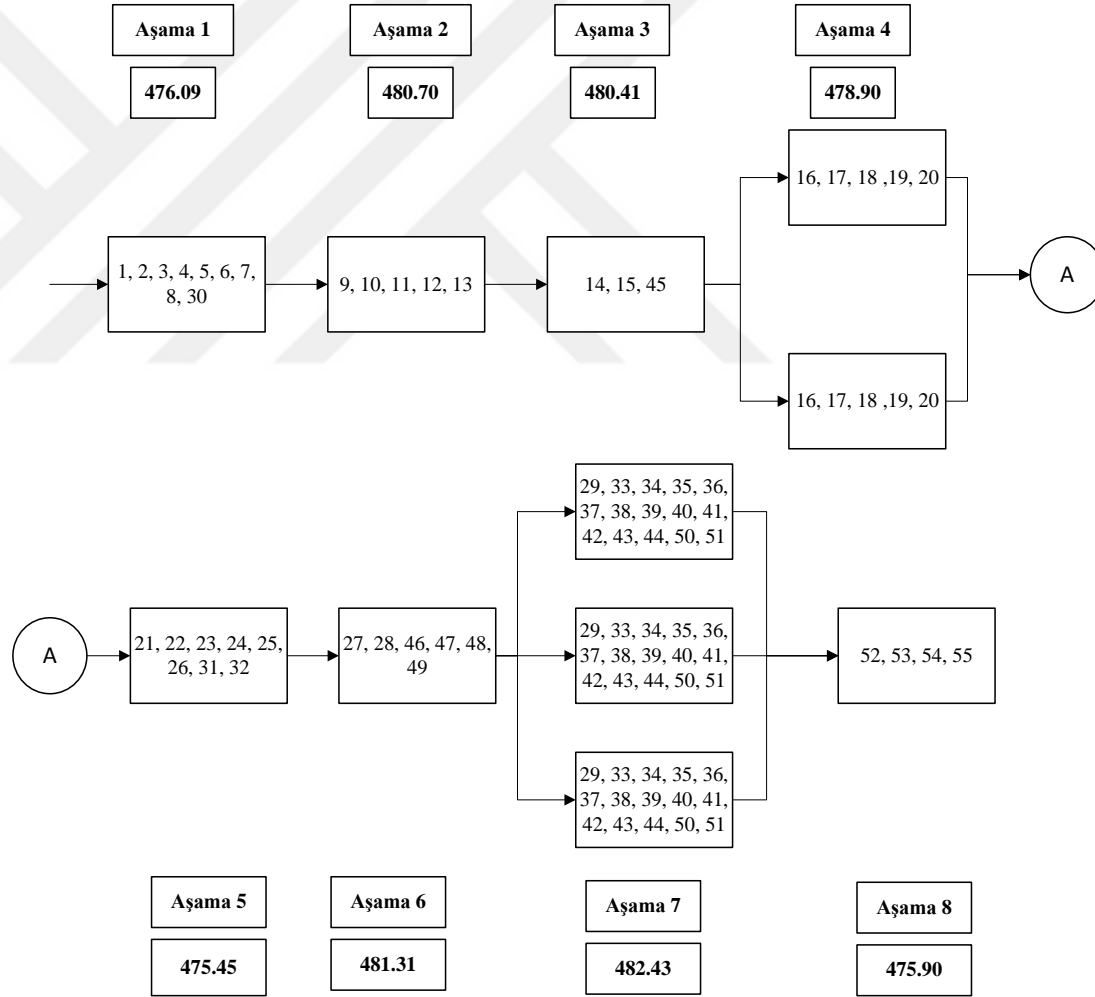
Şekil 4.9. Uygulama örneğinin sınırlandırılmış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümlü ($K=7$, $M=2$)



Şekil 4.10. Uygulama örneğinin sınırlandırılmış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümü ($K=7$, $M=3$)



Şekil 4.11. Uygulama örneğinin sınırlandırılmış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümü ($K=8$, $M=2$)

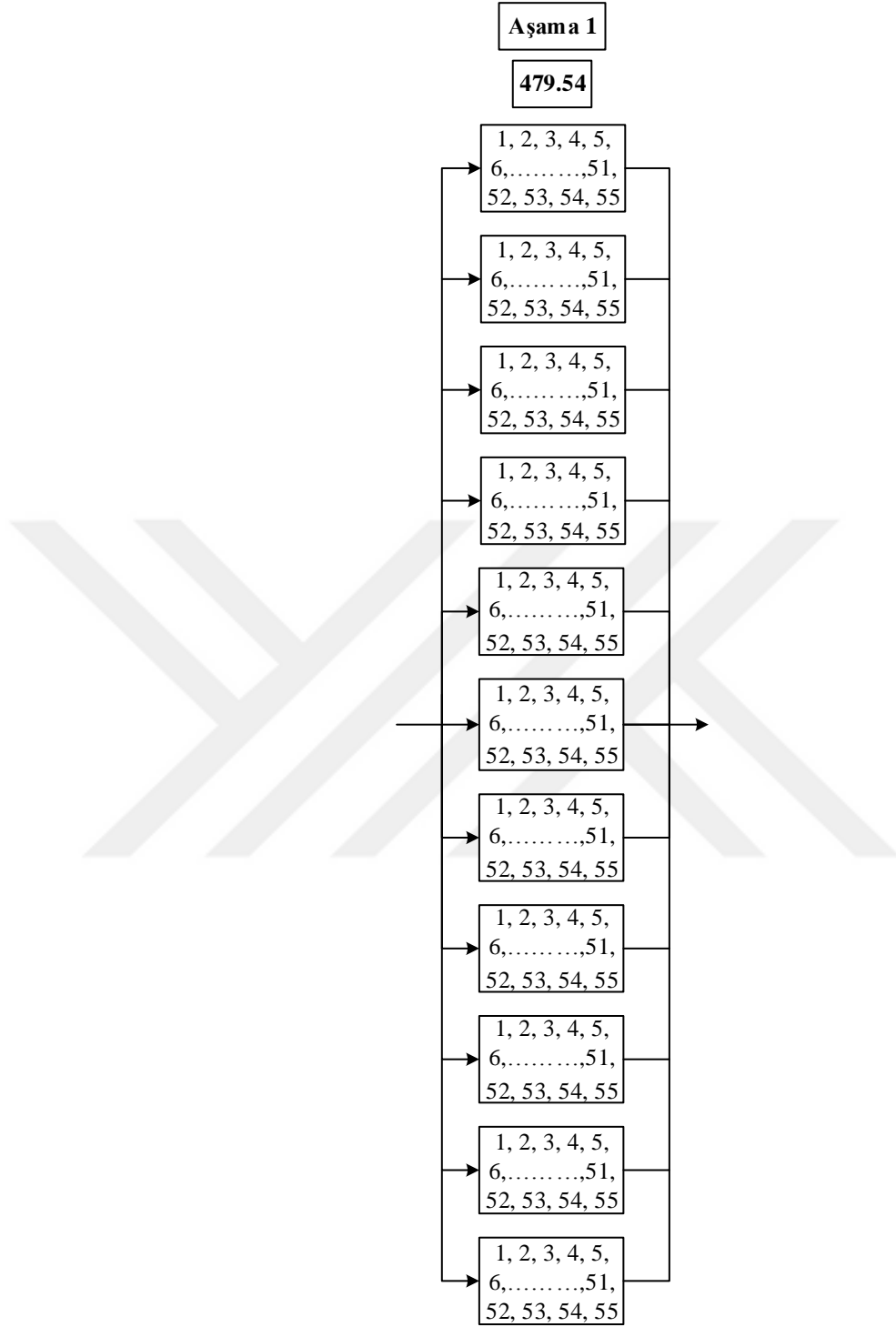


Şekil 4.12. Uygulama örneğinin sınırlandırılmış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümü ($K=8$, $M=3$)

4.3.2. Sınırlandırılmamış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümlmesi

Önceki bölümde, Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1’de ayrıntıları verilen uygulama örneğinin sınırlandırılmış hat dengeleme modeli ile çözümlüne yer verilmiştir. Parametre değerlerinin önceden belirlenerek modele eklendiği sınırlandırılmış modelde diğer çözümlerine göre daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Çizelge 4.6). Ancak paralel istasyon oluşturma yaklaşımının temel alındığı sınırlandırılmış modelde çevrim süresi belirlenirken; bir aşamada oluşturuilan paralel istasyon sayısı (M) için bir üst sınırın belirlendiği ve hattaki aşama sayısı (K)’nın ise sabit olarak tanımlandığı çeşitli senaryoların üretildiği görölmektedir. Büyük boyutlu problemlerde çok sayıda senaryo üretilerek bu senaryoların tek tek çözümlmesi ve elde edilen çözümler arasından en uygun çevrim süresinin bulunması oldukça uğraştırıcı bir süreci beraberinde getirmektedir. Bu sebeple gerçek sanayi uygulamalarındaki hat dengeleme problemlerinin çözümleri için sınırlandırılmış hat dengeleme modeli yetersiz kalmaktadır. K ve M parametrelerinin önceden belirlenerek modele eklenmesi yerine bu parametrelerin en uygun değerlerinin model tarafından otomatik olarak belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda, çevrim süresini minimize edecek şekilde hattaki aşama sayısı ve paralel istasyon sayısının model tarafından otomatik olarak belirlenmesini sağlayan sınırlandırılmamış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli geliştirilmiştir (Denklem 3.24 - Denklem 3.33). Çalışmanın bu bölümünde de sınırlandırılmamış hat dengeleme modeli kullanılarak uygulama örneğinin çözümlmesi sağlanmıştır.

55 görevden oluşan Şekil 4.1’deki uygulama örneği probleminin sınırlandırılmamış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümlmesi sonucunda Şekil 4.13’teki hat yerleşimi elde edilmiştir.



Şekil 4.13. Uygulama örneğinin sınırlanmamış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi

Sınırlanmamış hat dengeleme modelinin çözümü ile elde edilen hat yerleşimin için çevrim süresi 479.54 olarak hesaplanmıştır. Montaj hattındaki 55 görevin de tek bir

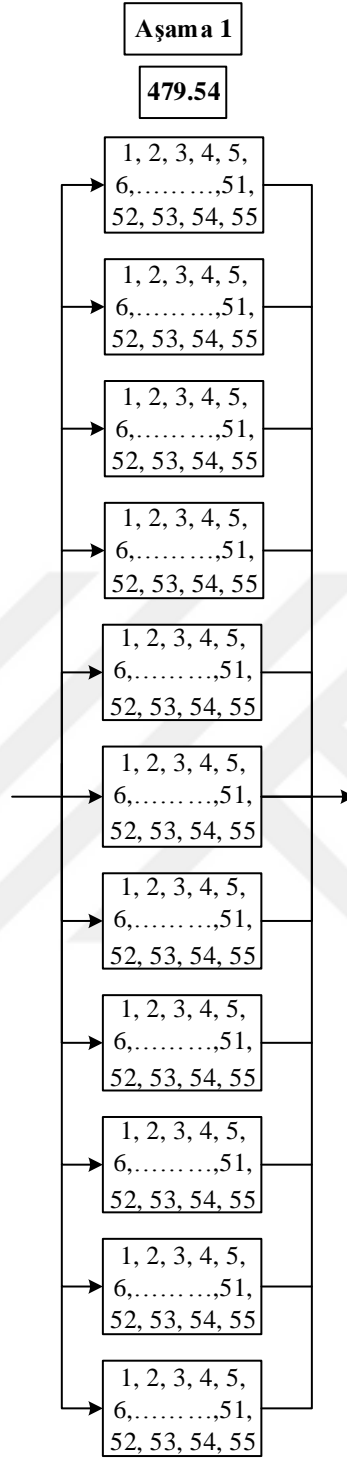
istasyona atıldığı ve tüm istasyonların birbirine paralel olarak düzenlendiği bu yerleşimde % 100 hat etkinliğine ulaşılmıştır (Şekil 4.13). Ancak daha önceki bölümlerde de ifade edildiği üzere, bütün görevlerin tek bir istasyona atanması ve bu istasyonların birbirine paralel şekilde düzenlenmesi durumu iş bölümü ve uzmanlaşma açısından montaj hattı felsefesine aykırı sonuçlar üretmektedir. Sınırlandırılmamış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modelinin bu dezavantajını ortadan kaldırmak amacıyla daha önceki bölümlerde ayrıntıları verilen iki matematiksel programlama modeli önerisi daha geliştirilmiştir. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde de Denklem 3.34 - Denklem 3.43 ve Denklem 3.44 - Denklem 3.53'te sunulan bu matematiksel modellerden yararlanılarak uygulama örneğinin çözülmesi sağlanmıştır.

- Görevler arası geçiş süresini dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli çözülmesi

Görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli, sınırlandırılmamış hat dengeleme modelinin dezavantajlarını ortadan kaldırmak üzere önerilen matematiksel modellerden bir tanesidir. Önceki bölümde de ifade edildiği üzere söz konusu bu dezavantaj, sınırlandırılmamış model sonucunda elde edilen hat yerleşiminde, bütün görevlerin bir istasyona atanması ve bu istasyonların birbirine paralel şekilde düzenlenmesi durumunun ortaya çıkmasıdır. Montaj hatlarında bir istasyona atanan görev sayısı arttıkça, çalışanlarda dikkat eksikliği ve konsantrasyon kaybı gibi birçok sorun ortaya çıkmaktadır. Bu psikolojik etkenlerin yanı sıra iş istasyonu başına düşen ortalama görev sayısının artışı; operatörlerin sürekli iş değiştirmelerinden kaynaklı olarak kayıp süreleri de ciddi boyutlara taşımaktadır. Operatörün iş değişikliği sırasında alet alıp bırakması ve bir yerden başka bir yere hareket etmesi bu kayıp sürelerden sadece bazılarıdır. Bununla birlikte, istasyonlara atanan görev sayısının artması operatörlerin çalışma alanlarını da önemli derecede daraltmaktadır. Ortaya çıkan bu dezavantajlar daha da çeşitlendirilebilir fakat görev sayısındaki artışa bağlı olarak dikkate alınması gereken en önemli sorun farklı iki görev arasında geçen hazırlık süreleridir. Bu bölümde yararlanılan görevler arası geçiş süresini dikkate alan model de hat dengeleme işlemi sırasında bu hazırlık sürelerinin işleme dâhil edilmesi amaçlanmaktadır. Hazırlık sürelerinin dikkate alınması sayesinde de bütün görevlerin bir istasyona atanması engellenerek, istasyon-görev atamalarının dengeli bir şekilde yapılması sağlanmıştır.

Çalışmanın bu bölümünde de Şekil 4.1’de ayrıntıları sunulan uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözülmesi sağlanmış ve elde edilen hat yerleşimleri irdelenmiştir. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan model ile çözülebilmesi için ise öncelikle Denklem 3.34 - Denklem 3.43’te ayrıntıları verilen modelde yer alan F_w parametresinin en uygun değerinin belirlenmesi gerekmektedir. Hazırlık sürelerinin modele yansıtılmasındaki en önemli etken olan F_w parametresinin değerinin ise probleme göre değişkenlik gösterdiğine ve iteratif şekilde bulunması gerektiğine daha önceki bölümlerde de değinilmiştir. Bu sebeple Şekil 4.1’de öncelik diyagramı verilen uygulama örneğinin çeşitli F_w değerlerine göre çözümü gerçekleştirilmiştir. Son olarak da her bir F_w değeri için elde edilen hat yerleşimi incelenerek, probleme ve incelenen montaj hattına göre en uygun hat tasarımı tercih edilebilir.

Uygulama çalışmasının bu bölümünde ilk olarak F_w parametresinin değeri 0 alınmış ve Denklem 3.34 - Denklem 3.43’te verilen görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli kullanılarak örnek problemin çözümü gerçekleştirilmiştir. F_w değerinin 0 alındığı durumda matematiksel modelin çözülmesi ile Şekil 4.14’teki hat yerleşimi elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde F_w parametresinin sıfıra eşit olduğu durumda; görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile sınırlandırılmamış paralel istasyon oluşturmaları hat dengeleme modelinin aynı sonucu verdiği görülmektedir (bkz. Şekil 4.13). Aslında F_w parametresinin sıfır alınması bir anlamda görevler arası geçiş süresi (hazırlık süresi)’nin dikkate alınmadığını ve modele de yansıtılmadığını göstermektedir. Çünkü F_w katsayısının sıfır olduğu durumda Denklem 3.37 ile belirtilen çevrim süresi kısıtı, Denklem 3.27’deki kısıt yapısına dönüşmektedir. Bunun doğal sonucu olarak da iki ayrı matematiksel modelin çözümü ile aynı hat yerleşimleri elde edilmektedir. Bu durumun tersi olduğunda; yani F_w parametresi sıfırdan farklı bir değer aldığında ise görevler arası geçiş süresi (hazırlık süresi) modele ilave edilmiş demektir.



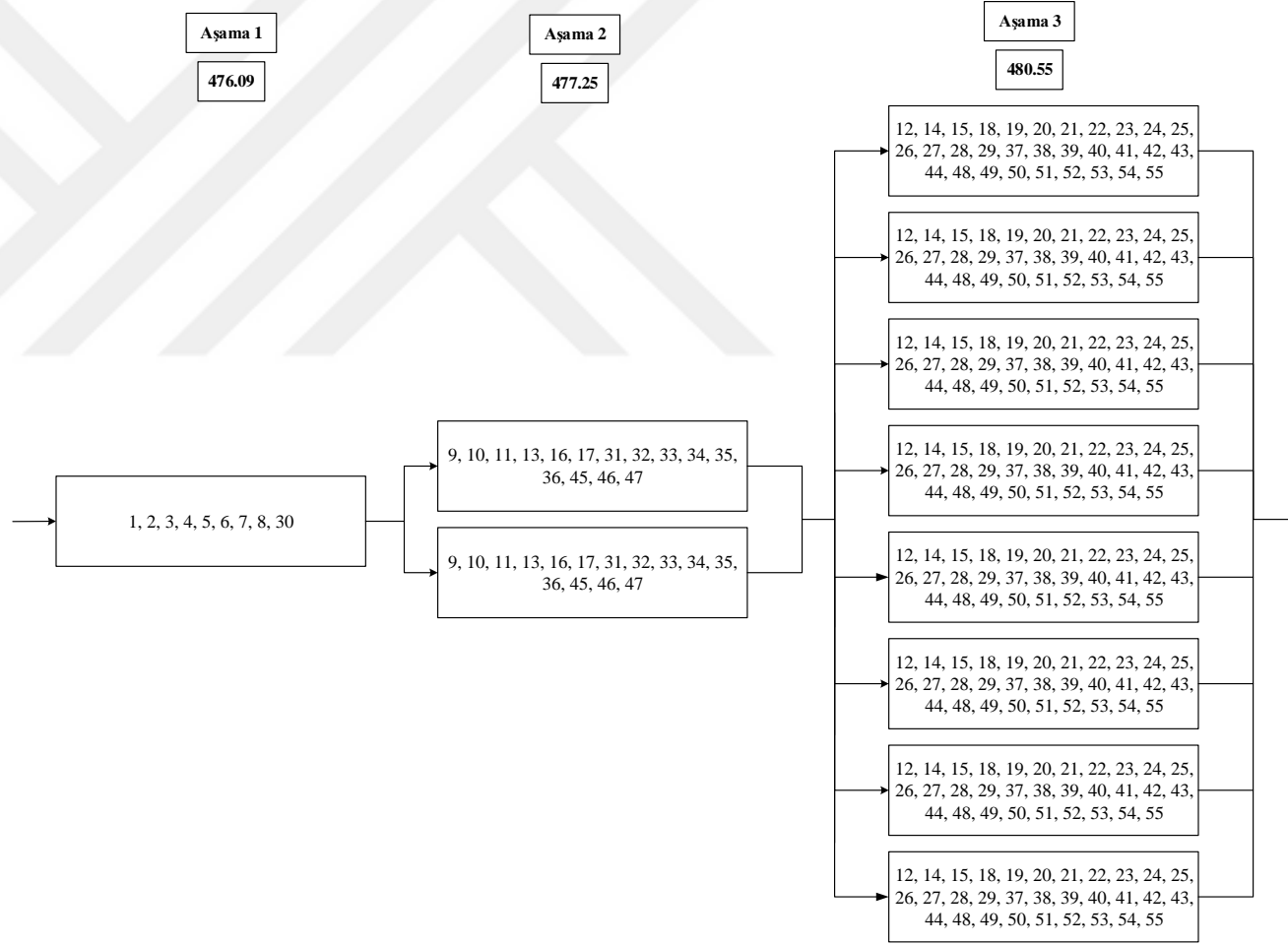
Şekil 4.14. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fw = 0$)

Fw parametresinin sıfırdan farklı bir değer aldığı tüm durumlarda ise farklı hat yerleşimlerinin elde edilmesi olasıdır. En uygun hat yerleşimini veren Fw parametresi

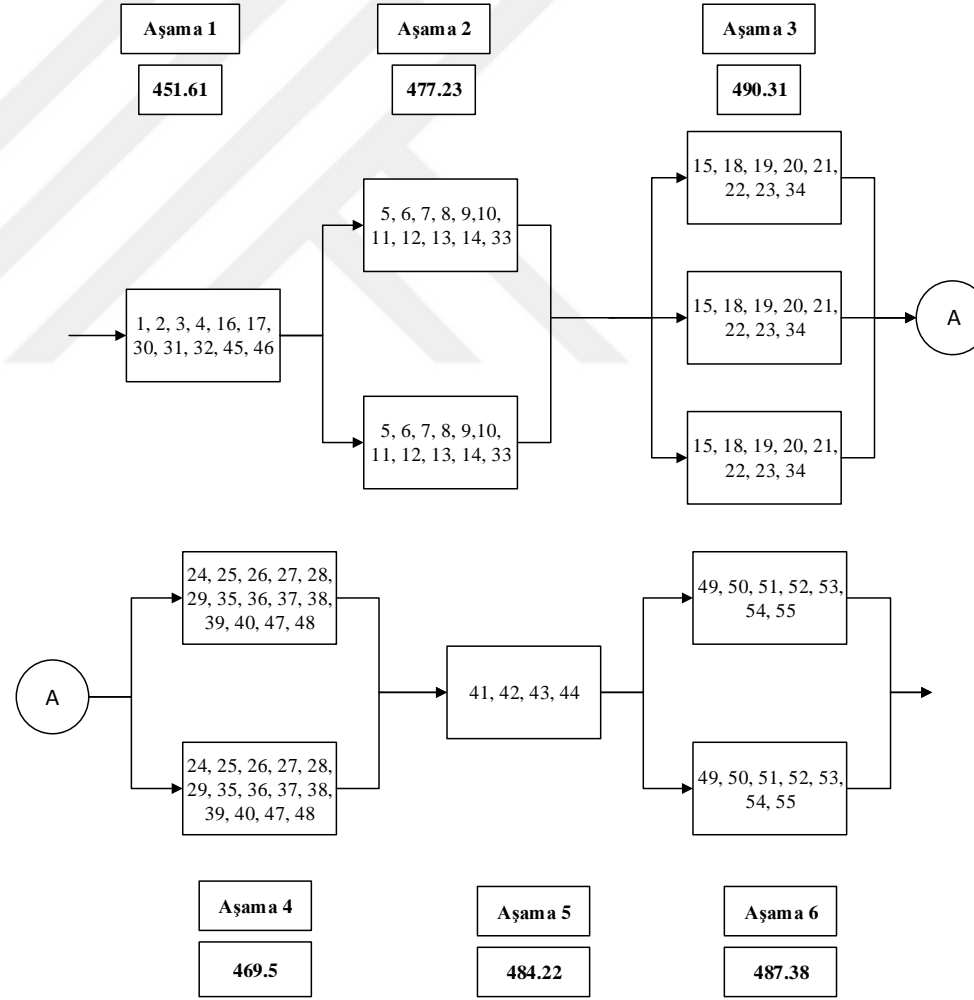
değerinin bulunması da bazı ara değerler için elde edilen sonuçlar incelenerek iteratif bir şekilde gerçekleştirilmektedir.

F_w parametresinin sıfırdan farklı bir değer aldığı tüm durumlarda ise görevler arası geçiş süresi dikkate alınmaktadır. Bu sebeple F_w parametresine bazı değerler verilerek ilgilenilen hat dengeleme problemi için en uygun ceza katsayısı değerinin belirlenmesi gerekmektedir. Görevler arası geçiş süresini matematiksel modele yansıtan F_w parametresinin değişimine göre örnek uygulama için elde edilen farklı hat yerleşimleri Şekil 4.15 - Şekil 4.31’de verildiği gibidir.

