

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



KARIŞIK MODELLİ MONTAJ HATLARINDA HAT ETKİNLİĞİNİN
MAKSİMİZASYONU VE BİR UYGULAMA

DAMLA ÇAMLI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri: Doç. Dr. İbrahim KÜÇÜKKOÇ (Tez Danışmanı)
Prof. Dr. Ramazan YAMAN
Dr. Öğr. Üyesi M.A. Beyazıt OCAKTAN

BALIKESİR, ŞUBAT- 2024

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Karışık Modelli Montaj Hatlarında Hat Etkinliğinin Maksimizasyonu ve Bir Uygulama**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Damla ÇAMLI
(imza)

ÖZET

**KARIŞIK MODELLİ MONTAJ HATLARINDA HAT ETKİNLİĞİNİN
MAKSİMİZASYONU VE BİR UYGULAMA
YÜKSEK LİSANS TEZİ
DAMLA ÇAMLI
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. İBRAHİM KÜÇÜKKOÇ)

BALIKESİR, ŞUBAT - 2024

Son yıllarda gelişen pazar ve özelleşen taleplerden dolayı firmalar arasında artan bir rekabet söz konusudur. Karışık modelli montaj hatları, basit montaj hatlarına kıyasla özelleşen müşteri taleplerine daha iyi cevap verebilmektedir. Literatürde montaj hattı dengeleme ile ilgili birçok çalışma yapılmasına rağmen karışık modelli tip-E montaj hattı dengeleme problemi ile ilgili yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Tip-E problemlerde diğerlerinden farklı olarak amaç çevrim zamanını ve istasyon sayısını eş zamanlı olarak en küçükleyerek maksimum hat etkinliği elde etmektir. Bu çalışmada çözüm olarak karma tamsayılı matematiksel model önerilmektedir. Aynı zamanda, büyük boyutlu problemlerin çözümü için sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen modelde, karar vericiye esneklik sağlaması açısından çevrim zamanına C_{min} ve C_{max} olmak üzere alt ve üst sınır değerleri verilebilir. Ayrıca, gerçek hayat problemlerinde hat yeniden dengelenirken, işlerin tamamen başka istasyonlara atanması ve bunun getireceği büyük değişiklikler istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle, montaj hattı yeniden dengeleme problemlerinde kullanılmak üzere geliştirilen modellere yeni bir kısıt grubu eklenerek değişiklik sayısı sınırlandırılmıştır. Yeniden dengeleme problemine ek olarak, çoklu operatör durumu da probleme entegre edilmiş ve bu sayede kullanıcının hat üzerinde kullanabileceği operatör sayısını belirleme ve hat etkinliğini artırma avantajı sağlanmıştır. Geliştirilen model, farklı parametreler ile çalıştırılarak hat etkinliğinin nasıl değiştiği ve değişiklik sayısına karşı duyarlılığı gözlemlenmiştir. Geliştirilen modelin performansı farklı boyutlardaki veri setleri ve vaka çalışması ile test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre büyük boyutlu problemler dahil ele alınan bütün problemlerde sezgisel algoritma ile makul sürede %97'nin üzerinde hat etkinliği sağlanabilmektedir. Önerilen model, karışık modelli tip-E montaj hattı dengeleme problemlerinde yeniden dengeleme yaparken kullanılabilir ve karar vericiye farklı koşullar altında alternatif çözümler sunma yeteneğine sahiptir.

ANAHTAR KELİMELER: Karışık modelli montaj hattı, yeniden dengeleme, hat etkinliği, optimizasyon, tip-E, karışık tamsayılı programlama, çoklu operatör
Bilim Kod / Kodları : 90604 Sayfa Sayısı : 120

ABSTRACT

MAXIMIZATION OF LINE EFFICIENCY IN MIXED-MODEL ASSEMBLY LINES AND A CASE STUDY

MSC THESIS

DAMLA ÇAMLI

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
INDUSTRIAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. İBRAHİM KÜÇÜKKOÇ)