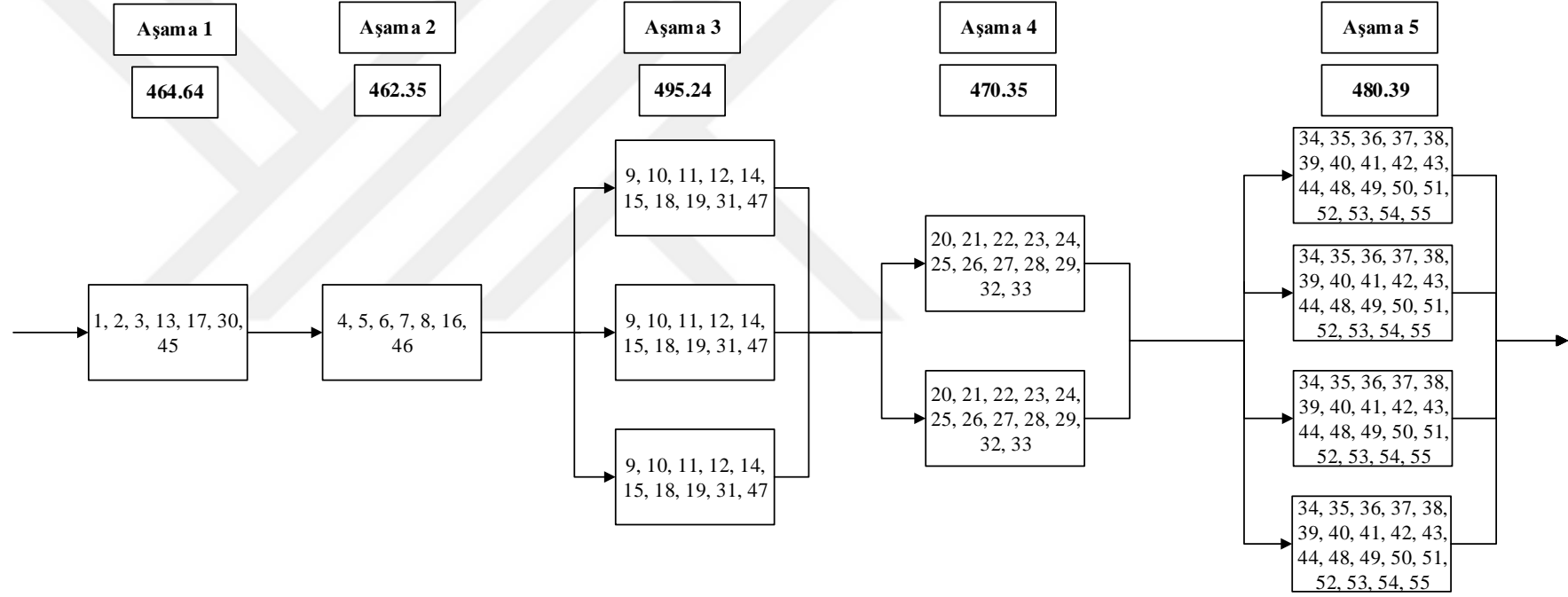




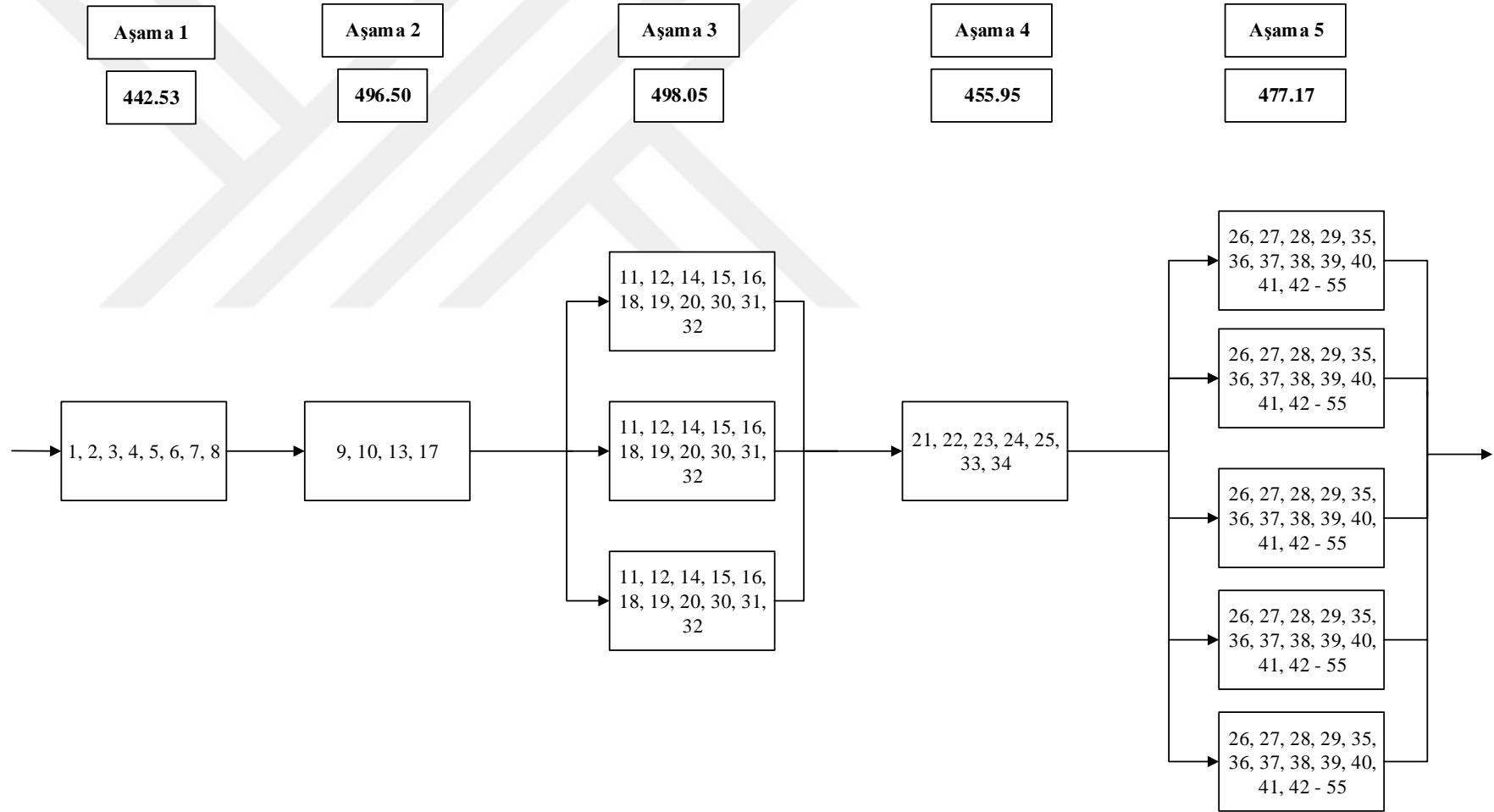
Şekil 4.15. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fw = 1$)



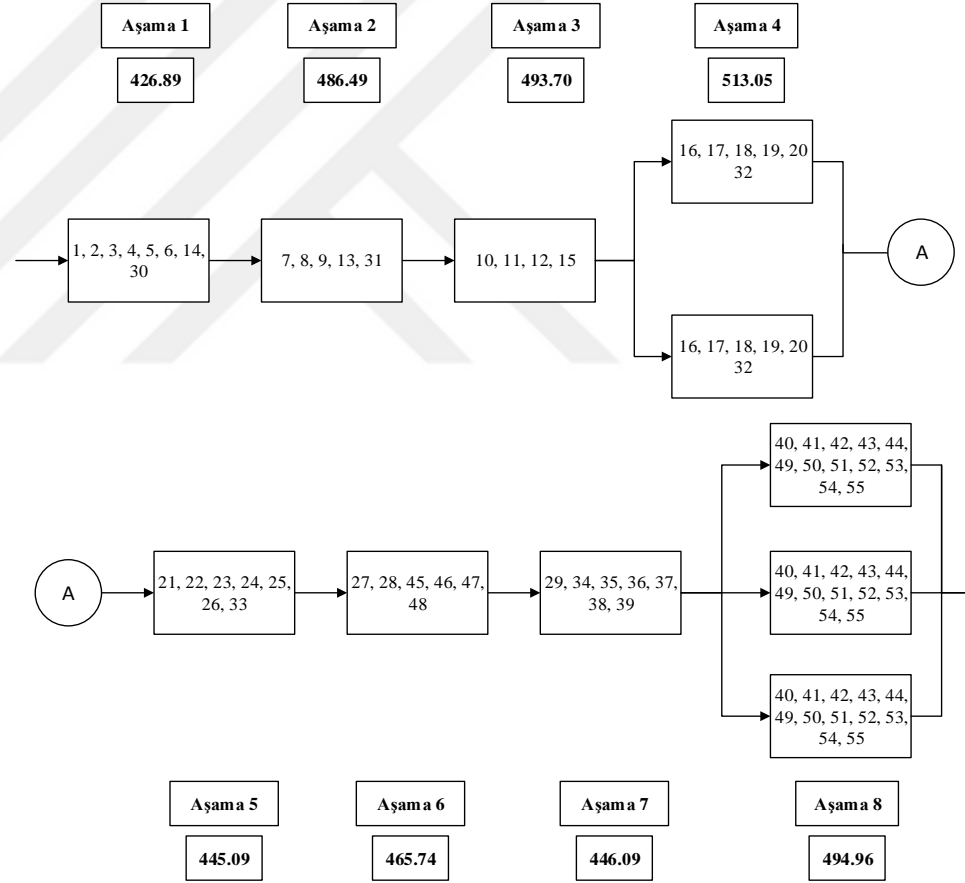
Şekil 4.16. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fw = 5$)



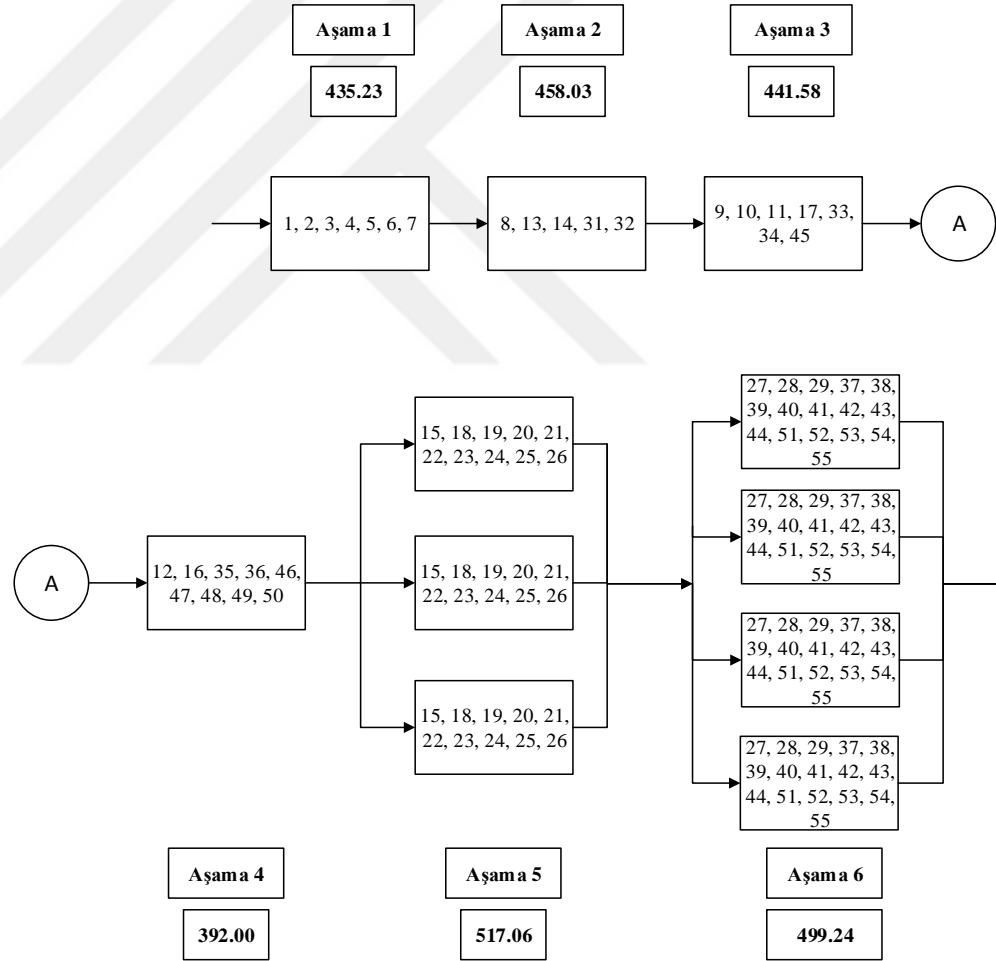
Şekil 4.17. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fw = 10$)



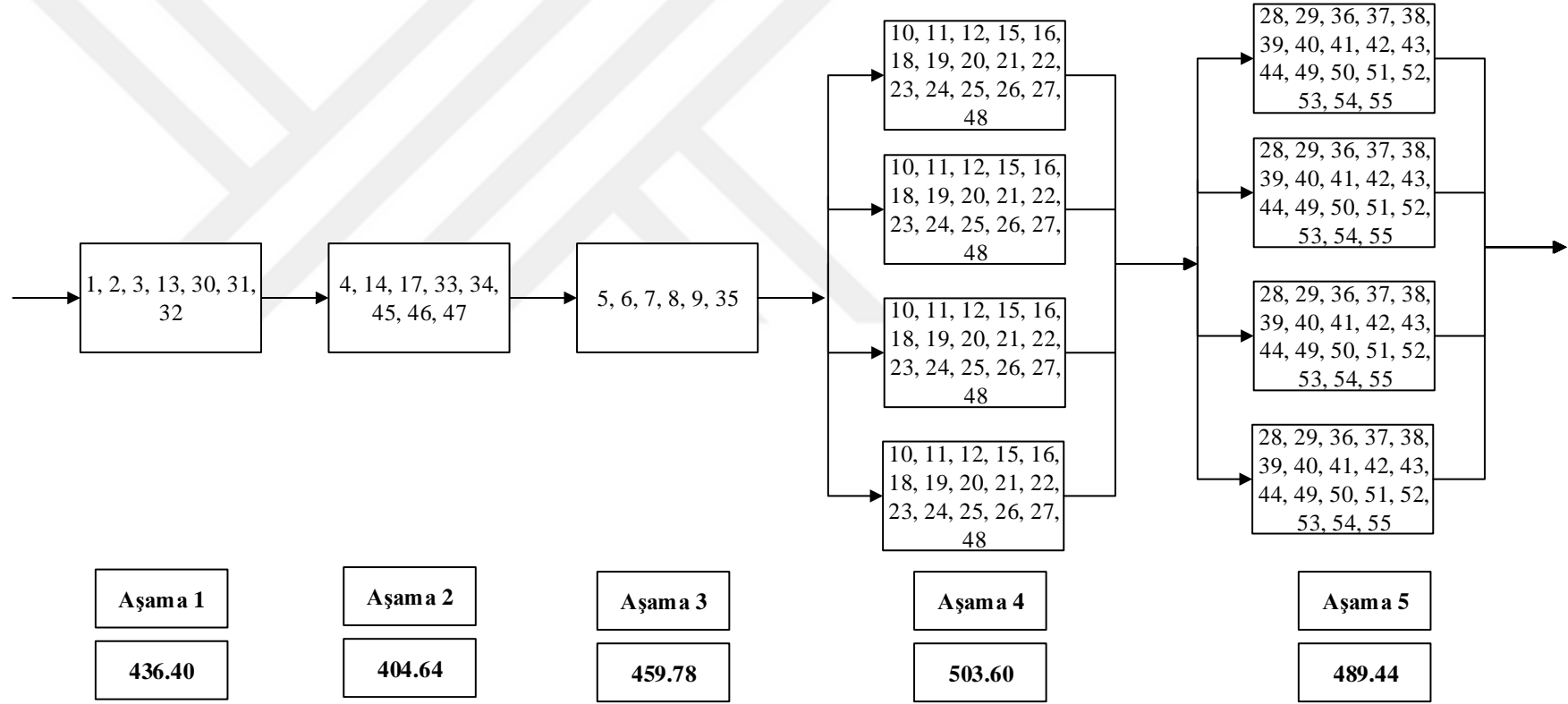
Şekil 4.18. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fw = 15$)



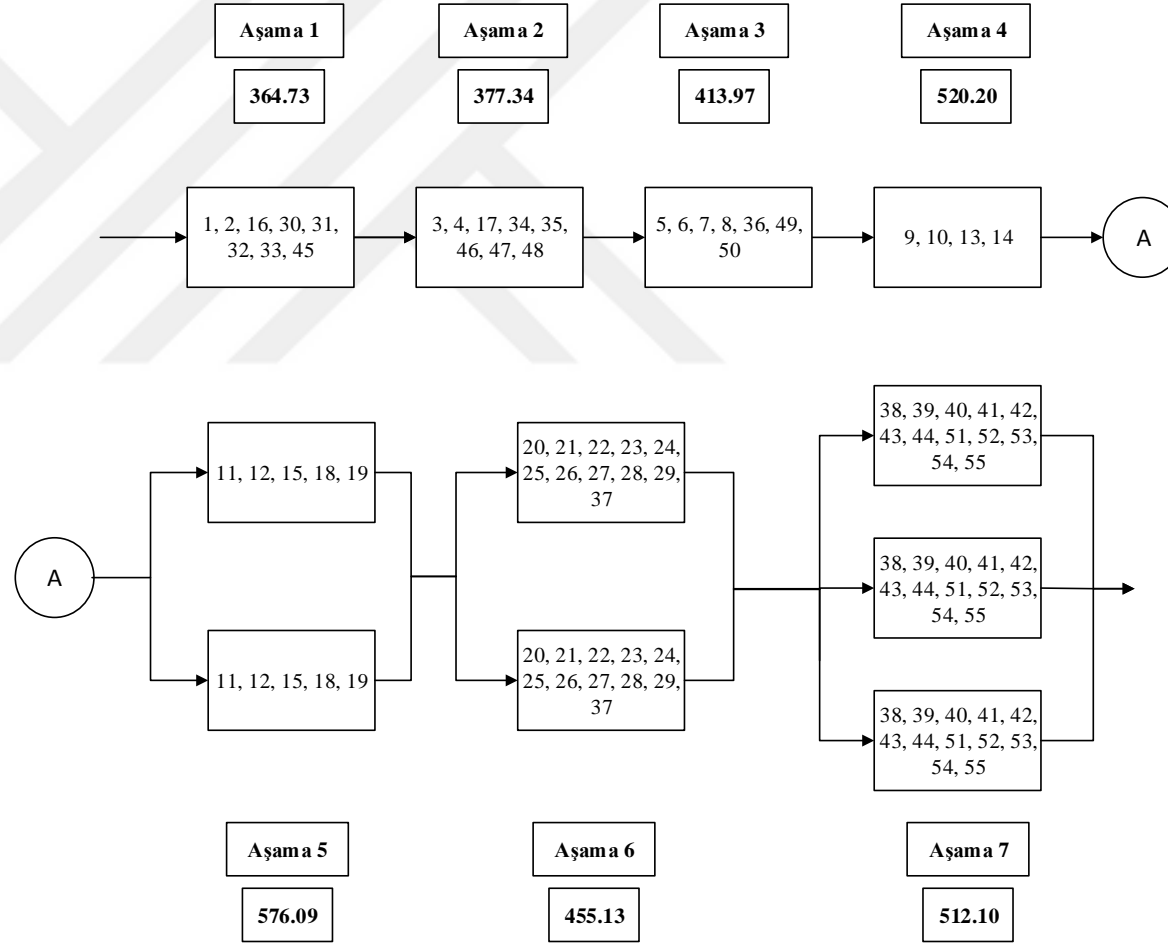
Şekil 4.19. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fw = 20$)



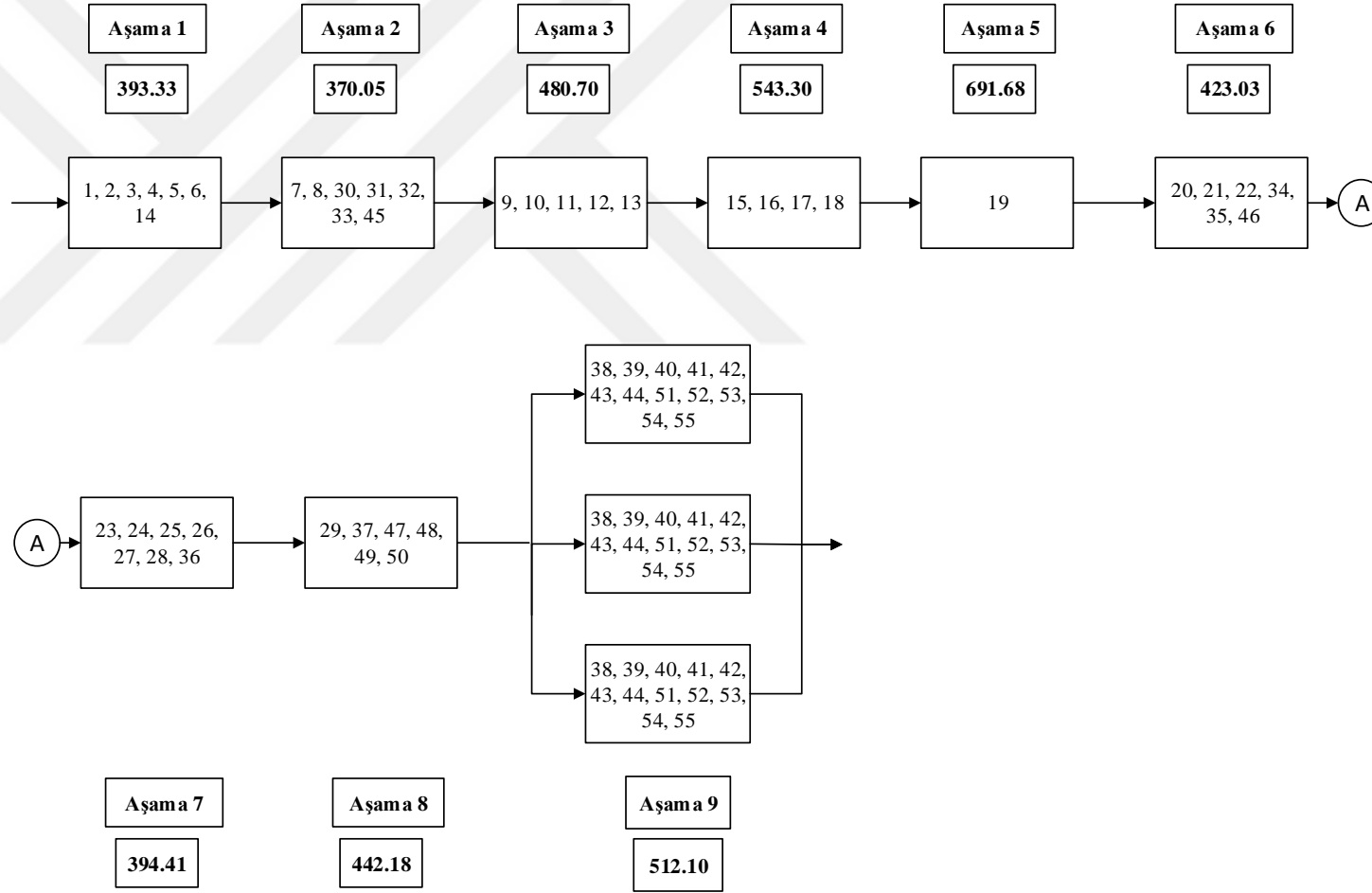
Şekil 4.20. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fw = 25$)



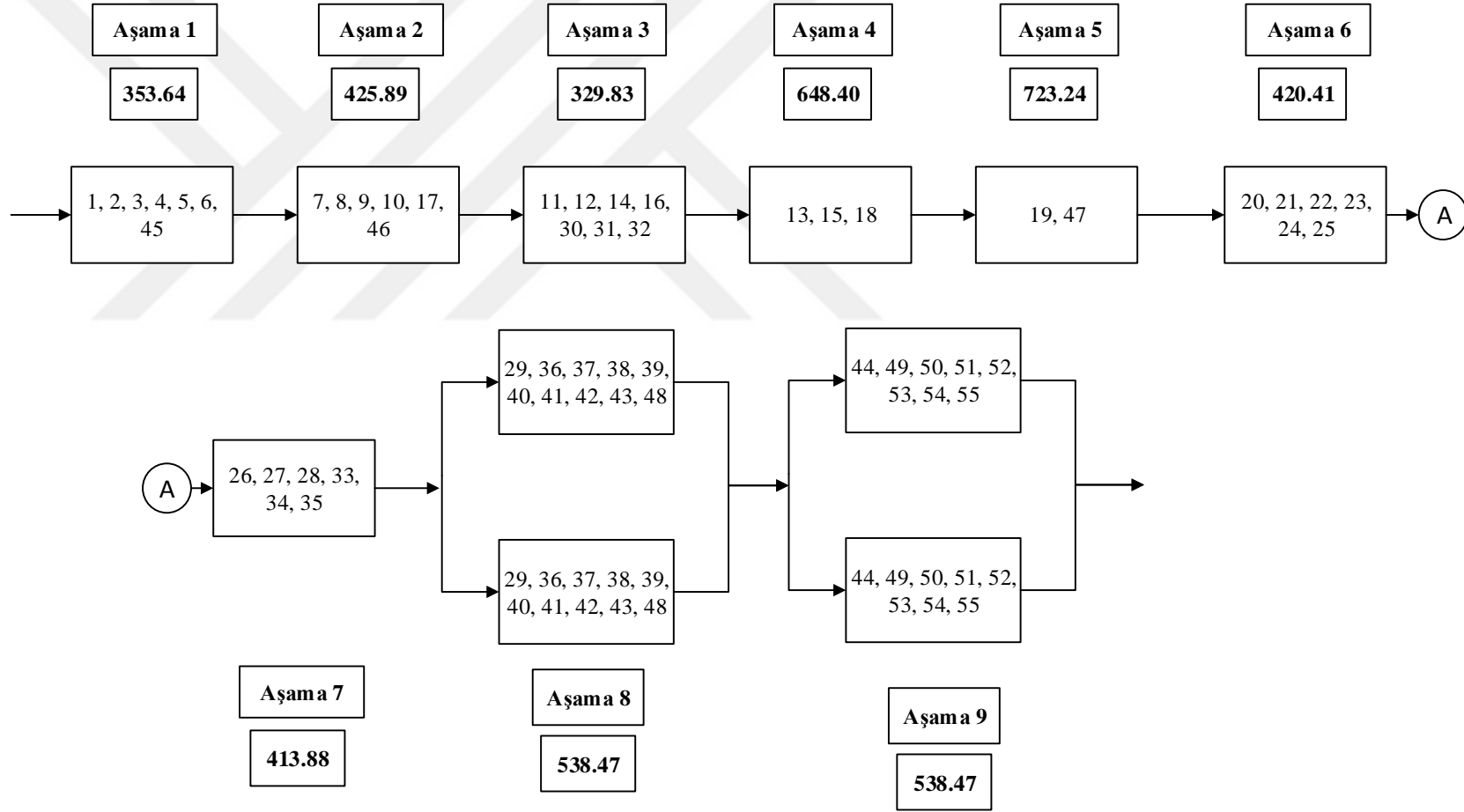
Şekil 4.21. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fw = 30$)



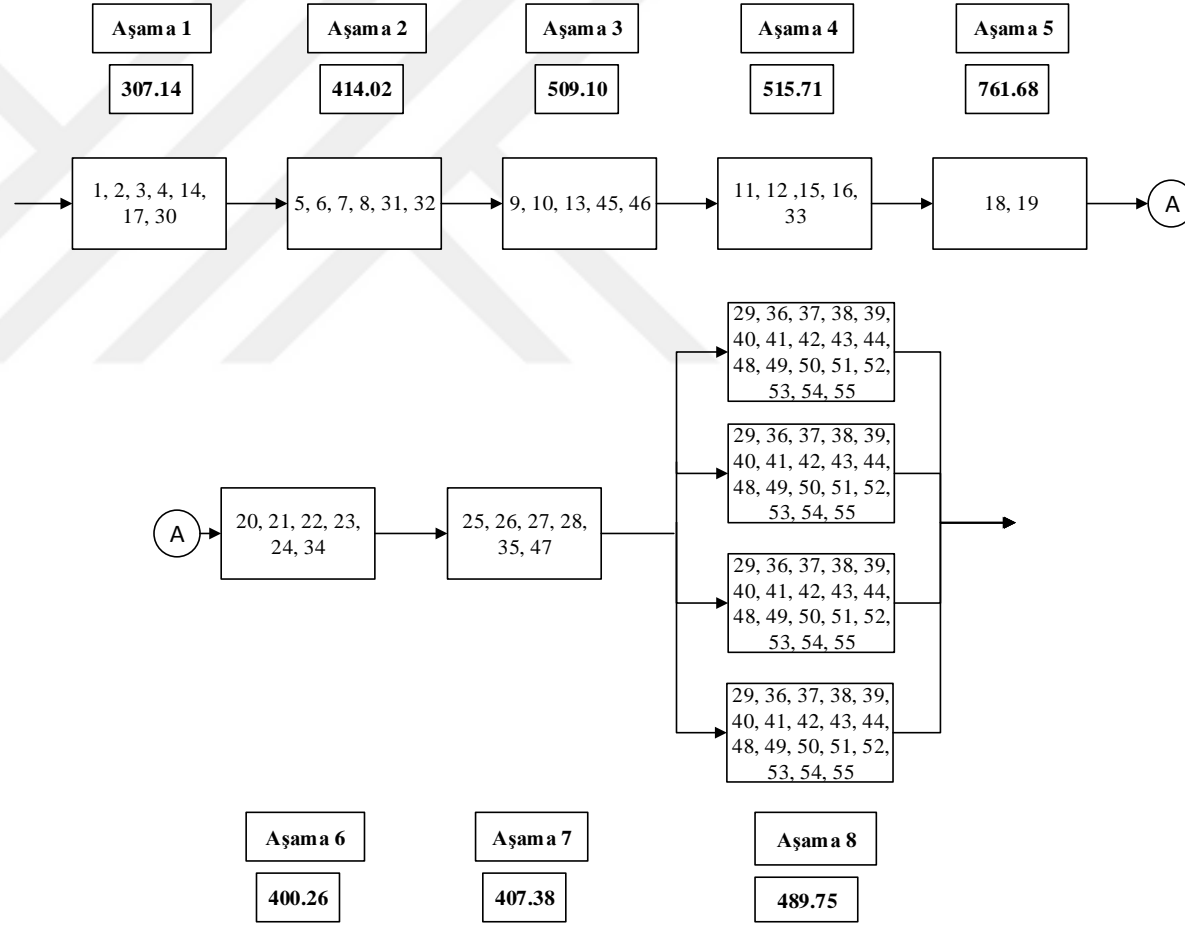
Şekil 4.22. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 40$)



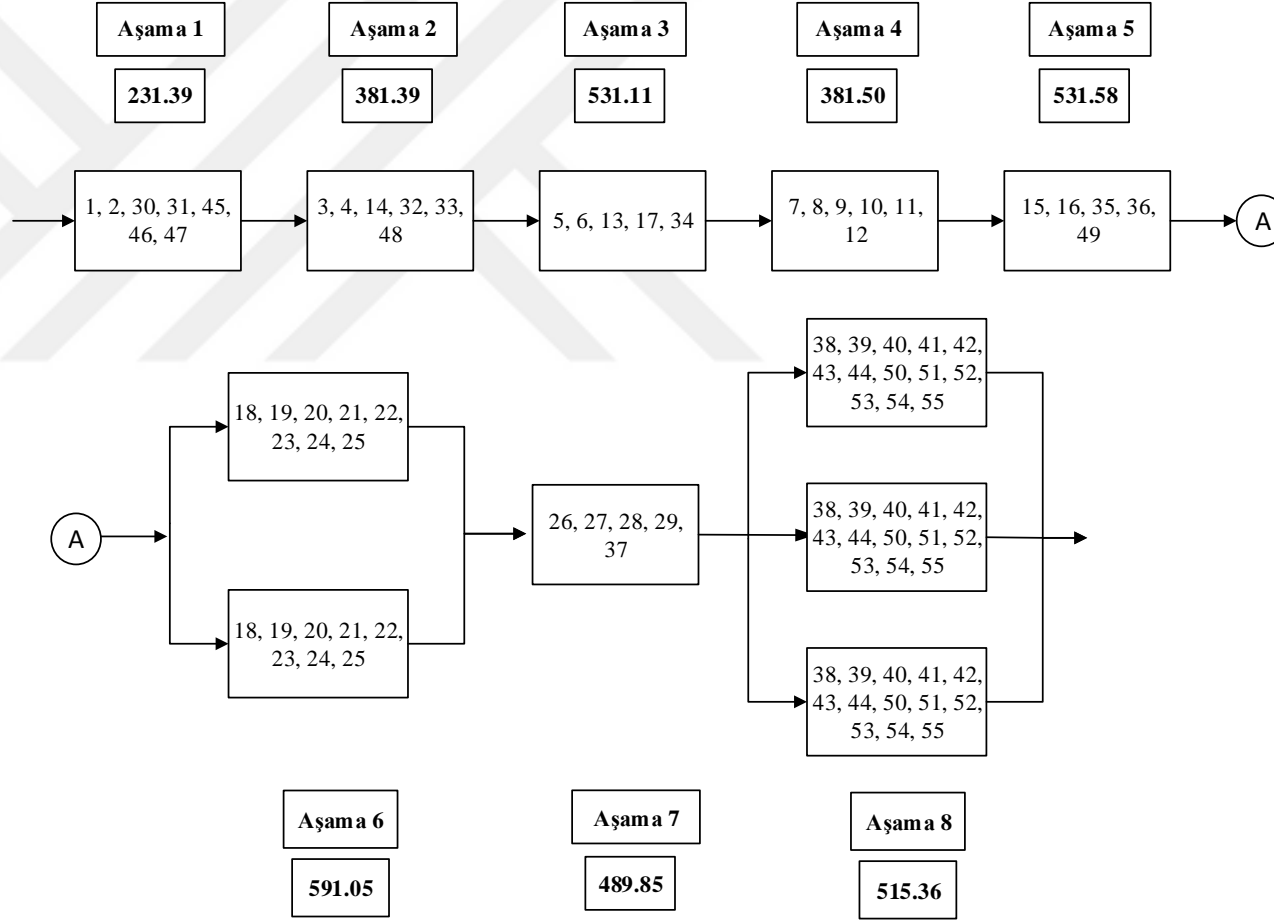
Şekil 4.23. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fw = 50$)



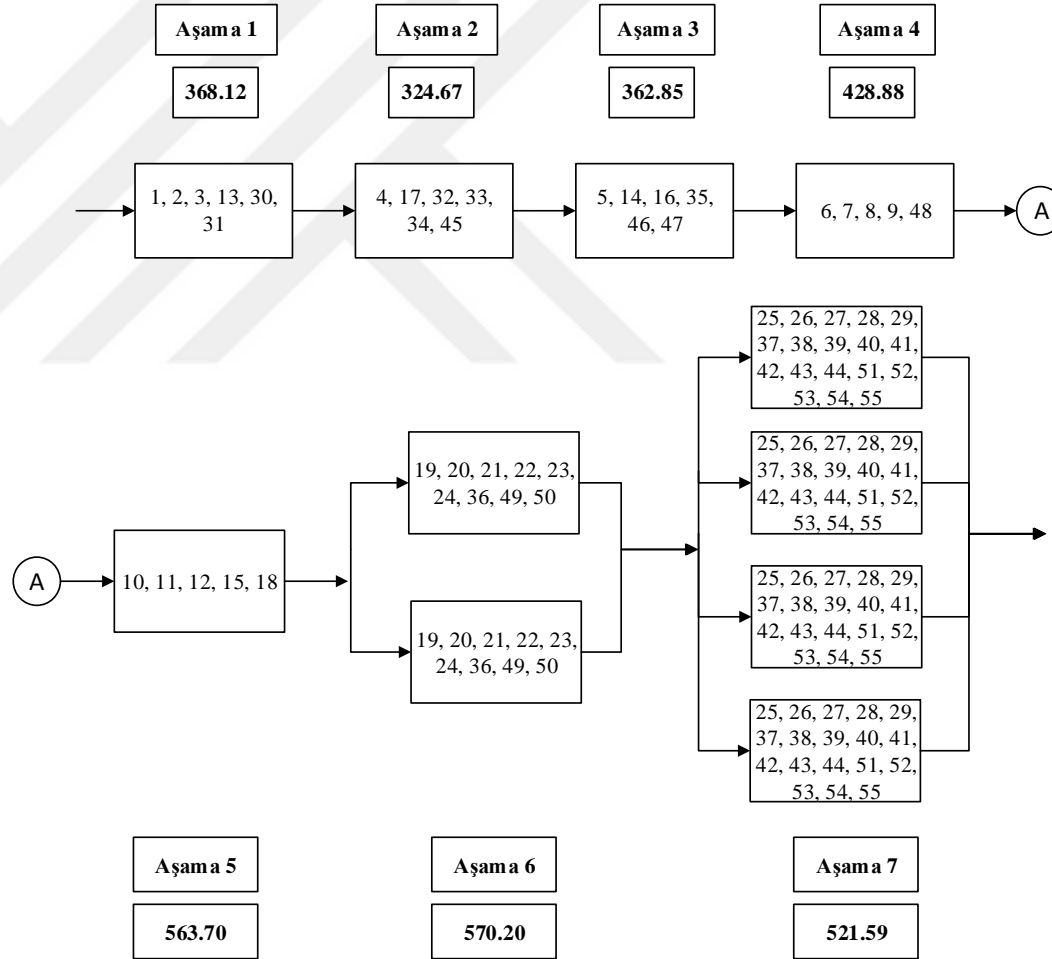
Şekil 4.24. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fw = 75$)



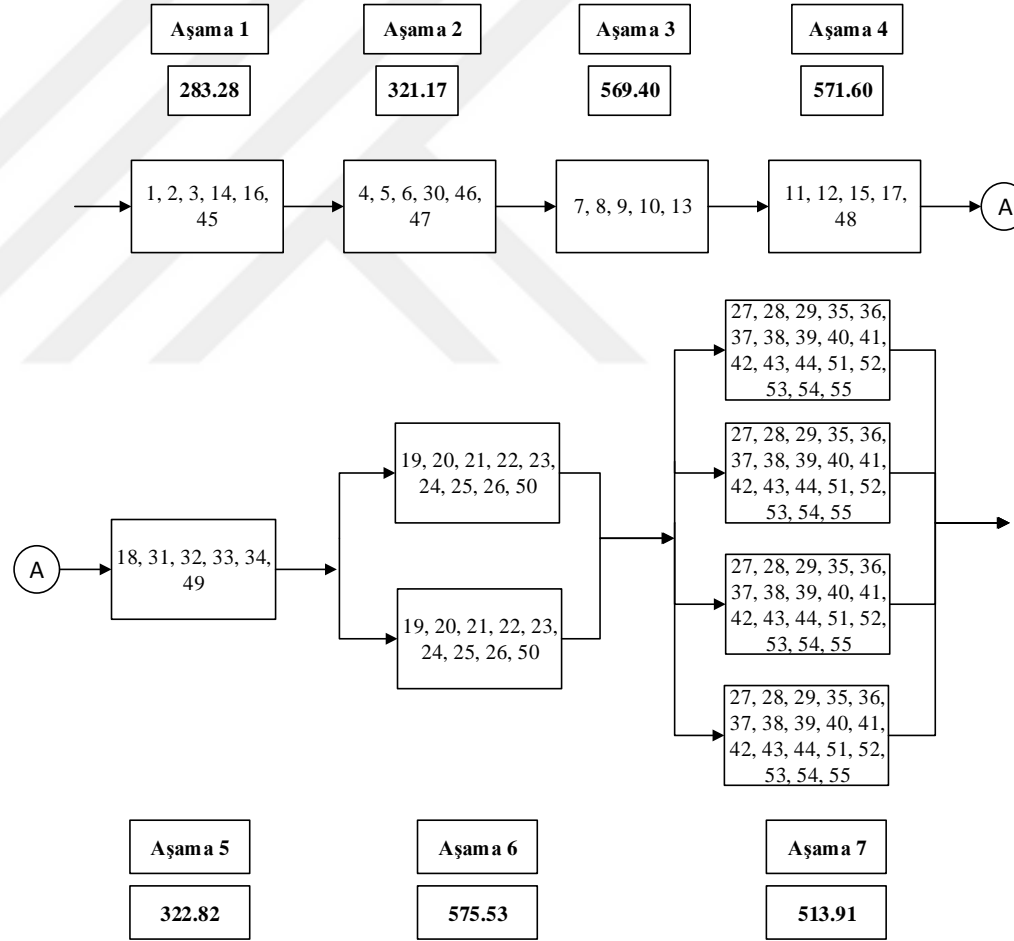
Şekil 4.25. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 100$)



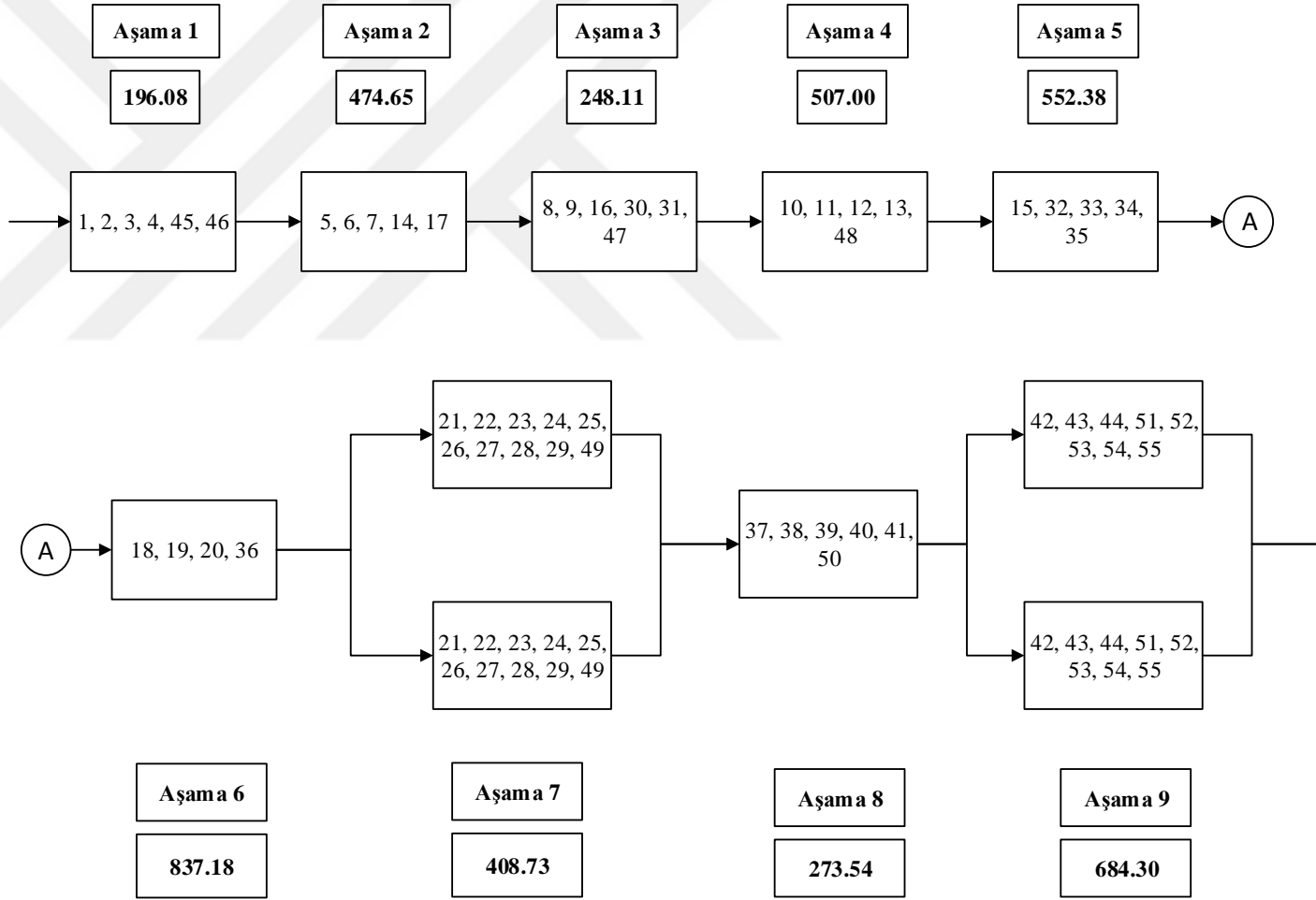
Şekil 4.26. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 150$)



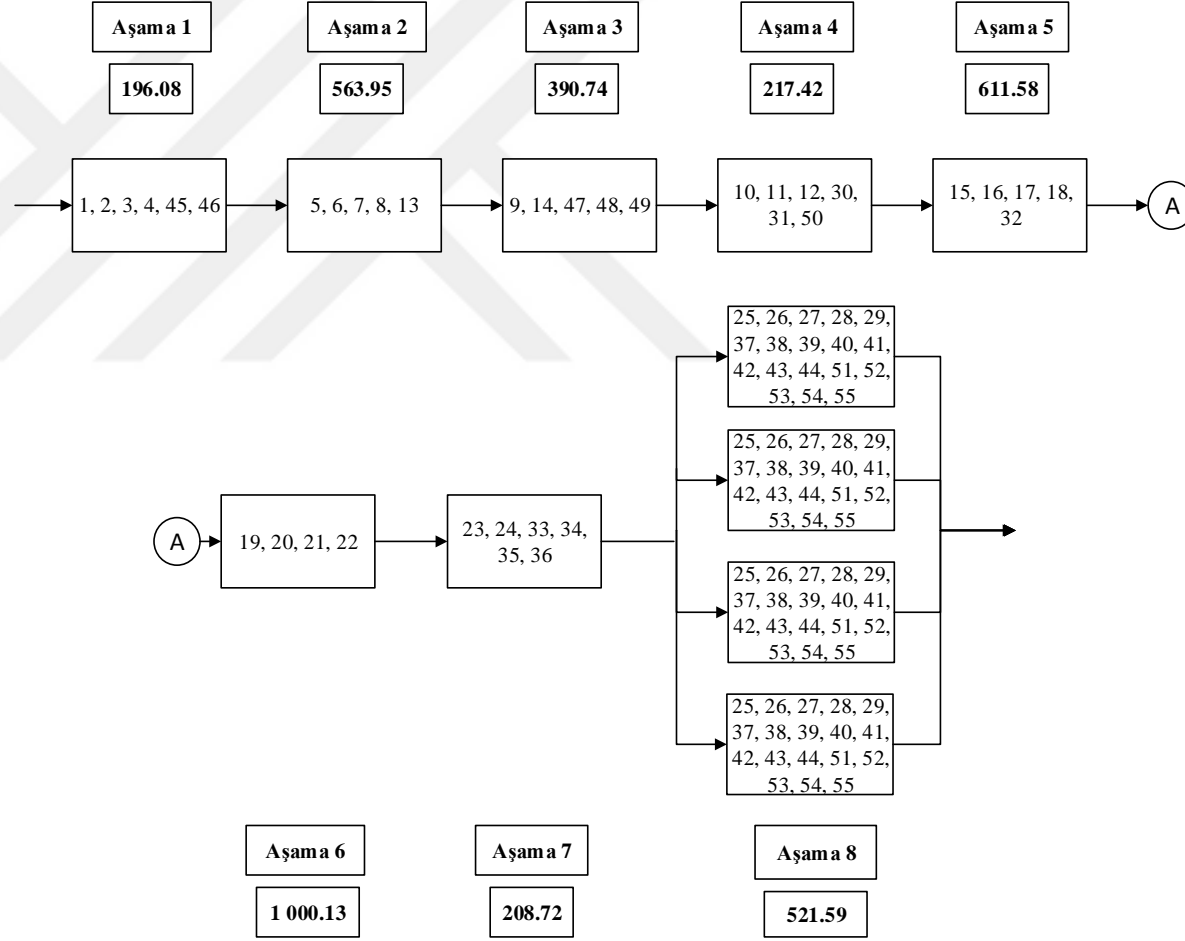
Şekil 4.27. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fw = 200$)



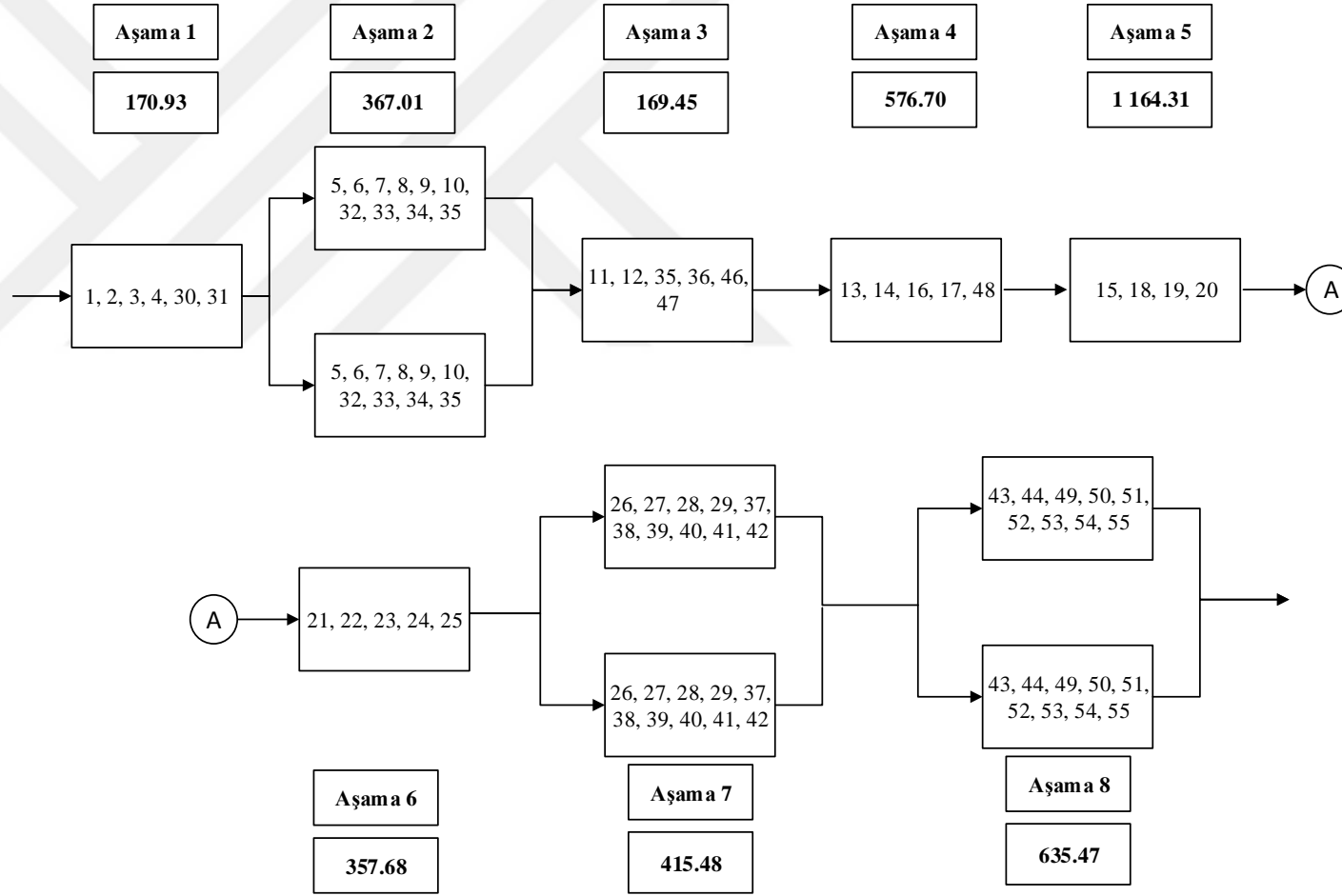
Şekil 4.28. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($Fw = 250$)