BALIKESİR, FEBRUARY - 2023

In recent years, due to the evolving market and increasing specialized demands, there is a notable surge in competition among companies. Complex model assembly lines, as compared to simple assembly lines, are better equipped to respond to customized customer demands. While numerous studies have been conducted on assembly line balancing in the literature, research specifically addressing the type-E mixed-model assembly line balancing problem is quite limited. In type-E problems, unlike others, the goal is to minimize both cycle time and the number of stations simultaneously, aiming for maximum line efficiency. This study proposes a solution in the form of a mixed-integer mathematical model. Also, a heuristic algorithm is developed for solving large-scale problems. In the developed model, lower and upper limit values for cycle time, denoted as C_{min} and C_{max} are provided to offer flexibility to the decision-maker. Additionally, in real-life scenarios, when rebalancing the line, completely reassigning jobs to different stations and the significant changes it brings about are undesirable. Therefore, a new constraint group is added to the model for line rebalancing problems, limiting the number of changes. In addition to the rebalancing problem, the multiple operator situation is integrated into the problem, providing the advantage of determining the number of operators that can be used on the line and increasing line efficiency. The performance of the developed model is tested with different parameters, observing how line efficiency changes and its sensitivity to the number of changes. The proposed model that has been tested with datasets of varying dimensions and case study is capable of rebalancing type-E mixed-model assembly lines, offering the decision-maker alternative solutions under different conditions. According to the results obtained, the heuristic algorithm can achieve over 97% line efficiency in reasonable time for all the problems considered, including large scale problems.

KEYWORDS: Mixed-model assembly line, rebalancing, line efficiency, optimization, type-E, mixed-integer programming, multimanned operation.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	x
KISALTMA LİSTESİ	xi
ÖNSÖZ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Önemi	4
1.2 Çalışmanın Amacı ve Özgün Katkısı	4
1.3 Bölüm Sonu Değerlendirmesi	5
2. TERMİNOLOJİ VE LİTERATÜR TARAMASI	6
2.1 Montaj Hattı Dengeleme Problemlerindeki Tanımlar	6
2.2 Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinin Sınıflandırılması	10
2.3 Hat Yerleşimi	12
2.4 Karışık Modelli Montaj Hattı Dengeleme Üzerine Literatür Taraması	13
2.5 Tip-E Montaj Hattı Dengeleme Problemi Üzerine Çalışmalar	20
2.6 Yeniden Dengeleme (Re-balancing) Üzerine Çalışmalar	26
2.7 Bölüm Sonu Değerlendirmesi	27
3. ÖNERİLEN MATEMATİKSEL MODEL	28
3.1 MINLP	28
3.1.1 Notasyon	29
3.1.2 Matematiksel Model	30
3.2 rMILP	31
3.3 Sayısal Örnek	34
3.3.1 P-10 Veri Seti/1 Operatör	34
3.3.2 P-10 Veri Seti/2 Operatör	37
3.4 Bölüm Sonu Değerlendirmesi	39
4. DENEYSEL TESTLER	40
4.1 P-19 Thomopoulos Test Problemi	41
4.1.1 P-19 Veri Seti/ 1 Operatör	42
4.1.2 P-19 Veri Seti/ 2 Operatör	45
4.2 P-28 Heskia Test Problemi	49
4.2.1 P-28 Veri Seti/ 1 Operatör	51
4.2.2 P-28 Veri Seti/ 2 Operatör	54
4.3 P-32 Lutz-1 Test Problemi	58
4.3.1 P-32 Veri Seti/ 1 Operatör	59
4.3.2 P-32 Veri Seti/2 Operatör	63
4.4 P-45 Kilbrid Test Problemi	67
4.4.1 P-45 Veri Seti/1 Operatör	68
4.4.2 P-45 Veri Seti/ 2 Operatör	72
4.5 Bölüm Sonu Değerlendirmesi	76

5. PERFORMANS ANALİZİ VE VAKA ÇALIŞMASI	77
5.1 Büyük Boyutlu Veri Setleri Kullanılarak Modellerin Performans Analizi	77
5.2 Vaka Çalışması	81
5.3 P-110 Lego Test Problemi	83
5.3.1 P-110 Veri Seti/ 1 Operatör.....	84
5.3.2 P-110 Veri Seti/ 2 Operatör.....	88
5.4 Bölüm Sonu Değerlendirmesi	92
6. TARTIŞMA VE SONUÇ	93
7. KAYNAKLAR	96
EKLER	105
EK A: Kullanılan Veri Setleri	105
ÖZGEÇMİŞ	