Şekil 4.29. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 300$)

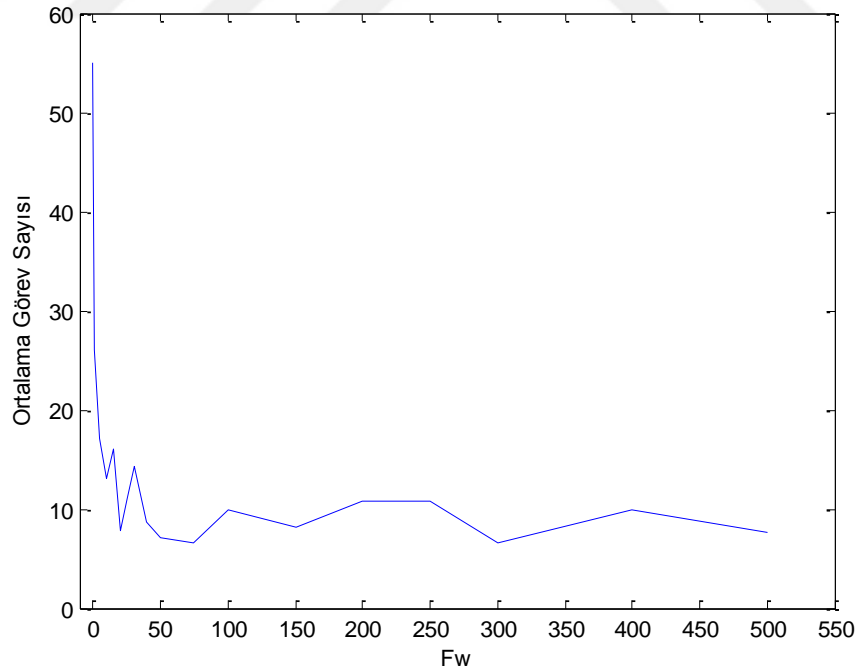


Şekil 4.30. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 400$)



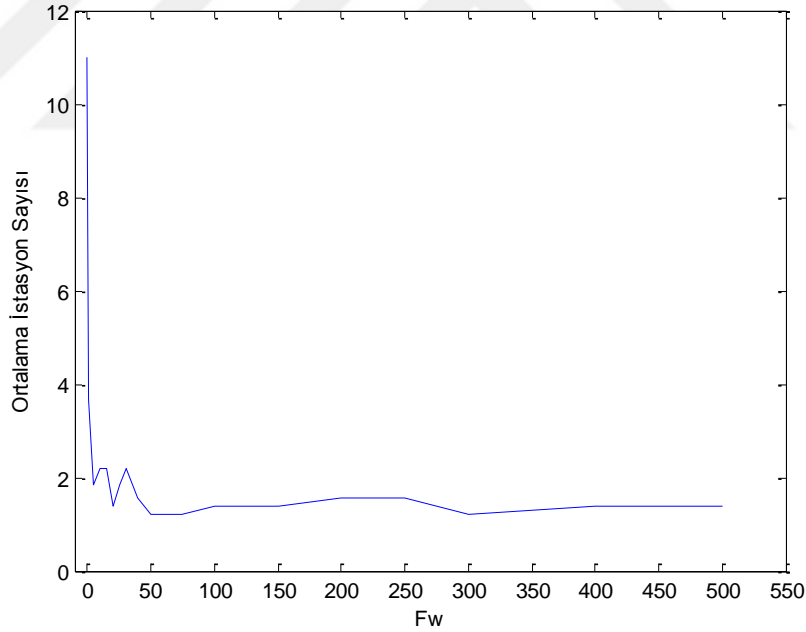
Şekil 4.31. Uygulama örneğinin görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_w = 500$)

Denklem 3.34 – Denklem 3.43’te ayrıntıları verilen görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modelindeki F_w parametresinin farklı değerleri ile uygulama örneğinin çözümüne ilişkin elde edilen hat yerleşimleri incelendiğinde; çevrim süresinin en iyi değerine F_w ’nin 0 değerini aldığı durumda ulaşıldığı görülmektedir. Ancak hat yerleşimleri değerlendirilirken çevrim süresinin en iyi değerinin yanı sıra bir başka ölçüt olan iş istasyonu başına düşen ortalama görev sayısının da dikkate alınması gerekmektedir. En iyi çevrim süresinin elde edildiği F_w ’nin 0 değerini aldığı durumda iş istasyonu başına düşen ortalama görev sayısı değerinin 55 ile en yüksek seviyeye ulaştığı görülmektedir. F_w parametresinin sıfırdan farklı bir değer alması durumunda ise istasyonlara atanan görev sayısının ortalama değerinin ciddi miktarlarda azaldığı görülmektedir. Örneğin; F_w parametresinin 1 olduğu durumda ortalama görev sayısı nerdeyse yarıya düşerek 26.09 değerini almaktadır (Şekil 4.15). F_w değerinin artışına göre ortalama görev sayısındaki bu azalış süreklilik arz etmese de, F_w değeri arttıkça iş istasyonu başına düşen ortalama görev sayısının 6 ile 10 arasında dengelendiği görülmektedir (Şekil 4.32).



Şekil 4.32. İş istasyonu başına düşen ortalama görev sayısının F_w parametresine göre değişimi

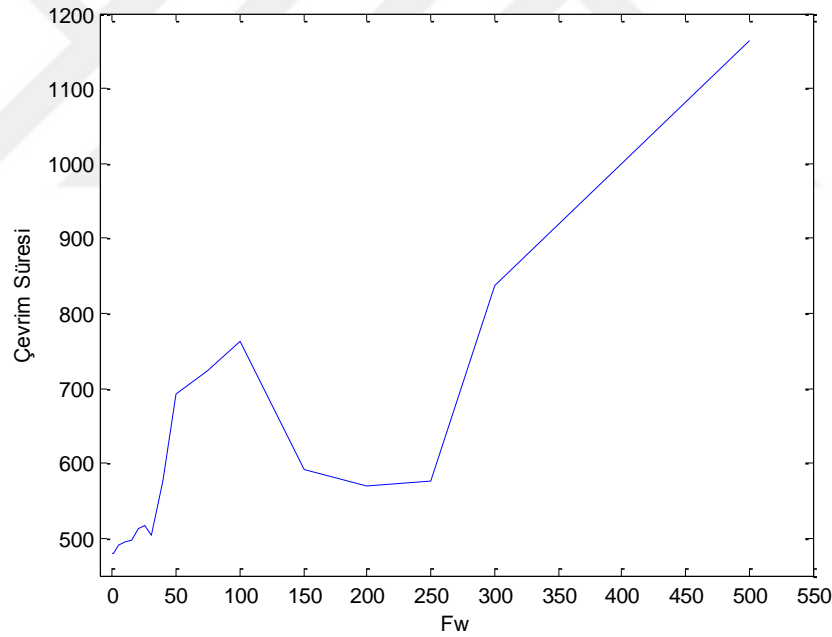
Görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modelinde F_w parametresinin kullanılmasının amacı bir istasyona atanan görev sayısının makul seviyelere çekilmesini sağlamaktır (Denklem 3.37). Uygulama örneğinin çözümü ile elde edilen sonuçlar da Denklem 3.37’de kullanılan kısıt yapısının bu amacı sağladığını doğrular niteliktedir. Çünkü sınırlandırılmamış hat dengeleme modelinde parametrelerin serbest bırakılması ile bütün görevler bir istasyona atanarak montaj hattı felsefesine uygun olmayan bir sonuç elde edilmesine rağmen, modele eklenen F_w parametresi sayesinde istasyonlara atanan ortalama görev sayılarının giderek düştüğü görülmektedir. Şekil 4.33’te de bir aşamadaki ortalama istasyon sayısının F_w parametresine göre değişimine yer verilmiştir. Sınırlandırılmamış modelde bütün istasyonların birbirine paralel şekilde düzenlendiği ve bir aşamadaki ortalama istasyon sayısı değerinin en yüksek değere ulaştığı görülmektedir. Ancak yine F_w parametresinin etkisi sayesinde bir aşamadaki ortalama istasyon sayısının 1 ve 2 değerleri arasında dengelenmesi sağlanmıştır (Şekil 4.33).



Şekil 4.33. Bir aşamadaki ortalama istasyon sayısının F_w parametresine göre değişimi

Şekil 4.34’te de çevrim süresinin F_w parametresine göre değişimine ilişkin bir görsele yer verilmiştir. F_w parametresinin 0 olduğu durumda çevrim süresi en düşük değerine ulaşmıştır. F_w parametresinin arttığı 0-100 bölümünde çevrim süresinin de F_w

parametresindeki bu artışa bağlı olarak arttığı görülmektedir. F_w parametresinin 100 ile 250 değerlerini aldığı bölümde ise çevrim süresinin azalan yönde değiştiği, 250'den sonra ise sürekli bir artışın olduğu göze çarpmaktadır. Ancak bu analizdeki en önemli noktalardan birisi, özellikle F_w parametresinin çok yüksek değerler aldığı durumlarda çevrim süresinin minimizasyonunu hedefleyen hat dengeleme modelinin amacından sapmasıdır. Örneğin uygulama probleminin çözümünde, F_w parametresinin 300'den büyük değerleri için elde edilen çevrim süresi sonuçlarının geleneksel yaklaşım ile elde edilen sonuçlardan daha kötü olduğu görülmektedir (Şekil 4.34). Bu tez çalışmasında önerilen matematiksel programlama modellerinin asıl amacının ise geleneksel yaklaşımla elde edilen çevrim süresi değerlerinin iyileştirilmesi olduğu unutulmamalıdır. Bu sebeple, görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modeli için F_w parametresinin değer aralığı belirlenirken bu duruma dikkat edilmesi gerekmektedir.



Şekil 4.34. Çevrim süresinin F_w parametresine göre değişimi

- Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli çözülmesi

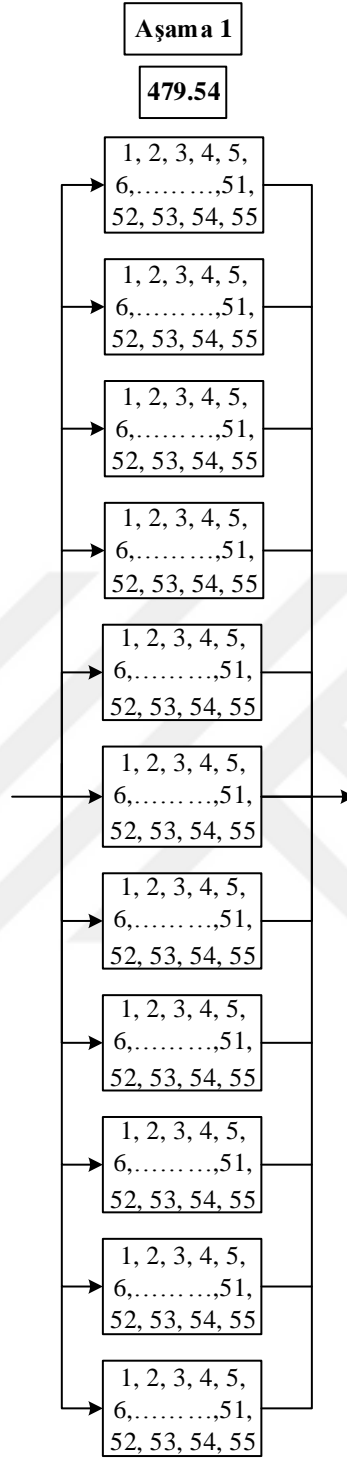
Sınırlandırılmamış hat dengeleme modelinin dezavantajlarını ortadan kaldırmak üzere geliştirilen matematiksel modellerden bir diğeri de paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modelidir (Denklem 3.44 - Denklem 3.53). Tez çalışmasının bu bölümünde de paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modelinden faydalanılarak uygulama örneğinin çözümü gerçekleştirilmiştir.

Önceki bölümde de olduğu gibi, bir hat dengeleme probleminin önerilen paralel istasyon açma cezasını dikkate alan model ile çözülmesindeki en önemli basamak bir aşamada açılan her bir paralel istasyon için dikkate alınan ceza katsayısını ifade eden F_s 'nin değerinin belirlenmesidir. F_s de görevler arası geçiş süresini yansıtan F_w parametresi gibi probleme göre değişkenlik gösterebilen ve değerinin iteratif olarak bulunması gereken bir parametredir. Bu sebeple Şekil 4.1'de ayrıntıları sunulan uygulama örneğinin, paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modelinde yer alan çeşitli F_s değerlerine göre çözülerek bu parametrenin değerinin iteratif bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bu bölümde de Şekil 4.1'de öncelik diyagramı verilen uygulama örneği yardımıyla çeşitli F_s değerlerine karşın elde edilen hat yerleşimleri ve elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir.

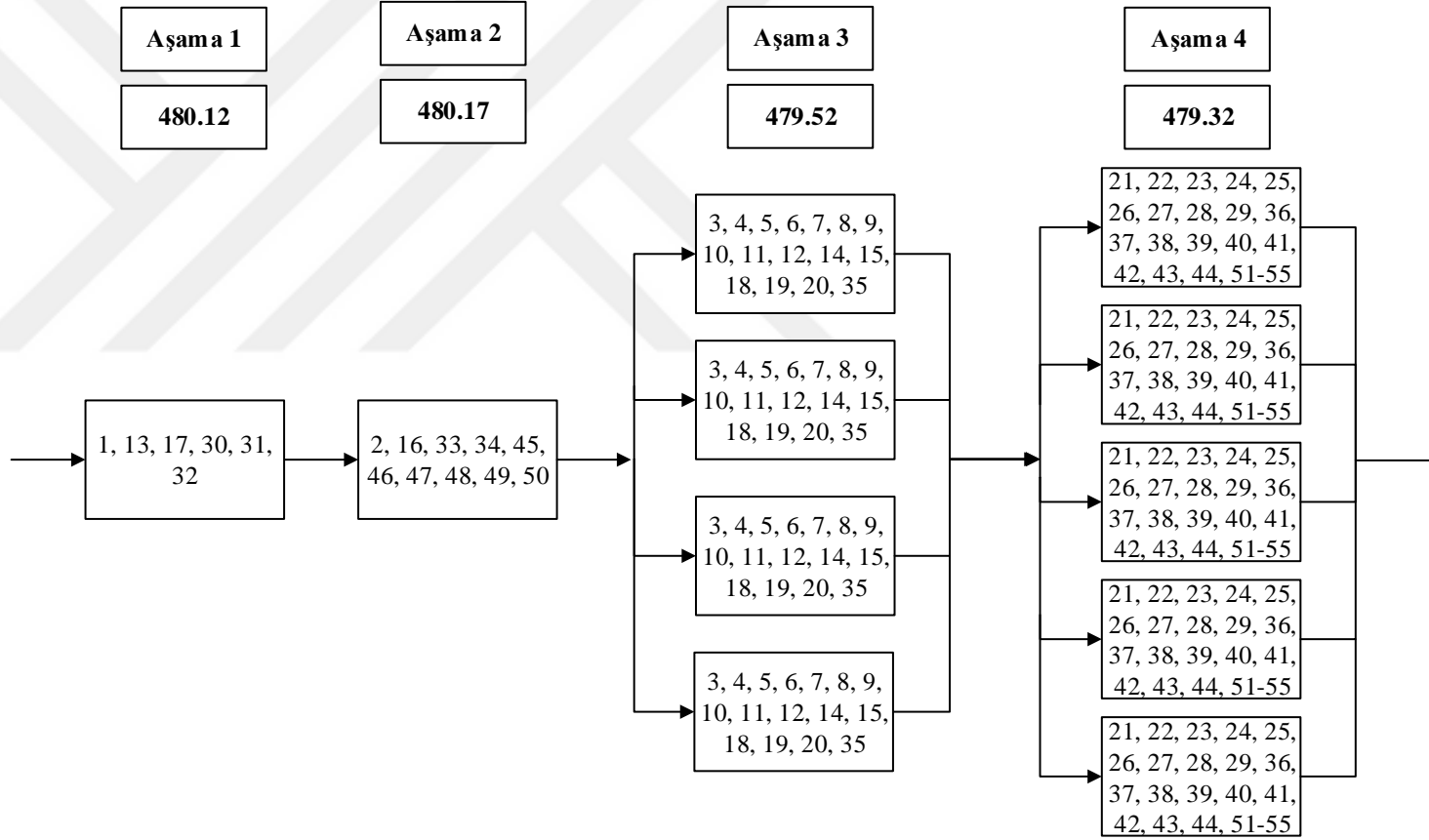
Uygulama örneğine ilişkin ilk analiz ise önceki çözümlerinde de olduğu gibi F_s değerinin 0 olduğu durumdur. F_s değerinin 0 olduğu duruma ilişkin elde edilen hat yerleşimi Şekil 4.35'te sunulduğu gibidir. Diğer model çözümlerinde olduğu gibi F_s değerinin 0 olduğu paralel istasyon açma cezasını dikkate alan model ile sınırlandırılmamış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modelinin aynı sonucu verdiği görülmektedir (Şekil 4.35). Bunun sebebi ise F_s değerinin 0 olduğu durumda önerilen modelin sınırlandırılmamış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeline dönüşmesidir. Elde edilen sonuçlar en iyi çevrim süresinin elde edildiğini gösterse de bu yerleşimin; bütün görevlerin bir istasyona atanması ve bütün istasyonların paralel şekilde düzenlenmesi gibi hat dengeleme felsefesine aykırı sonuçlar ürettiğine daha önce de değinilmiştir. F_s parametresi de bu gibi hat dengeleme felsefesine aykırı sonuçların ortaya çıkmasının engellenmesi amacıyla modele eklenmiştir. Dolayısıyla F_s parametresinin modeldeki görevini yerine getirebilmesi için sıfırdan farklı bir değer alması gerektiği açıktır.

F_s parametresinin sıfırdan farklı bir değer aldığı tüm senaryolarda ise farklı hat yerleşimleri elde edilmektedir. Bu yerleşimler arasından çevrim süresi ve görev dağılımı açısından en uygun olanının belirlenmesi amacıyla da F_s parametresinin bazı ara değerleri için önerilen modelin çözülmesi sağlanmıştır. Paralel istasyon açma cezasını ifade eden F_s parametresinin değişimine göre elde edilen farklı hat yerleşimleri de Şekil 4.35 - Şekil 4.52’de verilmiştir.

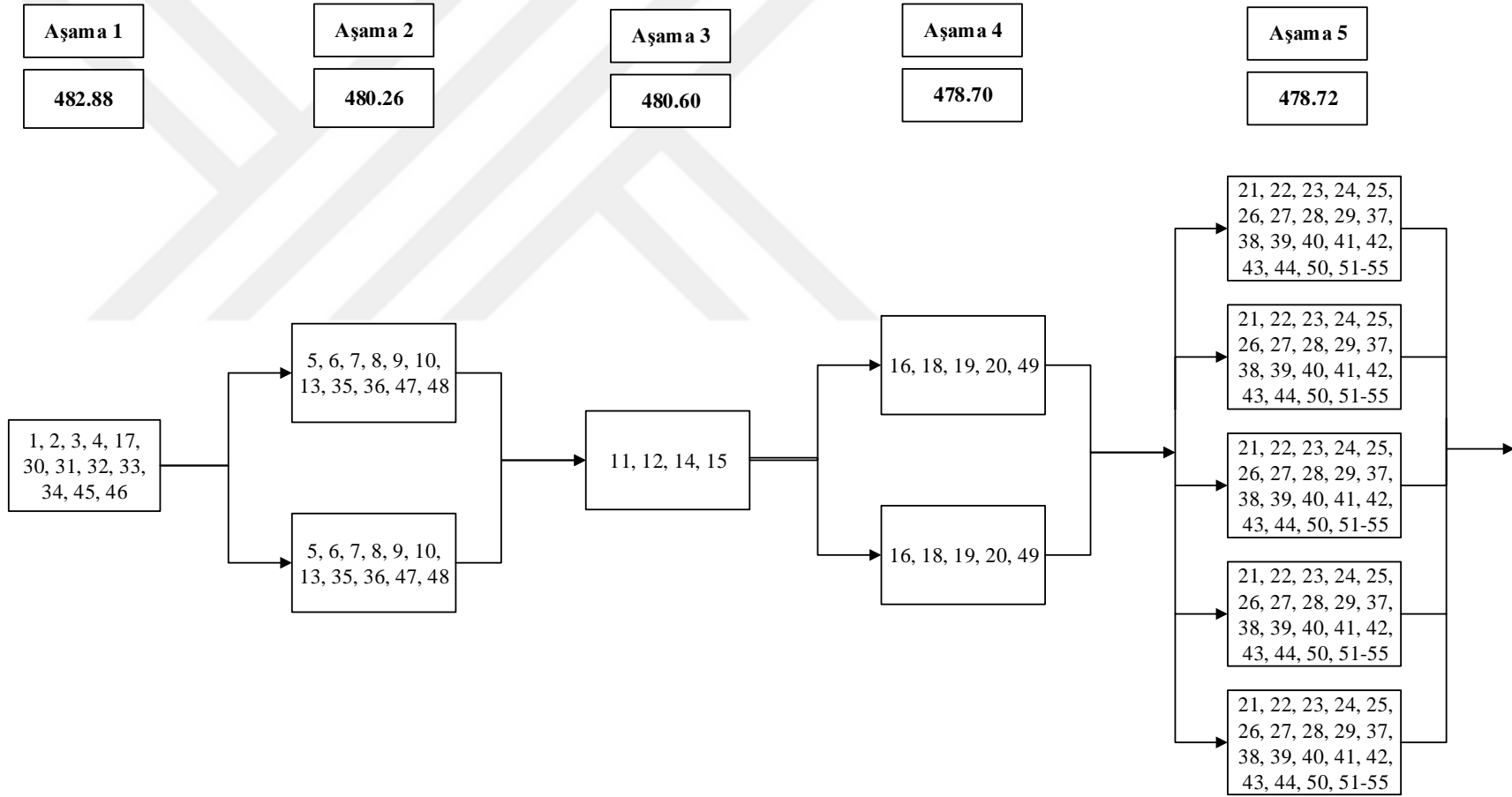




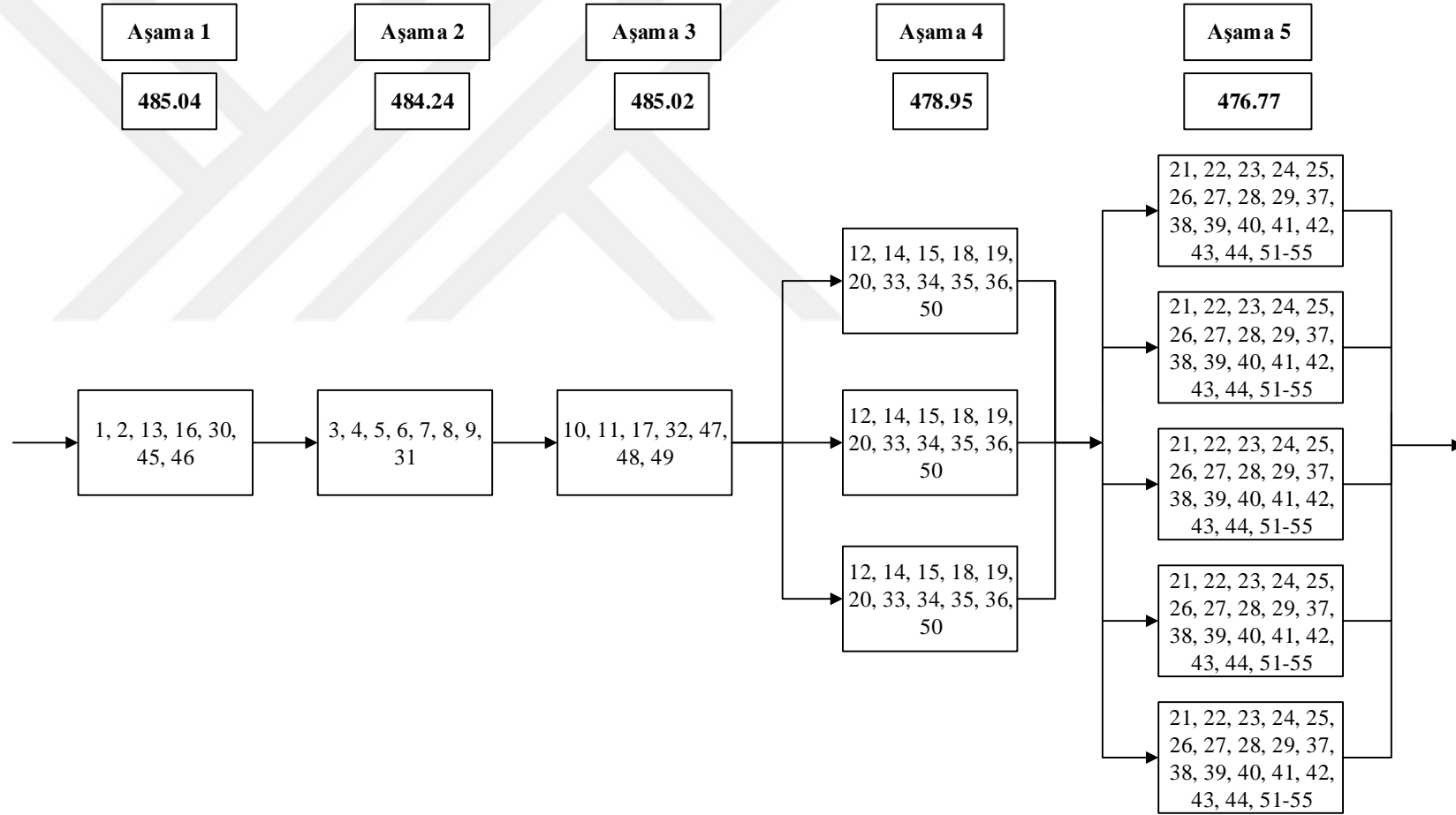
Şekil 4.35. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 0$)