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Üretim sistemleri sınıflandırması.....	1
Şekil 2.1: Öncelik ilişkileri diyagramı.	6
Şekil 2.2: İki farklı ürüne ait öncelik ilişkileri diyagramının (a ve b) birleştirilmesi (c).....	7
Şekil 2.3: Denge kaybı olan bir üretim hattı örneği	8
Şekil 2.4: Tam dengeli montaj hattı örneği	8
Şekil 2.5: Montaj hattı dengeleme probleminin sınıflandırılması	10
Şekil 2.6: Tek modellenli montaj hattı.....	11
Şekil 2.7: Çok modellenli montaj hattı.	11
Şekil 2.8: Karışık modellenli montaj hattı.	11
Şekil 2.9: Düz montaj hattı dengeleme	12
Şekil 2.10: U tipi hat yerleşim örneği	12
Şekil 3.1: Geliştirilen algoritmaya ait akış diyagramı.....	33
Şekil 3.2: P-10 veri seti öncelik ilişkileri diyagramı.....	34
Şekil 3.3: P-10 veri seti $RP=1$ için mevcut durum.	36
Şekil 3.4: P-10 veri seti $RP=1$ için yeniden dengelenmiş montaj hattı.	36
Şekil 3.5: P-10 veri seti $RP=2$ için mevcut durum.	38
Şekil 3.6: P-10 veri seti $RP=2$ için yeniden dengelenmiş montaj hattı.	39
Şekil 4.1: P-19 thomopoulos veri seti öncelik ilişkileri diyagramı.....	41
Şekil 4.2: $RP=1$ için B' 'ye göre istasyon sayısı ve hat etkinliği değişimi.	42
Şekil 4.3: $RP=1$ için B' 'ye göre çevrim zamanı ve hat etkinliği değişimi.	42
Şekil 4.4: P-19 thomopoulos veri seti $RP=1$ için mevcut durum.	43
Şekil 4.5: P-19 thomopoulos veri seti $RP=1$ rMILP algoritması en iyi çözüm.	44
Şekil 4.6: P-19 thomopoulos veri seti $RP=1$ için mevcut durumda istasyonların boş zamanı.....	45
Şekil 4.7: P-19 thomopoulos veri seti $RP=1$ için rMILP algoritması en iyi çözüm boş zamanı.....	45
Şekil 4.8: P-19 thomopoulos veri seti $RP=2$ için B' 'ye göre istasyon sayısı ve hat etkinliği değişimi.....	46
Şekil 4.9: P-19 thomopoulos veri seti için $RP=2$ için B' 'ye göre çevrim zamanı ve hat etkinliği değişimi.	46
Şekil 4.10: P-19 thomopoulos veri seti $RP=2$ için mevcut montaj hattı.....	47
Şekil 4.11: P-19 thomopoulos veri seti $RP=2$ için rMILP algoritması en iyi çözüm.	48
Şekil 4.12: P-19 thomopoulos veri seti $RP=2$ için mevcut durumda istasyonların boş zamanı.....	49
Şekil 4.13: P-19 thomopoulos veri seti $RP=2$ için yeniden dengelenmiş durumda istasyonların boş zamanı.....	49
Şekil 4.14: P-28 heskia veri seti öncelik ilişkileri diyagramı.....	50
Şekil 4.15: P-28 heskia veri seti $RP=1$ için B' 'ye göre istasyon sayısı ve hat etkinliği değişimi.....	51
Şekil 4.16: P-28 heskia veri seti $RP=1$ için B' 'ye göre çevrim zamanı ve hat etkinliği değişimi.....	51
Şekil 4.17: P-28 heskia veri seti $RP=1$ mevcut montaj hattı.	52
Şekil 4.18: P-28 heskia veri seti $RP=1$ için yeniden dengelenmiş montaj hattı.	53
Şekil 4.19: P-28 heskia veri seti $RP=1$ için mevcut durumda istasyonların boş zamanı... ..	54
Şekil 4.20: P-28 heskia veri seti $RP=1$ için optimal durumda istasyonların boş zamanı. ..	54