Şekil 4.36. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 1$)

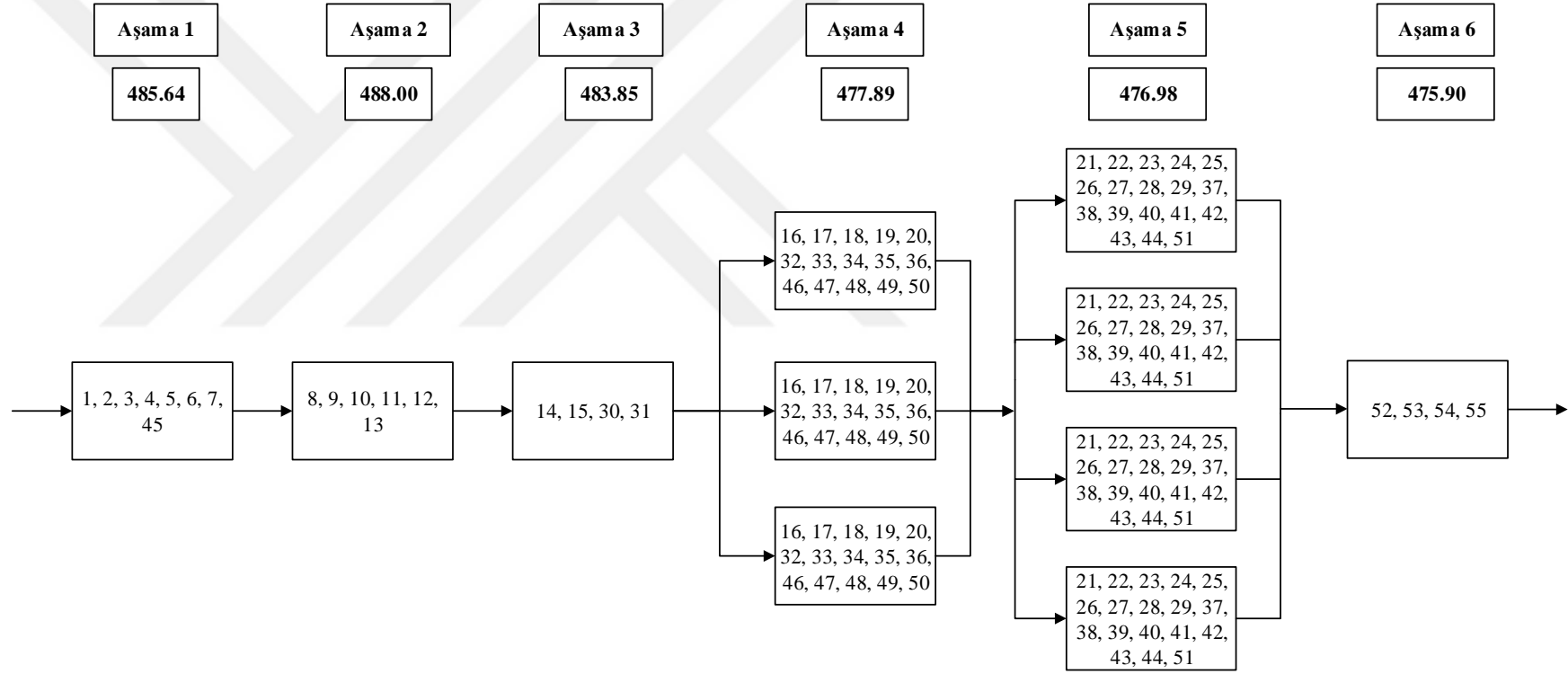


Şekil 4.37. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 5$)

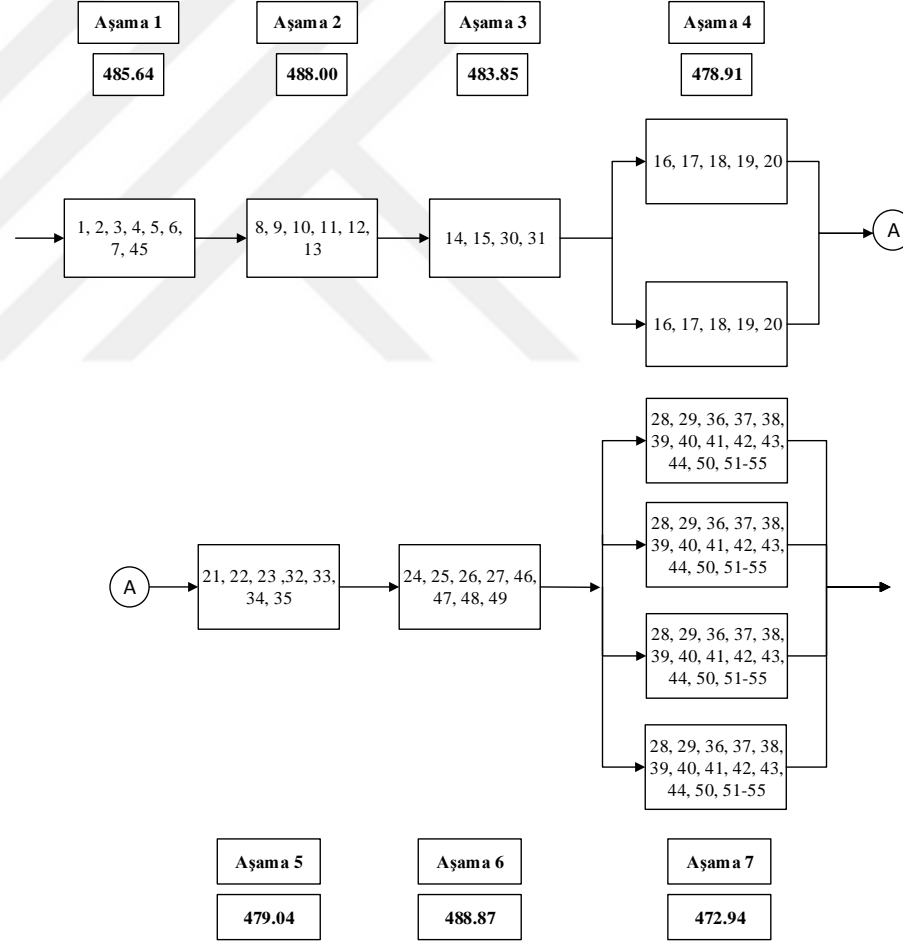


Şekil 4.38. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi

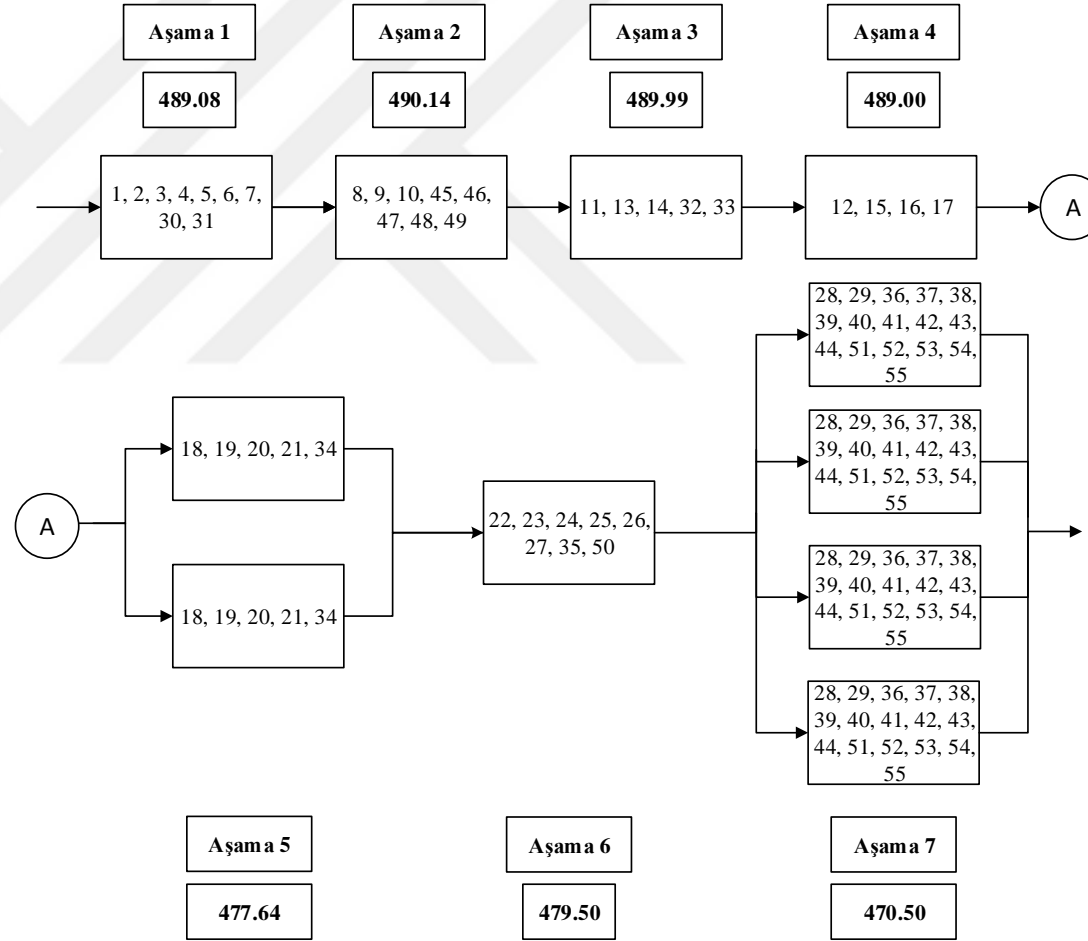
($F_s = 10$)



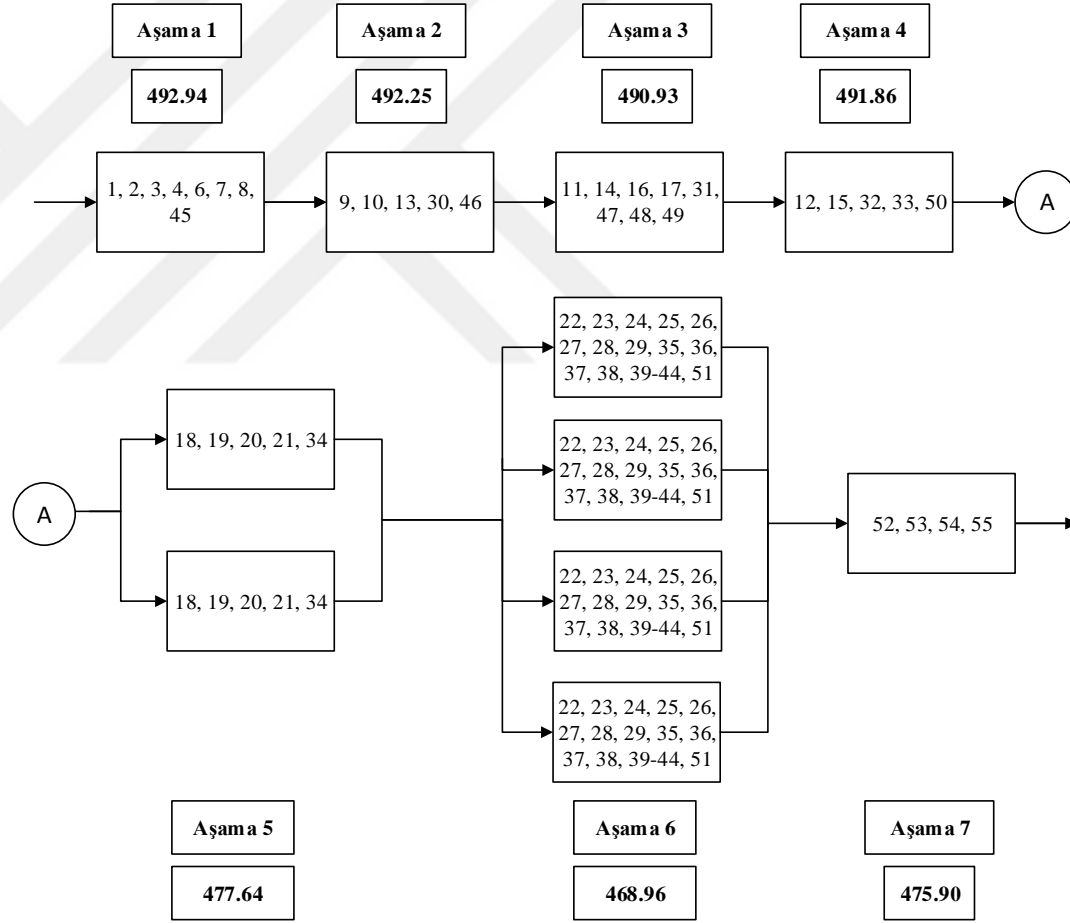
Şekil 4.39. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 15$)



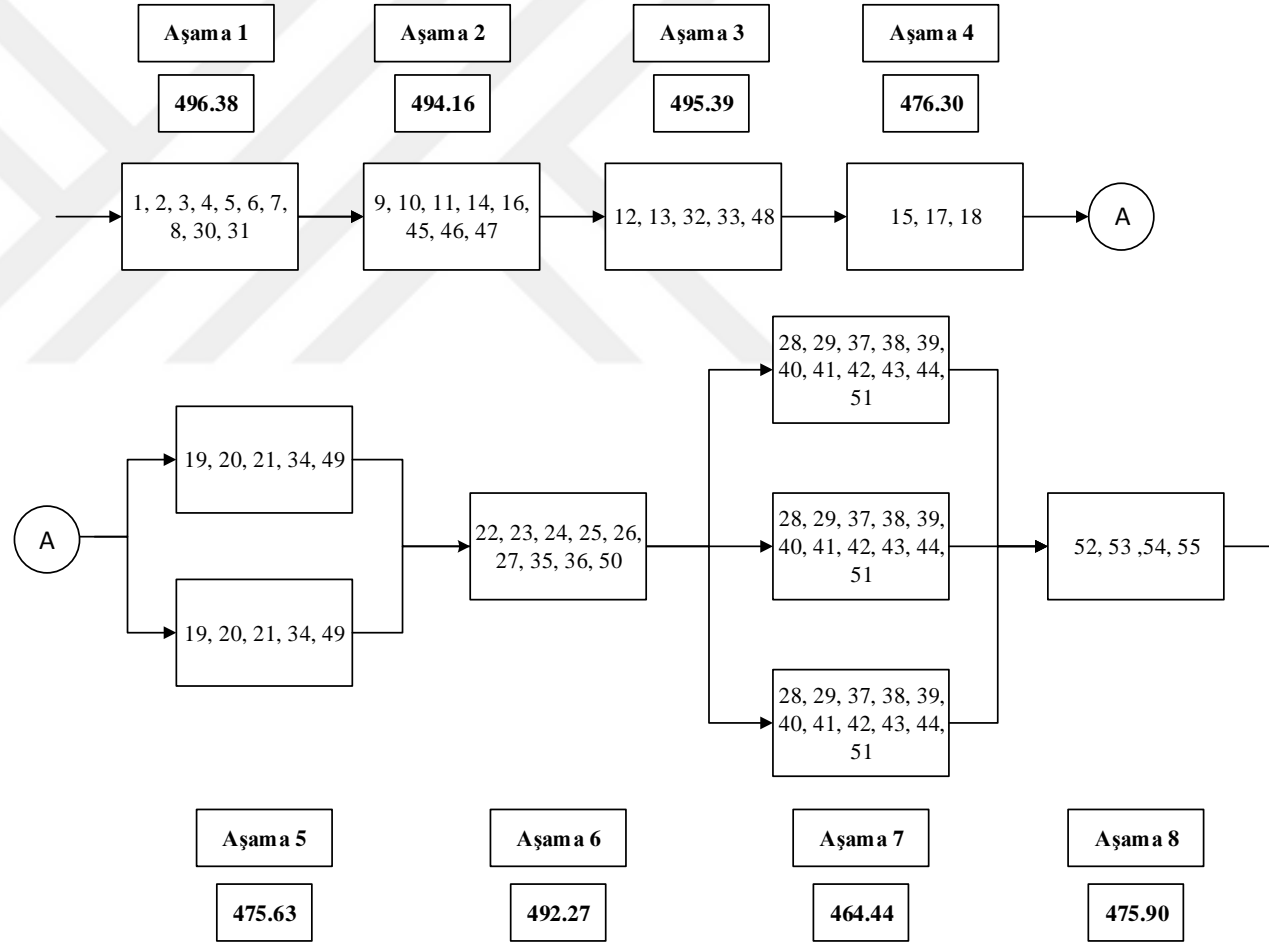
Şekil 4.40. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 20$)



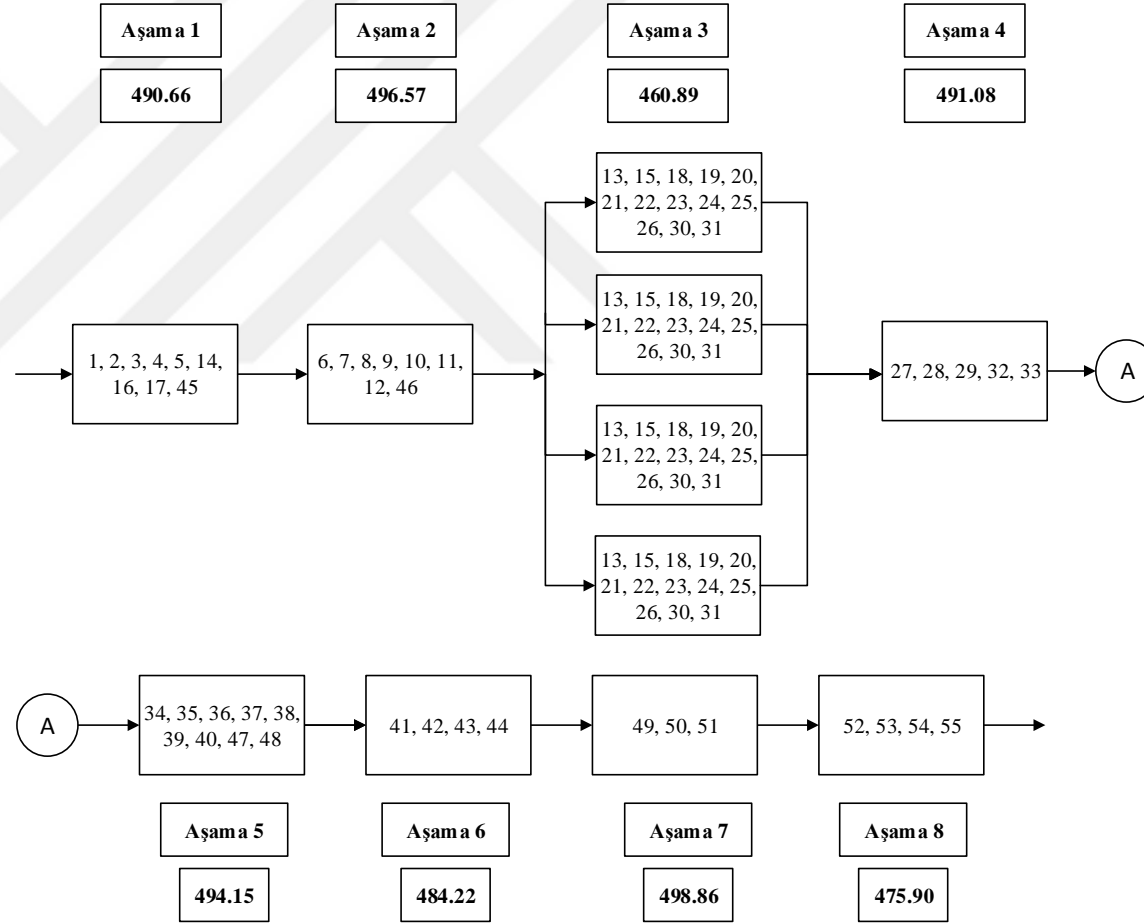
Şekil 4.41. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 25$)



Şekil 4.42. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 30$)

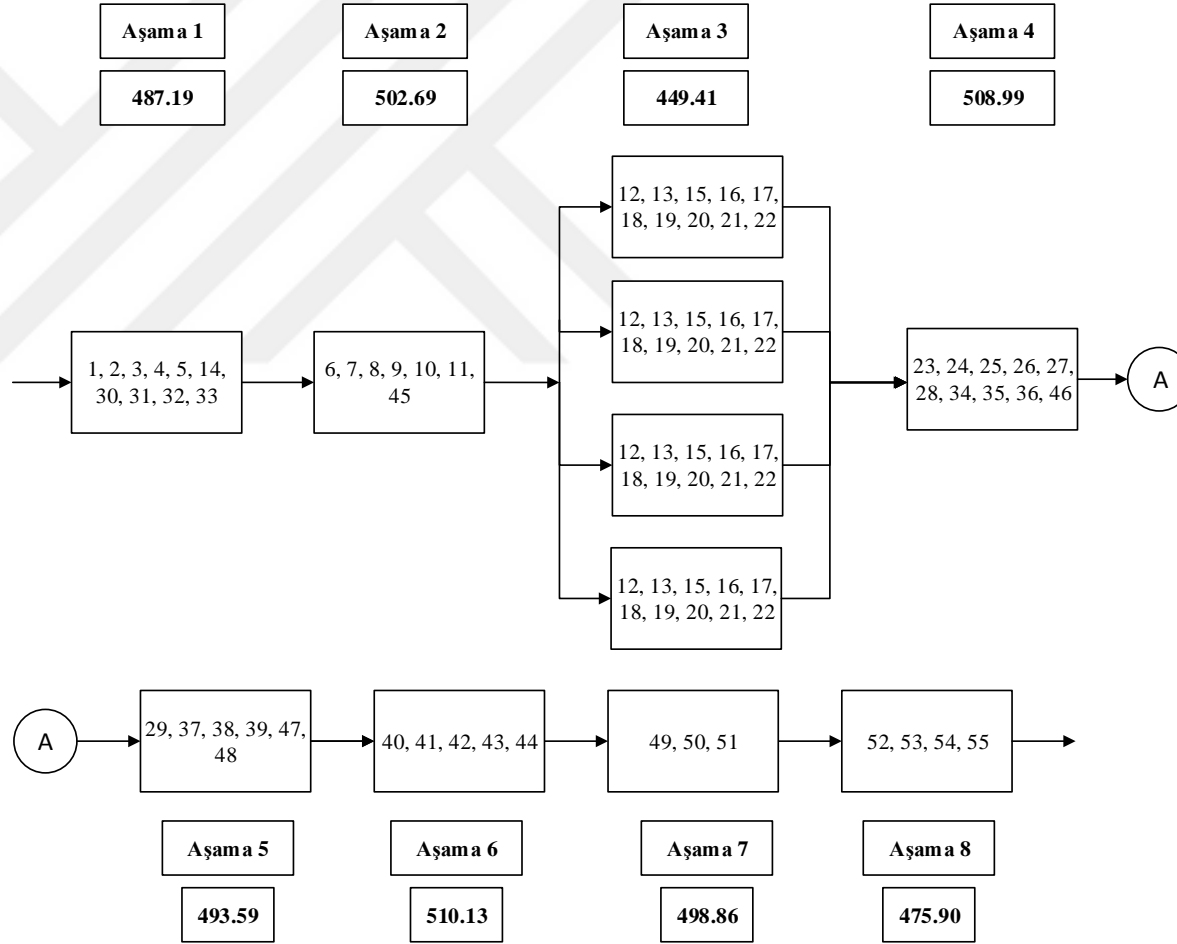


Şekil 4.43. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 40$)

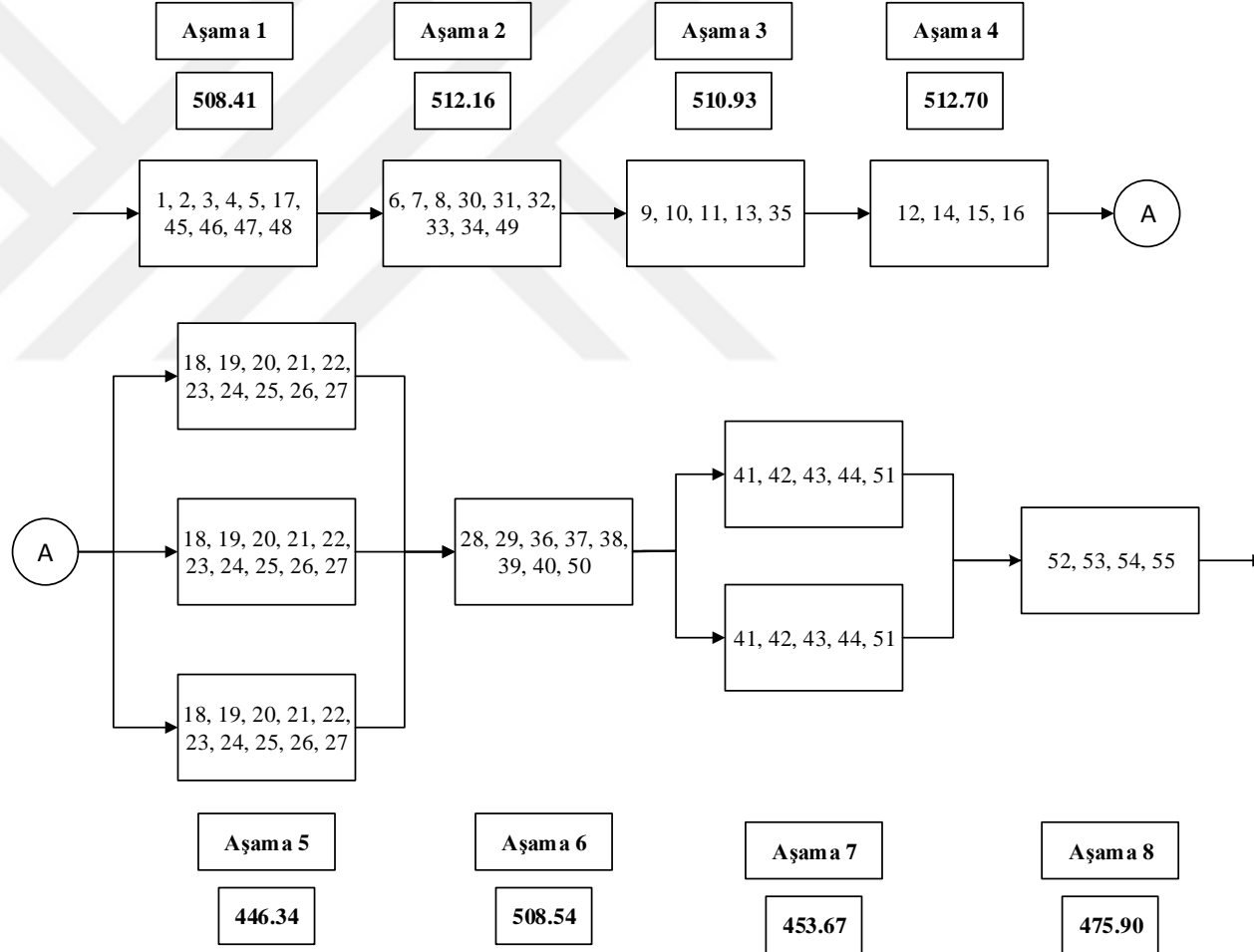


Şekil 4.44. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi

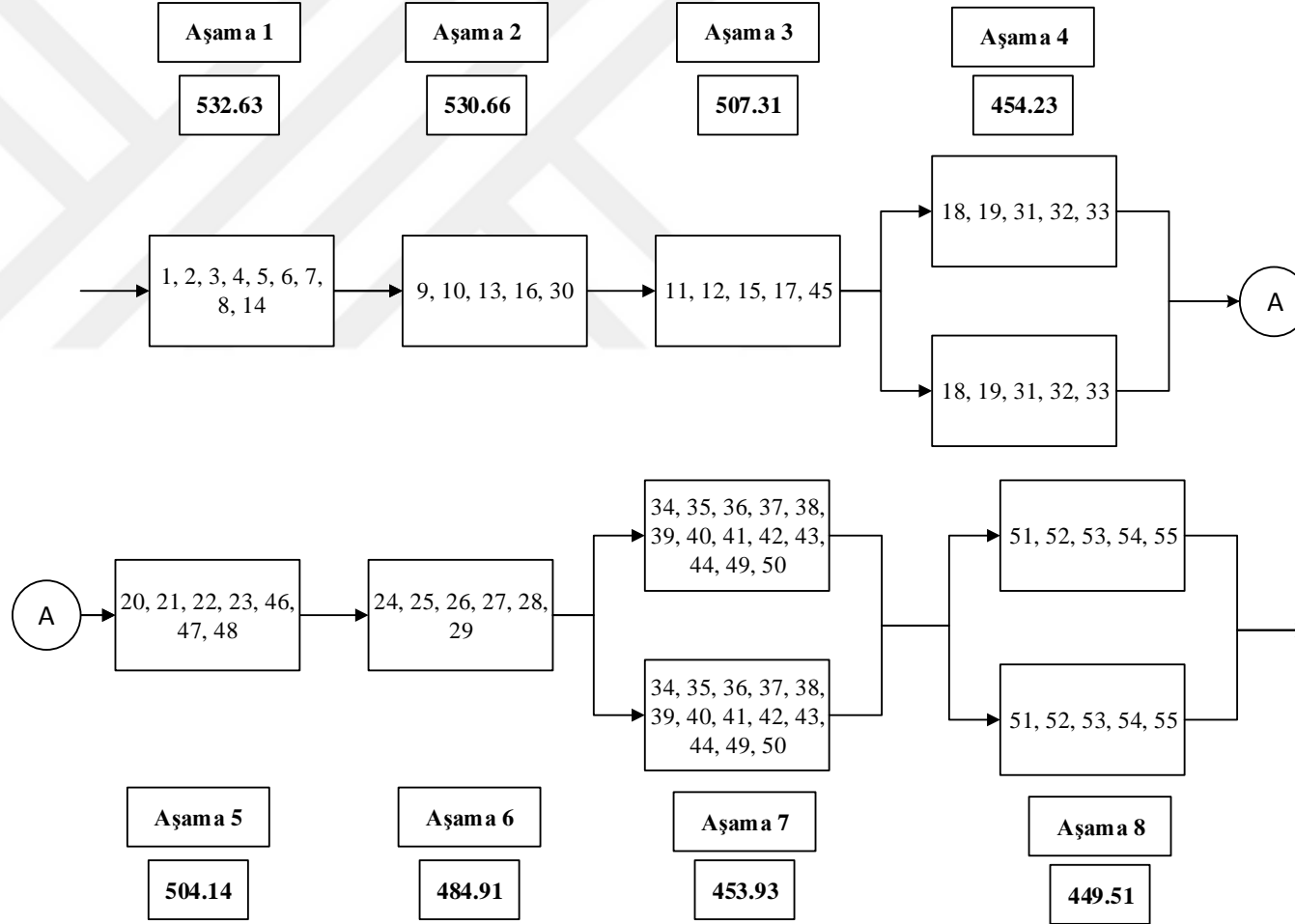
($F_s = 50$)



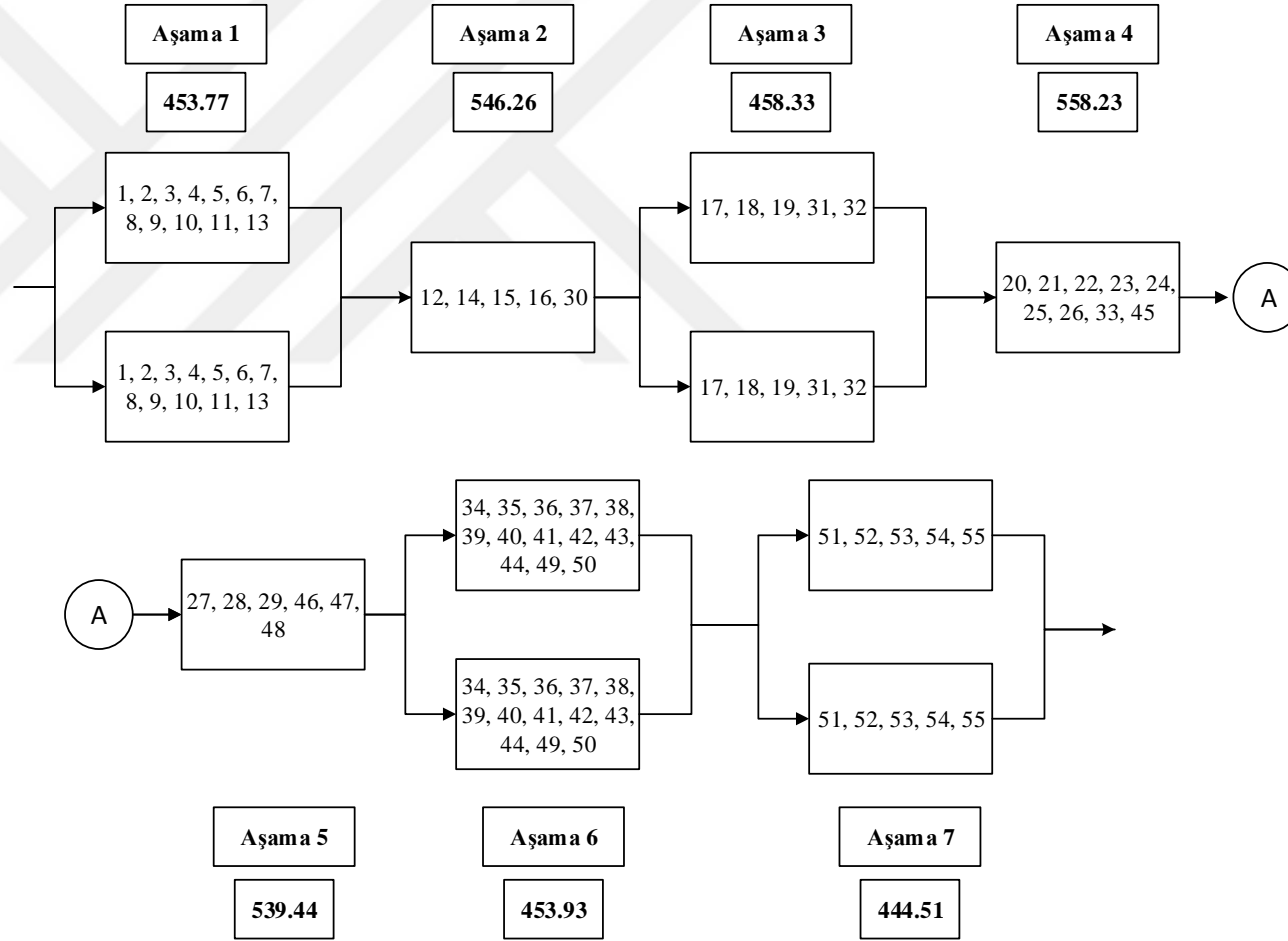
Şekil 4.45. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 75$)



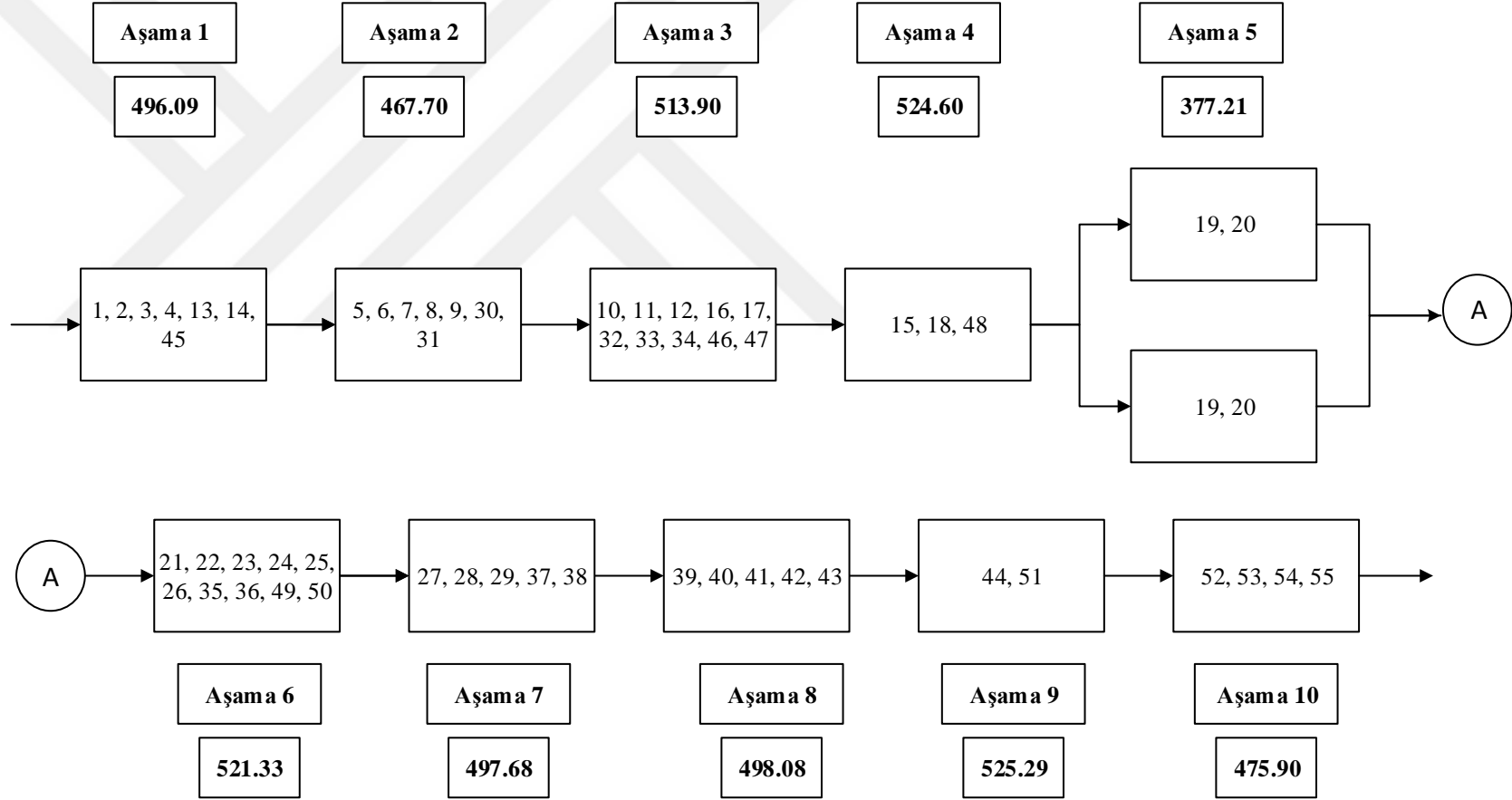
Şekil 4.46. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 100$)



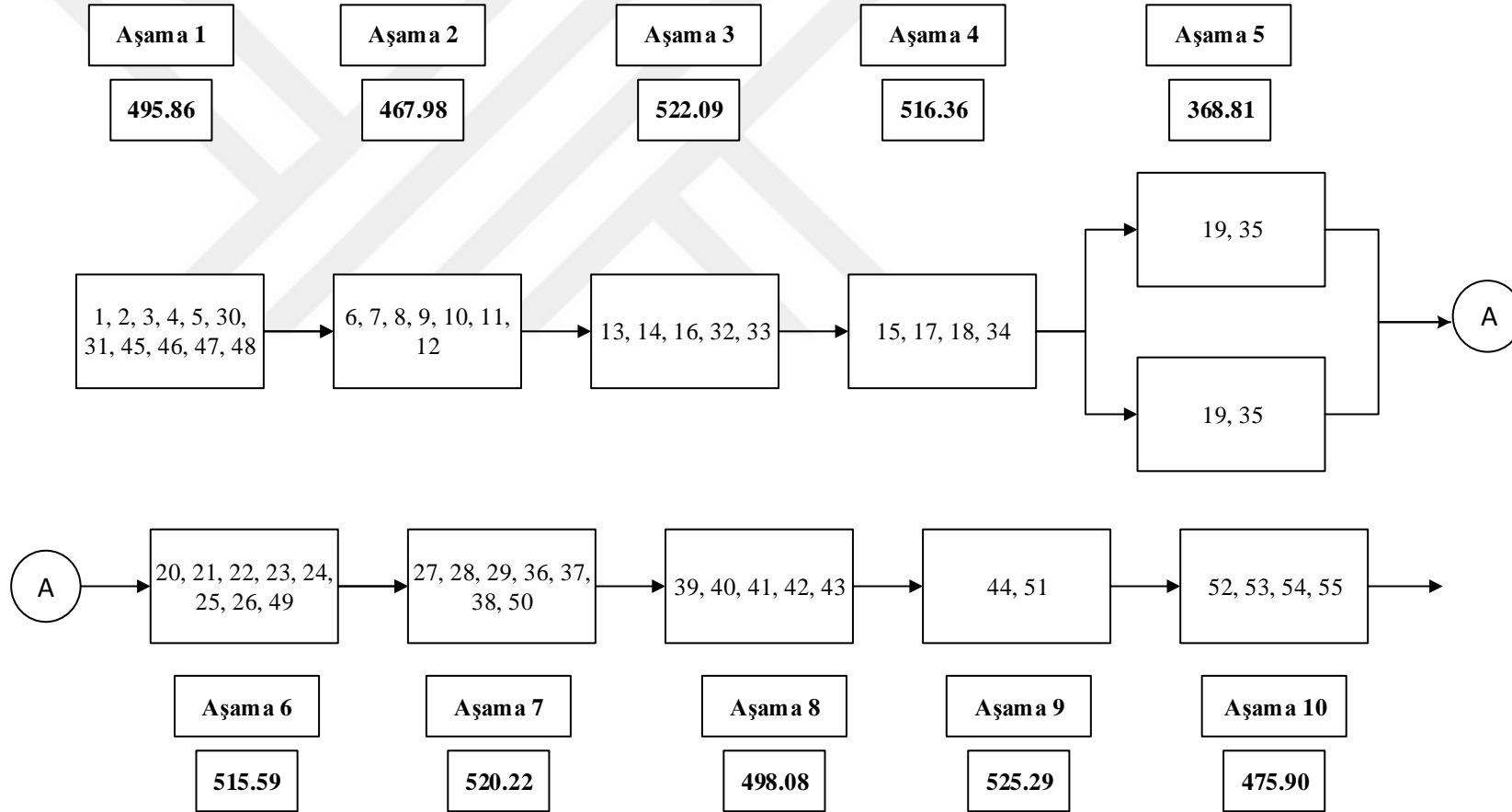
Şekil 4.47. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 150$)



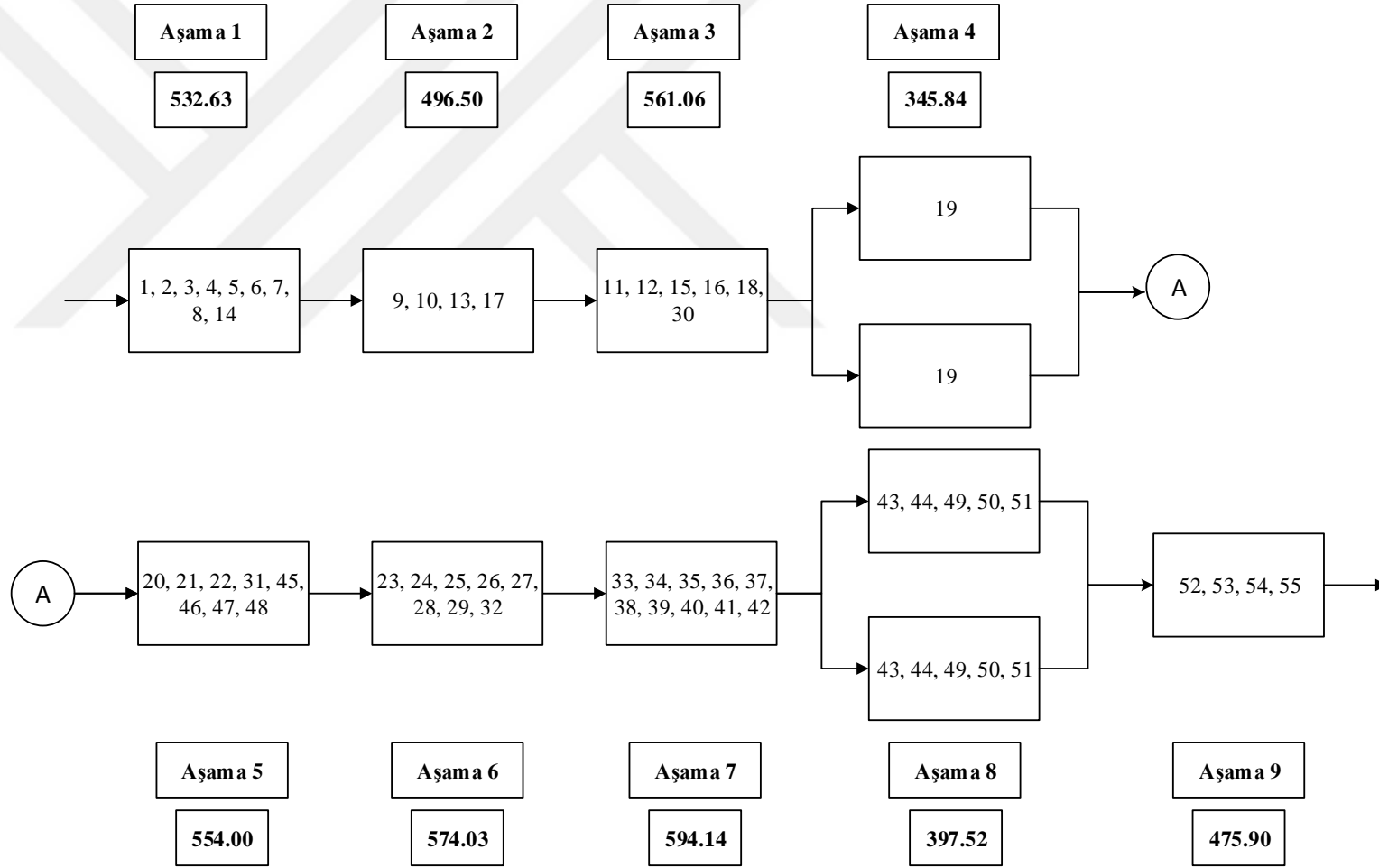
Şekil 4.48. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 200$)



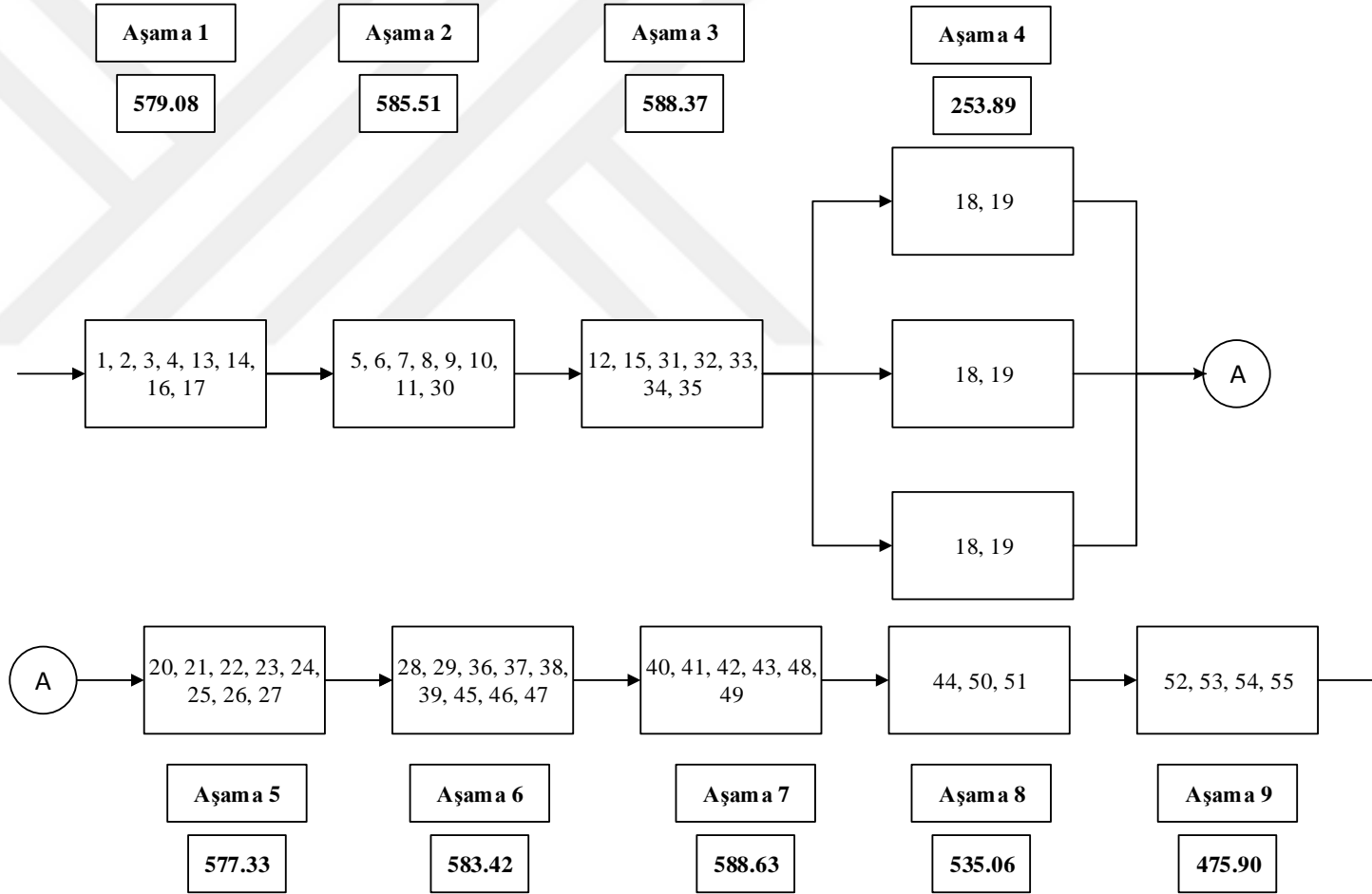
Şekil 4.49. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 250$)



Şekil 4.50. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 300$)



Şekil 4.51. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 400$)



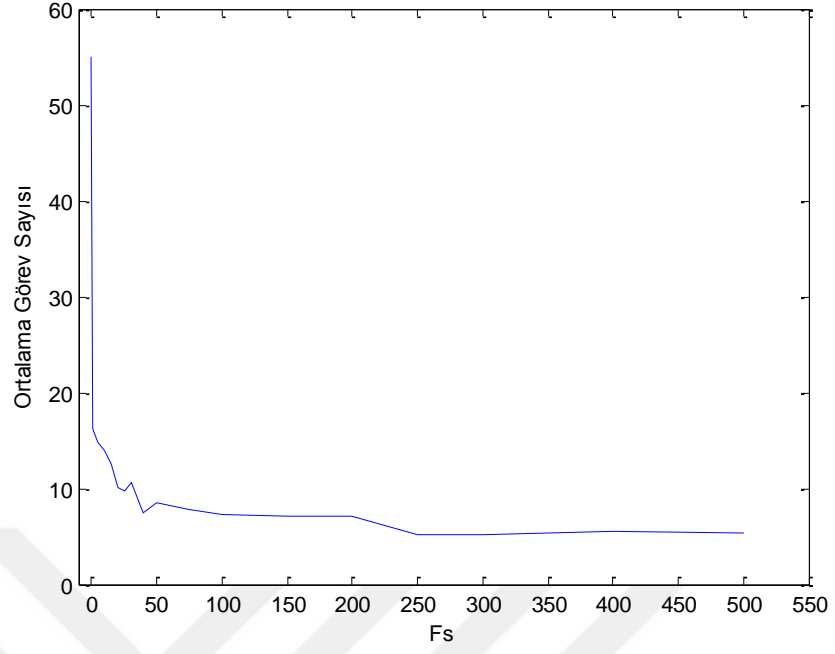
Şekil 4.52. Paralel istasyon açma cezasını dikkate alan paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modeli ile çözümüne ilişkin hat yerleşimi ($F_s = 500$)

Denklem 3.44 – Denklem 3.53’te ayrıntıları sunulan paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modelindeki F_s parametresinin değışimleri sonucunda elde edilen hat yerleşimleri analiz edildiğinde en iyi çevrim süresine F_s ’nin 0 değerini aldığı durumda ulaşılmaktadır (Şekil 4.35). Ancak tüm istasyonların birbirine paralel olarak düzenlendiğı bu yerleşim, uygulanabilirlik açısından kabul edilebilir bir sonuç ifade etmemektedir. Bu sebeple en uygun montaj hattı tasarımının belirlenmesinde F_s parametresinin farklı pozitif değerleri için elde edilen hat yerleşimlerinin de değerlendirilmesi gerekmektedir (Şekil 4.36 - Şekil 4.52).

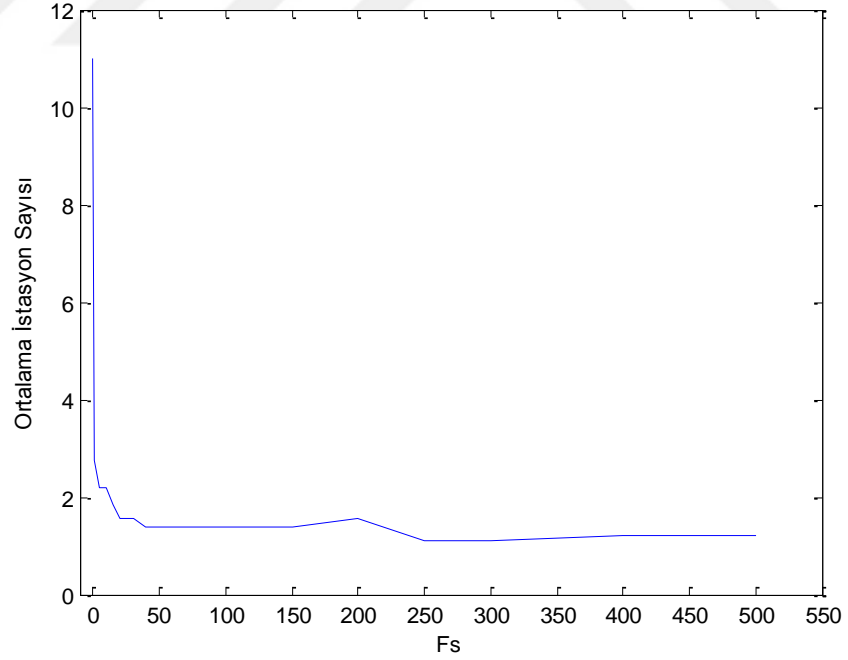
F_s parametresinin 0 olduğu durumda çevrim süresinin en iyi değerinin elden edilmesine rağmen iş istasyonu başına düşen ortalama görev sayısı 55 ile en yüksek seviye ulaşmıştır (Şekil 5.35). F_s ’nin 1 değerini aldığı durumda ise ortalama görev sayısında ciddi bir iyileşme sağlanarak 16.27 değerine erişilmiştir (Şekil 4.53). Üstelik kullanılan ceza katsayısı F_s ’nin etkisiyle bir aşamadaki ortalama istasyon sayısı değeri de 3.67 ile ilk duruma göre daha makul seviyelere indirilmiştir (Şekil 4.54). F_s ’nin pozitif değerlerine ilişkin diğere hat yerleşimleri de incelendiğinde F_s değeri arttıkça çevrim süresi değerinin 200 - 300 değerleri dışında arttığı görülmektedir (Şekil 4.55).

Elde edilen sonuçlar, F_s değerinin artışına bağılı olarak bir iş istasyonundaki ortalama görev sayısının da azalma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Bunun yanı sıra F_s ’nin 30’den büyük değere aldığı durumlar için ortalama görev sayısının 10’un üzerine çıkmadığı belirlenmiştir (Şekil 4.53).

Şekil 4.54’te de bir aşamadaki istasyon sayısının ortalama değerinin F_s parametresine göre değışimine yer verilmiştir. Uygulama örneğinin sınırlandırılmamış hat dengeleme modeli ile çözülmesi sonucunda bütün istasyonların birbirine paralel şekilde düzenlendiğı ve bir aşamadaki ortalama istasyon sayısı değerinin en yüksek değere ulaştığı görülmektedir. Ancak problemin paralel istasyon oluşturma cezasını dikkate alan model ile çözülmesi sonucunda F_s parametresinin 15’ten büyük değerleri için bir aşamadaki ortalama istasyon sayısının 2’nin üzerine çıkmadığı belirlenmiştir (Şekil 4.54).

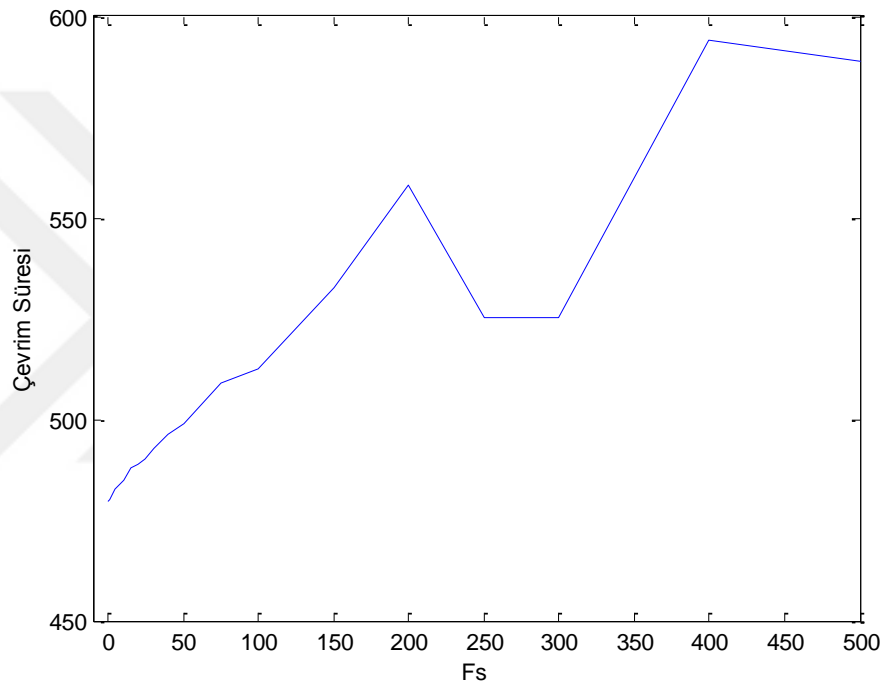


Şekil 4.53. İş istasyonu başına düşen ortalama görev sayısının F_s parametresine göre değişimi



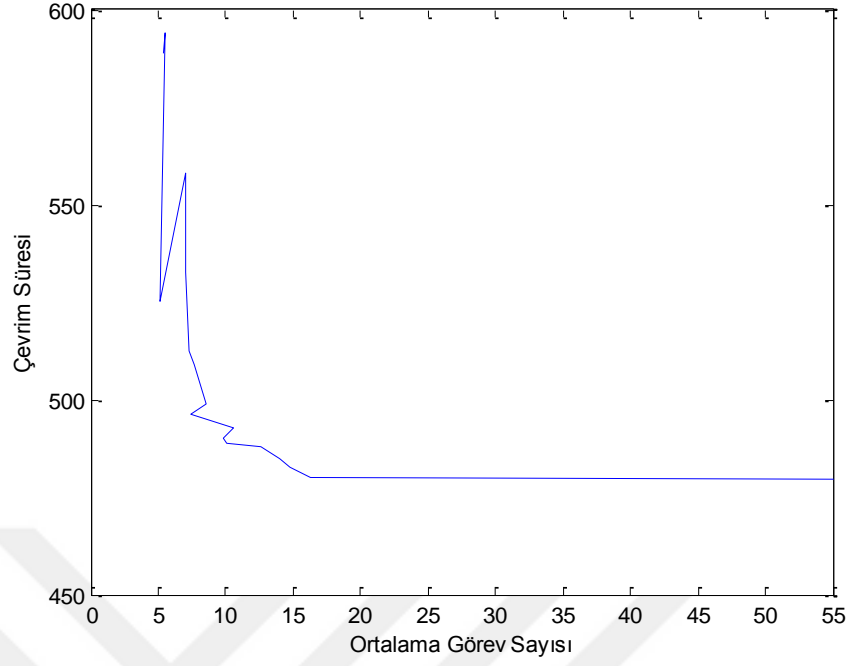
Şekil 4.54. Bir aşamadaki ortalama istasyon sayısının F_s parametresine göre değişimi

F_s parametresindeki değişimin çevrim süresine etkisi ise Şekil 4.55 yardımı ile analiz edilebilmektedir. F_s 'nin 200'e kadarki değerleri için çevrim süresi değerleri artış gösterirken; bu artış 200-300 arasında noktalanmış ve 300'den sonra hızlanarak devam etmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta ise F_s 'nin 300 değerinden sonra çevrim süresinin kabul edilebilir seviyelerden oldukça uzaklaşmasıdır. Bu sebeple örnek uygulamanın çözümüne yönelik olarak belirlene ceza katsayısı (F_s)'nin değerinin 300'den büyük olmamasına özen gösterilmelidir.

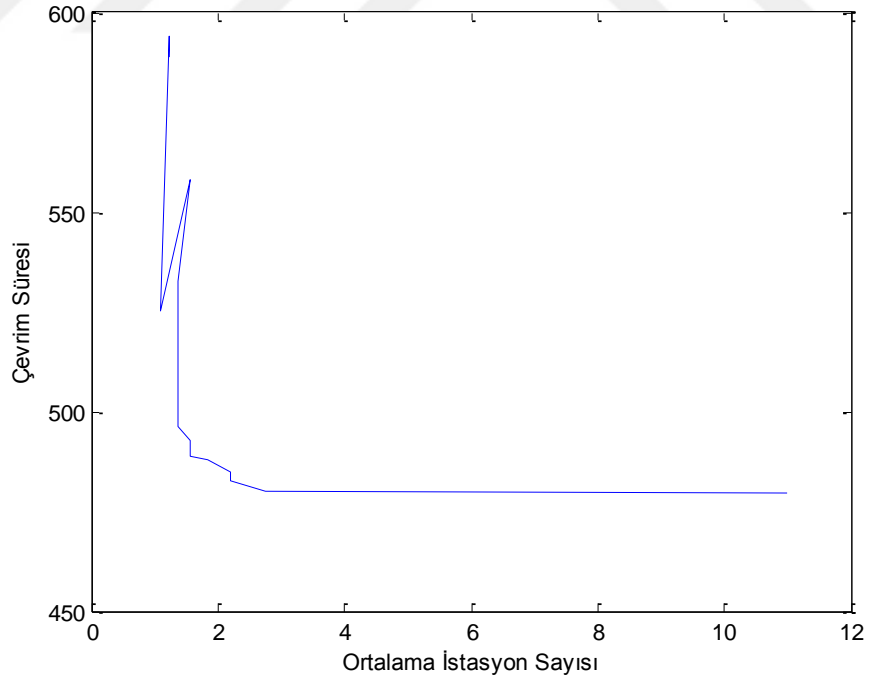


Şekil 4.55. Çevrim süresinin F_s parametresine göre değişimi

Örnek uygulamanın paralel istasyon açma cezasını dikkate alan hat dengeleme modeli ile çözülmesi sonucunda elde edilen hat yerleşimlerinden yararlanılarak Şekil 4.56 ve Şekil 4.57'de sunulan grafikler oluşturulmuştur. Bu görseller aracılığı ile de çevrim süresinin, ortalama görev sayısına ve ortalama istasyon sayısına göre değişimine dikkat çekilmiştir. İki ayrı grafikte de görüleceği üzere ortalama görev sayısı ve ortalama istasyon sayısı ölçütlerinin artışına bağlı olarak çevrim süresi değeri de düşmektedir.



Şekil 4.56. Çevrim süresinin bir istasyondaki ortalama görev sayısına göre değişimi



Şekil 4.57. Çevrim süresinin bir aşamadaki ortalama istasyon sayısına göre değişimi

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında montaj hattı dengeleme problemleri literatüründe henüz çok yeni teknikler olan paralel görev atama ve paralel istasyon oluşturma yaklaşımları üzerine odaklanılmıştır. Günümüz rekabet koşulları müşteri istek ve ihtiyaçlarının olabildiğince hızla karşılanmasını ve üretim hatlarının bu hıza ayak uydurabilmesini zorunlu kılmaktadır. Hat, istasyon ve görev paralelliği gibi pratik çözümler ise müşteri taleplerindeki dalgalanmalara ve üretim ortamındaki olası aksaklıklara karşı alınabilecek önlemlerin başında gelmektedir. Paralel istasyon ve paralel görev oluşturma kavramları da özellikle görev süreleri arasındaki farkın çok fazla olduğu ve çevrim süresinden büyük işlem süresine sahip görevlerin bulunduğu montaj hatlarında, çevrim süresinin düşürülerek üretim oranlarının üst seviyeye çıkarılması için kullanılan yaklaşımların başında gelmektedir.

Montaj hattı dengeleme literatürü için oldukça dikkat çekici ve başarılı sonuçlar üreten çözüm önerilerinin tanıtıldığı bu tez çalışmasında öncelikle ele alınan paralel istasyon oluşturma ve paralel görev atama yaklaşımları ile ilgili kavramlara değinilmiştir. Sonraki bölümde ise bu yaklaşımları temel alarak geliştirilen matematiksel programlama modellerine ve sezgisel bir yöntemle ilişkin ayrıntılara yer verilmiştir. İlk aşamada, paralel görev atamalı ve sınırlandırılmış paralel istasyon oluşturmali hat dengeleme modellerinin geliştirilmesi sağlanmıştır. Sonraki aşamada ise, önerilen paralel istasyon oluşturmali modelin parametrelerin sınırlandırılmadığı durumda, hat dengeleme felsefesine aykırı sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir. Bu sebeple önerilen modellerin görevler arasındaki geçiş sürelerini yansıtan ve açılan her bir paralel istasyon için geçerli olan ceza katsayısı değerlerini dikkate alacak şekilde geliştirilmesi sağlanmıştır. Bu sayede kullanılan aşama sayısı ve paralel istasyon sayısının önceden modele tanımlandığı sınırlandırılmış model yerine, hazırlık sürelerini de dikkate alarak gerçek hayat problemlerini daha iyi temsil eden sınırlandırılmamış hat dengeleme modellerinin literatüre kazandırılması sağlanmıştır. Çalışmanın uygulama aşamasında ise kapsamlı bir sanayi problemi ele alınarak önerilen matematiksel programlama modellerinin ürettiği sonuçlar analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, özellikle görev süreleri arasındaki farkın çok fazla olduğu ve çevrim süresinden büyük işlem süresine sahip görevlerin bulunduğu montaj hattı dengeleme problemleri için, bu tez çalışmasında ortaya konulan paralel görev

atama ve paralel istasyon oluşturma yaklaşımlarını temel alan çözüm yöntemlerinin geleneksel hat dengeleme modellerine kıyasla daha başarılı sonuçlar ürettiği görölmüştür.

Gelecek çalışmalarda ise önerilen sezgisel yöntemin geliştirilerek büyük boyutlu hat dengeleme problemlerinin çözümünde kullanılması hedeflenmektedir. Önerilen görevler arası geçiş süresini dikkate alan hat dengeleme modelinde ise mevcut modeldeki bütün montaj hattı için sabit alınan ceza katsayısı değerinin, aynı istasyonda yer alan işlerin özelliğine bağlı olarak farklı değerler alması durumunun ileriki çalışmalarda analiz edilmesi planlanmaktadır.



KAYNAKLAR

- Acar, N., Eştaş, S. 1991.** Kesikli seri üretim sistemlerinde planlama ve kontrol çalışmaları. MPM Yayınları, Ankara.
- Akagi, F., Osaki, H., Kikuchi, S. 1983.** A method for assembly line balancing with more than one worker in each station. *International Journal of Production Research*, 21: 755-770.
- Akpınar, S., Bayhan M.G., Baykasoğlu, A. 2013.** Hybridizing ant colony optimization via genetic algorithm for mixed-model assembly line balancing problem with sequence dependent setup times between tasks. *Applied Soft Computing*, 13(1): 574-589.
- Akbiyık, Ö., Mammayew, C. 2013.** Yalın üretim uygulamaları ile hat optimizasyonu. Danışman: H. Cenk Özmutlu. Bütünleşik Sistem Tasarımı Projesi Raporu, Uludağ Üniversitesi, Bursa.
- Altunay, H., Özmutlu, H.C., Özmutlu, S. 2017.** A new mathematical model for assembly line balancing problem with task paralleling assignment approach. *Journal of Economics and Administrative Sciences* (Kabul Tarihi: 21.12.2016).
- Angelidis, E., Pappert, S.F., Rose, O. 2011.** A prototype simulation tool for a framework for simulation-based optimization of assembly lines. Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference, Phoenix, 11-14 December 2011, 2383-2394.
- Araújo, F.F.B., Costa, A.M., Miralles, C. 2012.** Two extensions for the ALWABP: Parallel stations and collaborative approach. *International Journal of Production Economics*, 140(1): 483-495.
- Arcus, A.L. 1966.** COMSOAL: A Computer Method of Sequencing Operations for Assembly Lines. *International Journal of Production Research*, 4(4): 259-277.
- Askin, R.G., Zhou, M. 1997.** A parallel station heuristic for the mixed-model production line balancing problem. *International Journal of Production Research*, 35(11): 3095-3106.
- Aydemir-Karadağ, A., Türkbey, O. 2013.** Multi-objective optimization of stochastic disassembly line balancing with station paralleling. *Computers & Industrial Engineering* 65: 413-425.
- Bard, J.F. 1989.** Assembly line balancing with parallel workstations and dead time. *International Journal of Production Research*, 27(6): 1005-1018.
- Baskak, M. 1998.** Çok modelli/ürünlü montaj hatlarının dengelenmesi için yeni bir model ve çözüm yöntemi. *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

- Battaia, O., Dolgui, A. 2013.** A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches. *International Journal of Production Economics*, 142(2): 259-277.
- Baybars, İ. 1985.** On currently practiced formulations of the assembly line balance problem. *Journal of Operations Management*, 5: 449-453.
- Baybars, İ. 1986a.** A survey of exact algorithms for simple assembly line balancing problem. *Management Science*, 32(8): 909-932.
- Baybars, İ. 1986b.** An efficient heuristic method for the simple assembly line balancing problem. *International Journal of Production Research*, 24(1): 149-166.
- Becker, C., Scholl, A. 2006.** A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168(3): 694-715.
- Bowman, E.H. 1960.** Assembly line balancing by linear programming. *Operations Research*, 8: 385-389.
- Boysen, N., Fliedner, M., Scholl, A. 2007.** A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research*, 183(2): 674-693.
- Bronson, R. 1982.** Theory and problems of operations research. Schaum's Outline Series, McGraw-Hill, USA.
- Bryton, B. 1954.** Balancing of a continuous production line. *MSc Thesis*, North-Western University.
- Bukchin, J., Tzur, M. 2000.** Design of flexible assembly line to minimize equipment cost. *IIE Transactions*, 32(7): 585-598.
- Bukchin, J., Rubinovitz J. 2003.** A weighted approach for assembly line design with station paralleling and equipment selection. *IIE Transactions*, 35(1): 73-85.
- Bukchin, Y., Rabinowitch, I., 2005.** A branch and bound based solution approach for the mixed-model assembly line-balancing problem for minimizing stations and task duplication costs. *European Journal of Operational Research*, 174(1): 492-508.
- Buxey, G.M. 1974.** Assembly line balancing with multiple stations. *Management Science*, 20(6): 1010-1021.
- Çakır, B., Altıparmak, F., Dengi, B. 2011.** Multi-objective optimization of a stochastic assembly line balancing: A hybrid simulated annealing algorithm. *Computers & Industrial Engineering* 60: 376-384.
- Çerçioğlu, H. 2009.** Stokastik paralel MHD problemi için yeni modeller. *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Çerçioğlu, H., Özcan, U., Gökçen, H., Toklu, B. 2009. A simulated annealing approach for parallel assembly line balancing problem. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 24(2): 331-341.

Çetin, E. 2004. Stokastik programlama yöntemiyle bir portföy optimizasyonu modelinin geliştirilmesi, Yayımlanmamış *Doktora Tezi*, İ.Ü. Sosyal Bilimler Enstitüsü, Sayısal Yöntemler Bilim Dalı, İstanbul.

Chica, M., Cordóna, O., Damasa, S., Bautista, J. 2010. Multiobjective constructive heuristics for the 1/3 variant of the time and 3 space assembly line balancing problem: ACO and random greedy search. *Information Science*, 180(18): 3465-3487.

Chutima, P., Chimklai, P. 2012. Multi-Objective two-sided mixed-model assembly line balancing using particle swarm optimization with negative knowledge. *Journal Computers and Industrial Engineering*, 62(1): 39-55.

Chutima, P., Kid-Arn, S. (2013). PSONK: particle swarm optimization with negative knowledge for multi-objective u-shaped assembly lines balancing with parallel workstations. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, 12(1): 15-41.

Derya, T. 2012. Maliyet tabanlı paralel montaj hattı dengeleme problemleri: yeni modeller. *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.

Dervitsiotis, K.N. 1981. Operations management. New York: McGraw-Hill, USA.

Ege, Y. 2001. Assembly line balancing with station paralleling. *Yüksek Lisans Tezi*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.

Ege, Y., Azizoğlu, M., Özdemirel, N.E. 2009. Assembly line balancing with station paralleling. *Computers & Industrial Engineering*, 57: 1218–1225.

Elwoods, B. 1965. Modern production management. John Wiley and Sons, Inc.

Erel, E., Sarin, S.C. 1998. A survey of the assembly line balancing procedures. *Production Planning and Control*, 9(5): 414-434.

Erkut, H., Baskak, M. 1997. Tesis tasarımı: stratejiden uygulamaya. İrfan Yayıncılık, İstanbul.

Foroughi, A., Gökçen, H. 2014. Maliyet tabanlı stokastik montaj hattı dengeleme problemi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29 (3): 469-476.

Freeman, D. R., Jucker, J. V. 1967. The line balancing problem. *Journal of Industrial Engineering*, 18: 361.

Gagnon, R.J., Ghosh, S. 1991. Assembly line research: Historical roots, research life cycles and future directions. *OMEGA International Journal of Management Science*, 19: 381-399.

Gass, S.I. 2002. Great Moments in HistORy, *OR/MS Today* 29: 31-37.

Ghosh, S., Gagnon, R.J. 1989. A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems. *International Journal of Production Research*, 27(4): 637-670.

Gong, J., Prabhu V.V., Liu, W. 2011. Simulation-based performance comparison between assembly lines and assembly cells with real-time distributed arrival time control system. *International Journal of Production Research*, 49: 1241-1253.

Gökçen, H. 1989. Tek modellenli montaj hattı dengeleme metotları ve bir uygulama. *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Gökçen, H. 1994. Karışık modellenli deterministik montaj hattı dengeleme problem için yeni modeller. *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Gökçen, H., Erel, E. 1998. Binary integer formulation for mixed-model assembly line balancing problem. *Computers and Industrial Engineering*, 34(2): 451-461.

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

Grzechca, W., Foulds, L.R. 2015. The assembly line balancing problem with task splitting: a case study. *International Federation of Automatic Control-Papers Online*, 48(3): 2002-2008.

Hackman, S.T., Magazine, M.J., Wee, T.S. 1989. Fast, effective algorithms for simple assembly line balancing problems. *Operations Research*, 37(6): 916-924.

Hahn, R. 1972. Produktionsplanung bei linienfertigung. Walter de Gruyter, Berlin/New York.

Hafezalkotob, A., Ketabian, H., Rahimi, H. 2014. Balancing the production line by the simulation and statistics techniques: A case study. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 7(4): 754-763.

Helgeson, W.P., Birnie, D.P. 1961. Assembly line balancing using the ranked positional weight-technique. *The Journal of Industrial Engineering*, 12(6): 394-398.

Hoffmann, T.R. 1963. Assembly line balancing with a precedence matrix. *Management Science*, 9(4): 551-562.

Ignall, E.J. 1965. A review of assembly line balancing. *Journal of Industrial Engineering*, 16(4): 244-254.

Inman, R.R., Leon, M. 1994. Scheduling duplicate serial stations in transfer lines. *International Journal of Production Research*, 32: 2631-2644.

Jackson, J.R. 1956. A computing procedure for a line balancing problem. *Management Science*, 2 (3): 261-271.

Kaplan, Ö. 2004. Assembly line balancing with task paralleling. *Yüksek Lisans Tezi*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.

Kilbridge, M.D., Wester L. 1961. A heuristic method of assembly line balancing. *The Journal of Industrial Engineering*. 12(4): 292-298.

Kobu, B. 1987. Üretim yönetimi. İ.Ü. İşletme Fakültesi, İşletme İktisadi Enstitüsü Yayın No:83, İstanbul, 37-52.

Kobu, B. 2014. Üretim yönetimi. Beta Basım A.Ş., İstanbul.

Kumar, S.A., Suresh, N. 2008. Production and operations management: (with skill development, caselets and cases). New Age International (P) Ltd. Publishers, 2. Edition, New Delhi.

Lehman, M, 1969. On criteria for assigning models to assembly lines. *International Journal of Production Research*, 7(4): 269-285.

Mahdavi, I., Javadi B., Fallah-Alipour, K., Slomp, J. 2007. Designing a new mathematical model for cellular manufacturing system based on cell utilization. *Appl. Math. Comput.*, 190: 662-670.

Mansoor, E.M. 1964. Assembly line balancing-an improvement on the ranked positional weight technique. *The Journal of Industrial Engineering*, 15(2): 73-77.

McMullen, P.R., Frazier, G.V. 1997. Heuristic for solving mixed model line balancing problems with stochastic task durations and parallel stations. *International Journal of Production Economics*, 51(3): 177-190.

McMullen, P.R., Frazier, G.V. 1998. Using simulated annealing to solve a multiobjective assembly line balancing problem with parallel workstations. *International Journal of Production Research*, 36(10): 2717-2741.

Mitchell J. 1957. A computational procedure for balancing zoned assembly lines. Research Report 6-94801-1-R3, Westinghouse Research Laboratories, Pittsburgh.

Nanda, R., Scher, J.M. 1975. Assembly lines with overlapping work stations. *AIIE Transactions*, 7(3): 311-318.

Nanda, R., Scher, J.M. 1976. Nonparallelability constraints in assembly lines with overlapping work stations. *AIIE Transactions*, 8(3): 343–349.

Özkan, R. 2003. Tek modelli deterministik montaj hattı dengeleme problemlerine genetik algoritma ile çözüm yaklaşımı. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

Öztürk, C., Tunalı, S., Hnich, B., Örnek, A. 2013. Balancing and scheduling of flexible mixed model assembly lines with parallel stations. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 67: 2577-2591.

Öztürk C., Tunalı S., Hnich B., Örnek A. 2015. Cyclic scheduling of flexible mixed model assembly lines with parallel stations. *Journal of Manufacturing Systems*, 36: 147-158.

Patterson, J.H., Albracht, J.J. 1975. Assembly line balancing: zero-one programming with Fibonacci search. *Operations Research*, 23: 166-172.

Pinnoi, A., Wilhelm, W.E. 1997. Family of hierarchical models for the design of deterministic assembly systems. *International Journal of Production Research*, 35(1): 253–280.

Pinnoi, A., Wilhelm, W.E. 1998. Assembly system design: a branch and cut approach *Management Science*, 44(1): 103–118.

Pinto, P., Dannenbring, D.G., Khumawala, B.M. 1975. A branch and bound algorithm for assembly line balancing with paralleling. *International Journal of Production Research*, 13(2): 183-196.

Pinto, P., Dannenbring, D.G., Khumawala, B.M. 1981. Branch and bound heuristic procedures for assembly line balancing with paralleling of stations. *International Journal of Production Research*, 19(4): 565-576.

Polat, O. 2008. Montaj hattı işçi atama ve dengeleme problemlerinin genetik algoritmalarla çözülmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli.

Saidabad, A.A., Taghizadeh, H. 2015. Performance and improvement of production line function using computer simulation (case study: an iron foundry). *American Journal of Computational Mathematics*, 5: 431-446.

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

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

- Sarker, B.R., Shantikumar, J.G. 1983.** Generalized approach for serial or parallel line balancing. *International Journal of Production Research*, 21(1): 109-133.
- Scholl, A., Becker, C. 2006.** State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *European Journal of Operations Research*, 168: 666-693.
- Simaria, A.S., Vilarinho, P.M. 2009.** 2-ANTBAL: An ant colony optimisation algorithm for balancing two-sided assembly line. *Computer and Industrial Eng.*, 56: 489-506.
- Sniedovich, M. 1981.** Analysis of preference order assembly line problem. *Management Science*, 27(9): 1067-1104.
- Süer, G.A. 1992.** An algorithm to find the number of parallel stations for optimal cell scheduling. *Computers and Industrial Engineering*, 23(1-4): 81-84.
- Süer, G.A. 1998.** Designing parallel assembly lines. *Computers and Industrial Engineering*, 35(3-4): 467-470.
- Talbot, F.B., Patterson, J.H. 1984.** An integer programming algorithm with network cuts for solving the assembly line balancing problem. *Management Science*, 30: 85-99.
- Tanrıtanır, E. 1990.** Üretim sistemleri ve imalat sistemleri. *İ.Ü. Orman Fakültesi Dergisi*, 40(1).
- Tanyaş, M., Baskak, M. 2003.** Üretim planlama ve kontrol. İrfan Yayıncılık, İstanbul.
- Thangavelu, S.R., Shetty, C.M. 1971.** Assembly line balancing by zero-one integer programming. *AIIE Transactions*, 3: 61-68.
- Tonge, F.M. 1960.** A heuristic program for assembly line balancing. *Ph.D. Thesis*, Carnegie Institute of Technology.
- Topaloğlu, S., Tunçel, G. 2011.** Bir elektronik firmasında paralel istasyon ve atama kısıtlı montaj hattı dengeleme çalışması. *Endüstri Mühendisliği Yazılımları ve Uygulamaları Kongresi Bildiriler Kitabı*, 30 Eylül, 01-02 Ekim 2011, 109-111, İzmir.
- Tunçel, G., Topaloğlu, S. 2013.** Assembly line balancing with positional constraints, task assignment restrictions and station paralleling: A case in an electronics company. *Computers & Industrial Engineering*, 64(2): 602-609.
- Udomkesmalee, N., Daganzo, C.F. 1989.** Impact of parallel processing on job sequences in flexible assembly systems. *International Journal of Production Research*, 27(1): 73-89.
- Urban, T.L., Chiang, W.C. 2006.** An optimal piecewise-linear program for the u-line balancing problem with stochastic task times. 168(3): 771-782.

Van Assche, F., Herroelen, W.S. 1978. An optimal procedure for the single-model deterministic assembly line balancing problem. *European Journal of Operations Research*, 3: 142-149.

Vilarinho, P.M., Simaria, A.S. 2002. A two-stage heuristic method for balancing mixed-model assembly lines with parallel workstations. *International Journal of Production Research*, 40: 1405-1420.

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

White, W.W. 1961. Comments on a paper by Bowman. *Operations Research*, 9: 274-276.

Yaman, R., Küçükkoç, İ. 2011. A new COMSOAL based heuristic approach to mixed model assembly line balancing with parallel workstations and zoning constraints. *Proceedings of the 31th Turkish National Congress on Operations Research and Industrial Engineering*, Sakarya Üniversitesi, Temmuz 5-7, 219-230.

Zacharia, P.T., Nearchou, A.C. 2013. A meta-heuristic algorithm for the fuzzy assembly line balancing type-e problem. *Computers & Operations Research*, 40(12): 3033–3044.

EKLER

EK 1 Pinto Örnek Problemi

EK 2 Mansoor Örnek Problemi

EK 3 Mitchell Örnek Problemi

EK 4 Buxey Örnek Problemi

EK 5 Kildbridge Örnek Problemi

EK 6 Hahn Örnek Problemi

EK 7 Tonge Örnek Problemi

EK 1 Pinto Örnek Problemi

Görev numarası	Görev süresi (sn)
1	8
2	13
3	62
4	15
5	18
6	15
7	10
8	8
9	33
10	11

Öncelik ilişkileri	
p	i
1	2
1	3
2	5
3	6
4	6
5	7
5	8
6	8
6	9
7	10
9	10

EK 2 Mansoor Örnek Problemi

Görev numarası	Görev süresi (sn)
1	4
2	38
3	45
4	12
5	10
6	8
7	12
8	10
9	2
10	10
11	34

Öncelik ilişkileri	
p	i
1	4
2	4
2	5
3	11
4	6
5	7
6	8
7	9
8	10
9	10
10	11

EK 3 Mitchell Örnek Problemi

Görev numarası	Görev süresi (sn)
1	4
2	3
3	9
4	5
5	9
6	4
7	8
8	7
9	5
10	1
11	3
12	1
13	5
14	3
15	5
16	3
17	13
18	5
19	2
20	3
21	7

EK 3 Mitchell Örnek Problemi (Devam)

Öncelik ilişkileri	
p	i
1	2
1	3
2	21
3	4
4	5
4	21
5	6
5	7
6	8
7	8
7	14
8	9
9	10
9	11
9	12
9	13
10	15
11	15
12	15
13	17
13	18
14	19
15	16
15	18
16	17
17	20
18	19

EK 4 Buxey Örnek Problemi

Görev numarası	Görev süresi (sn)
1	7
2	19
3	15
4	5
5	12
6	10
7	8
8	16
9	2
10	6
11	21
12	10
13	9
14	4
15	14
16	7
17	14
18	17
19	10
20	16
21	1
22	9
23	25
24	14
25	14
26	2
27	10
28	7
29	20

EK 4 Buxey Örnek Problemi (Devam)

Öncelik ilişkileri	
p	i
1	3
1	25
2	6
2	26
3	4
4	5
5	8
5	13
6	8
7	9
7	12
7	25
8	11
8	16
9	10
10	14
10	15
11	17
12	15
13	17
14	16
15	19
16	18
17	20
18	22
19	21
20	23
21	22
22	23
23	24
23	28
24	29
25	29
26	27
27	29
28	29

EK 5 Kildbridge Örnek Problemi

Görev numarası	Görev süresi (sn)	Görev numarası	Görev süresi (sn)
1	1	24	29
2	9	25	26
3	10	26	6
4	10	27	5
5	17	28	24
6	17	29	4
7	13	30	5
8	13	31	7
9	20	32	4
10	20	33	15
11	10	34	3
12	11	35	7
13	6	36	9
14	22	37	4
15	11	38	7
16	19	39	5
17	12	40	4
18	3	41	21
19	7	42	12
20	4	43	6
21	55	44	5
22	14	45	5
23	27		

EK 5 Kildbridge Örnek Problemi (Devam)

Öncelik ilişkileri		Öncelik ilişkileri	
p	i	p	i
1	3	17	27
1	7	18	19
2	4	19	20
2	8	19	33
3	5	20	21
4	6	21	22
5	9	22	28
6	10	23	33
7	9	24	33
7	14	25	26
8	10	26	38
8	14	27	28
9	41	27	33
10	41	28	38
11	13	29	41
12	13	30	41
12	37	31	41
13	14	32	41
13	15	33	34
14	17	33	35
14	25	33	36
14	29	34	38
14	30	35	40
14	31	36	38
14	32	37	43
15	16	38	40
15	18	39	41
15	23	40	41
15	24	41	42
16	19	42	44
17	26	42	45

EK 6 Hahn Örnek Problemi

Görev numarası	Görev süresi (sn)	Görev numarası	Görev süresi (sn)
1	971	28	69
2	142	29	99
3	142	30	70
4	142	31	70
5	103	32	158
6	96	33	191
7	99	34	70
8	1207	35	53
9	160	36	50
10	180	37	125
11	82	38	353
12	60	39	70
13	112	40	128
14	420	41	65
15	1556	42	1775
16	236	43	91
17	259	44	91
18	125	45	113
19	601	46	487
20	80	47	138
21	80	48	80
22	70	49	80
23	89	50	65
24	89	51	40
25	105	52	742
26	330	53	1085
27	132		

EK 6 Hahn Örnek Problemi (Devam)

Öncelik ilişkileri		Öncelik ilişkileri		Öncelik ilişkileri	
p	i	p	i	p	i
1	2	23	31	45	46
1	41	23	33	46	47
1	69	24	25	47	50
1	70	25	26	48	49
2	3	25	27	49	50
3	4	25	28	51	52
3	68	25	29	52	54
4	6	26	35	53	54
4	7	27	35	54	55
5	6	28	35	57	58
5	24	29	35	58	59
5	30	30	31	59	60
6	8	31	32	61	65
7	8	32	35	62	63
8	12	33	34	63	64
9	10	34	35	64	65
10	11	35	36	64	66
11	12	35	44	64	67
12	13	35	48	3	68
12	14	35	51	1	69
13	23	35	53	1	70
14	23	35	56		
15	16	35	60		
16	17	35	61		
16	18	35	62		
17	19	36	37		
18	19	37	38		
19	20	38	39		
19	22	39	40		
19	57	40	42		
20	21	41	42		
21	23	42	43		
22	23	43	50		
23	25	44	45		

EK 7 Tonge Örnek Problemi

Görev numarası	Görev süresi (sn)	Görev numarası	Görev süresi (sn)
1	17	36	40
2	66	37	2
3	54	38	1
4	52	39	3
5	6	40	13
6	88	41	16
7	21	42	25
8	128	43	21
9	68	44	43
10	70	45	30
11	85	46	83
12	21	47	89
13	134	48	56
14	135	49	59
15	94	50	43
16	90	51	11
17	50	52	26
18	143	53	44
19	19	54	121
20	54	55	38
21	50	56	68
22	40	57	22
23	73	58	7
24	12	59	16
25	152	60	32
26	42	61	25
27	45	62	27
28	74	63	156
29	26	64	28
30	11	65	15
31	31	66	26
32	50	67	18
33	102	68	72
34	46	69	23
35	35	70	27

EK 7 Tonge Örnek Problemi (Devam)

Öncelik ilişkileri		Öncelik ilişkileri		Öncelik ilişkileri	
p	i	p	i	p	i
1	2	23	31	45	46
1	41	23	33	46	47
1	69	24	25	47	50
1	70	25	26	48	49
2	3	25	27	49	50
3	4	25	28	51	52
3	68	25	29	52	54
4	6	26	35	53	54
4	7	27	35	54	55
5	6	28	35	57	58
5	24	29	35	58	59
5	30	30	31	59	60
6	8	31	32	61	65
7	8	32	35	62	63
8	12	33	34	63	64
9	10	34	35	64	65
10	11	35	36	64	66
11	12	35	44	64	67
12	13	35	48	3	68
12	14	35	51	1	69
13	23	35	53	1	70
14	23	35	56		
15	16	35	60		
16	17	35	61		
16	18	35	62		
17	19	36	37		
18	19	37	38		
19	20	38	39		
19	22	39	40		
19	57	40	42		
20	21	41	42		
21	23	42	43		
22	23	43	50		
23	25	44	45		

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hakan ALTUNAY
Doğum Yeri ve Tarihi : Amasya, 15.07.1988
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Bursa Ulubatlı Hasan Anadolu Lisesi, 2007
Lisans : Kırıkkale Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği,
2012
Lisans : Kırıkkale Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Müh.
2013
Yüksek Lisans : Kırıkkale Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği,
2015

Çalıştığı Kurum ve Yıl : Fırat Üniversitesi, (2013-...)
İletişim (e-posta) : haltunay@firat.edu.tr
Yayınları :

Altunay H., Bulut K. 2012. ÖSYM tarafından uygulanan sınavlar için görevli atama probleminin 0-1 tamsayılı programlama ile optimizasyonu. Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği 32. Ulusal Kongresi, 20-22 Haziran 2012, Doğuş Üniversitesi, İstanbul.

Altunay, H., Bulut K. 2013. Veri Zarflama Analizi ile Türkiye'deki illerin kültürel açıdan değerlendirilmesi. 8th International Statistics Congress, 28 - 30 Ekim 2013, Antalya, Turkey.

Altunay, H., Bulut K. 2014. Uludağ Üniversitesi meslek yüksekokullarının etkinliklerinin Veri Zarflama Analizi ile değerlendirilmesi. 1st International Vocational Educational Training Symposium Conference, 11th to 13th September 2014, Bursa, Turkey.

Altunay, H., Bulut K., Balo F. 2014. Üniversitede ders seçim sürecinin Bulanık AHP yöntemi ile analizi ve bir uygulama. 15th International Conference on Econometrics, Operations Research and Statistics, 22-25 May 2014, Isparta, Turkey.

Altunay, O., Altunay, H., Bulut K. 2014. Yüksek öğrenim kurumlarındaki öğrencilerin başarısını etkileyen faktörlerin önceliklendirilmesi. 1st International Vocational Educational Training Symposium Conference, 11th to 13th September 2014, Bursa, Turkey.

Altunay, H. 2015. Performance evaluation of academic departments with data envelopment analysis. 9th International Statistics Congress, 28 Ekim - 1 Kasım 2015, Antalya, Turkey.

Altunay H. 2015. A mixed integer linear programming model for a capacitated vehicle routing problem. 16th International Conference on Econometrics, Operations Research and Statistics, 07-12 Mayıs 2015, Edirne, Turkey.

Altunay H., Bulut K. 2015. Hücresel imalat sistemlerinde hücre tasarımı için hedef programlama yaklaşımı. Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği 35. Ulusal Kongresi, 9-11 Eylül 2015, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.

Altunay H., Canpolat O. 2015. Using GIS and AHP methods for wastewater treatment plant site selection. 16th International Conference on Econometrics, Operations Research and Statistics, 07-12 Mayıs 2015, Edirne, Turkey.

Altunay, H., Eren T. 2015. A mixed integer programming model to examination timetabling problem. 9th International Statistics Congress, 28 Ekim - 1 Kasım 2015, Antalya, Turkey.

Altunay H., Eren T., Çetin S. 2015. A literature review for course scheduling problem. 16th International Conference on Econometrics, Operations Research and Statistics, 07-12 Mayıs 2015, Edirne, Turkey.

Altunay H., Eren T., Çetin S. 2015. Solving examination timetabling problem using graph coloring method. 16th International Conference on Econometrics, Operations Research and Statistics, 07-12 Mayıs 2015, Edirne, Turkey.

Altunay, O., Altunay H. 2015. Statistical process control: A case study. 9th International Statistics Congress, 28 Ekim - 1 Kasım 2015, Antalya, Turkey.

Altunay, H. 2016. A mathematical programming model for the vehicle routing problem and a case study. International Conference on Mathematics and Mathematics Education (ICMME-2016), 12-14 May 2016, Fırat University, Elazığ, Turkey.

Altunay, H., Eren, T. 2016. A 0-1 integer programming model for the course scheduling problem and a case study. *Uludağ University Journal of the Faculty of Engineering*, 21 (2): 473-488.

Altunay, H., Eren, T. 2016. A new mathematical model for university examination timetabling problem: A case study. International Conference on Mathematics and Mathematics Education (ICMME-2016), 12-14 May 2016. Fırat University, Elazığ, Turkey.

Altunay, H., Özmutlu, H.C. 2016. Altunay, H. Özmutlu, H.C. Montaj hattında işgücü atama ve dengeleme problemi için tamsayı programlama yaklaşımı. 17th International Conference on Econometrics, Operations Research and Statistics, 2-4 June 2016, Cumhuriyet University, Sivas, Turkey.

Altunay, H. Özmutlu, H.C. 2016. Balancing of assembly lines with mathematical programming method. International Conference on Mathematics and Mathematics Education (ICMME-2016), 12-14 May 2016, Fırat University, Elazığ, Turkey.

Altunay, H., Özmutlu, H.C., Özmutlu, S. 2016. A new mathematical model for assembly line balancing with station paralleling. 28th European Conference on Operational Research, 3-6 July 2016, Poznan University of Technology, Poznan, Poland.

Altunay, H., Özmutlu, H.C., Özmutlu, S. 2016. Çoklu görev atamalı montaj hattı dengeleme problemi için yeni bir matematiksel model önerisi. 17th International Symposium on Econometrics, Operations Research and Statistics, 2-4 June 2016, Sivas, Turkey.

Altunay, H., Eren, T. 2017. A literature review for course scheduling problem. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 23 (1): 55-70.

Altunay, H., Özmutlu, H.C., Özmutlu, S. 2017. A new mathematical model for assembly line balancing problem with task paralleling assignment approach. *Journal of Economics and Administrative Sciences* (Kabul Tarihi: 21.12.2016).

Balo F., Altunay, H., Bulut K. 2014. Bina ısı yalıtımında kullanılan en uygun malzemenin seçiminde AHP yönteminin uygulanması. 15th International Conference on Econometrics, Operations Research and Statistics, 22-25 May 2014, Isparta, Turkey.

Boşal Ö., Bulut K., Demirhan C. Altunay H. 2014. Katı atık depo yeri seçim problemi için bir karar destek sistemi. Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği 34. Ulusal Kongresi, 25-27 Haziran 2014, Uludağ Üniversitesi, Bursa.

Bulut K., Altunay H. 2014. Yenilenebilir enerji kaynağı alternatiflerinin TOPSIS yöntemi ile değerlendirilmesi: Türkiye örneği. 15th International Conference on Econometrics, Operations Research and Statistics 22-25 May 2014, Isparta, Turkey.

Bulut K., Altunay H. 2014. Yenilenebilir enerji kaynaklarının çevresel kriterler açısından değerlendirilmesi. Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği 34. Ulusal Kongresi, 25-27 Haziran 2014, Uludağ Üniversitesi, Bursa.

Bulut K., Altunay H. 2015. İnsani yardım lojistiğinde dağıtım ağı tasarımı. Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği 35. Ulusal Kongresi, 9-11 Eylül 2015, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.

Bulut, K., Altunay, H. 2016. Value stream mapping: a case study of furniture industry. *International Journal of Engineering Research and Development*, 8 (1): 48-55.

Canpolat O., Altunay H. 2015. Simulation technique for determining the optimal traffic light time. 16th International Conference on Econometrics, Operations Research and Statistics, 07-12 Mayıs 2015, Edirne, Turkey.

Demirhan C., Bulut K., Boşal Ö., Altunay H. 2014. Katı atık taşıma probleminin doğrusal programlama ile modellenmesi. Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği 34. Ulusal Kongresi, 25-27 Haziran 2014, Uludağ Üniversitesi, Bursa.

Faaliyetler

:

Oturum Başkanlığı, Multidisciplinary Applications of Global Optimization / Stream: Global Optimization, 28th European Conference on Operational Research, 3-6 July 2016, Poznan University of Technology, Poznan, Poland.

Düzenleme Kurulu, International Conference on Advances and Innovations in Engineering (ICAIE), 10-12 May 2017, Elazığ, Turkey.