Şekil 4.21: P-28 heskia veri seti $RP=2$ için B' 'ye göre istasyon sayısı ve hat etkinliği değişimi.....	55
Şekil 4.22: P-28 heskia veri seti $RP=2$ için B' 'ye göre çevrim zamanı ve hat etkinliği değişimi.....	55
Şekil 4.23: P-28 heskia veri seti $RP=2$ için mevcut montaj hattı.	56
Şekil 4.24: P-28 heskia veri seti $RP=2$ için yeniden dengelenmiş montaj hattı.	57
Şekil 4.25: P-28 heskia veri seti $RP=2$ için mevcut durumda istasyonların boş zamanı... ..	58
Şekil 4.26: P-28 heskia veri seti $RP=2$ için optimal durumda istasyonların boş zamanı. ..	58
Şekil 4.27: P-32 lutz-1 veri seti öncelik ilişkileri diyagramı.	59
Şekil 4.28: P-32 lutz-1 veri seti $RP=1$ için B' 'ye göre istasyon sayısı ve hat etkinliği değişimi.....	60
Şekil 4.29: P-32 lutz-1 veri seti $RP=1$ için B' 'ye göre istasyon sayısı ve çevrim zamanı değişimi.....	60
Şekil 4.30: P-32 lutz-1 veri seti $RP=1$ için mevcut montaj hattı.	61
Şekil 4.31: P-32 lutz-1 veri seti $RP=1$ için yeniden dengelenmiş montaj hattı.	62
Şekil 4.32: P-32 lutz-1 veri seti $RP=1$ için mevcut durumda istasyonların boş zamanı....	63
Şekil 4.33: P-32 lutz-1 veri seti $RP=1$ için optimal durumda istasyonların boş zamanı. ...	63
Şekil 4.34: P-32 lutz-1 veri seti $RP=2$ için B' 'ye göre istasyon sayısı ve hat etkinliği değişimi.....	64
Şekil 4.35: P-32 lutz-1 veri seti $RP=2$ için B' 'ye göre çevrim zamanı ve hat etkinliği değişimi.....	64
Şekil 4.36: P-32 lutz-1 $RP=2$ için mevcut montaj hattı.	65
Şekil 4.37: P-32 lutz-1 $RP=2$ için yeniden dengelenmiş montaj hattı.	66
Şekil 4.38: P-32 lutz-1 $RP=2$ için mevcut durumda istasyonların boş zamanı.	66
Şekil 4.39: P-32 lutz-1 $RP=2$ için optimal durumda istasyonların boş zamanı.	67
Şekil 4.40: P-45 kilbrid veri seti öncelik ilişkileri diyagramı.	67
Şekil 4.41: P-45 kilbrid veri seti $RP=1$ için B' 'ye göre istasyon sayısı ve çevrim zamanı değişimi.....	68
Şekil 4.42: P-45 kilbrid veri seti $RP=1$ için B' 'ye göre istasyon sayısı ve çevrim zamanı değişimi.....	69
Şekil 4.43: P-45 kilbrid veri seti $RP=1$ için mevcut montaj hattı.....	70
Şekil 4.44: P-45 kilbrid veri seti $RP=1$ için yeniden dengelenmiş montaj hattı.....	70
Şekil 4.45: P-45 kilbrid veri seti $RP=1$ için mevcut durumda istasyonların boş zamanı. ..	71
Şekil 4.46: P-45 kilbrid veri seti $RP=1$ için optimal durumda istasyonların boş zamanı... ..	72
Şekil 4.47: P-45 kilbrid veri seti $RP=2$ için B' 'ye göre istasyon sayısı ve hat etkinliği değişimi.....	72
Şekil 4.48: P-45 kilbrid veri seti $RP=2$ için B' 'ye göre çevrim zamanı ve hat etkinliği değişimi.....	73
Şekil 4.49: P-45 kilbrid veri seti $RP=2$ için mevcut montaj hattı.....	74
Şekil 4.50: P-45 kilbrid veri seti $RP=2$ için yeniden dengelenmiş montaj hattı.....	74
Şekil 4.51: P-45 kilbrid veri seti $RP=2$ için mevcut durumda istasyonların boş zamanı. ..	75
Şekil 4.52: P-45 kilbrid veri seti $RP=2$ için optimal durumda istasyonların boş zamanı... ..	75
Şekil 5.1: Lego araç model 1 son montaj halinin a) üstten b) soldan c) sağdan d)arkadan görünümü.....	82
Şekil 5.2: Lego araç model 2 son montaj halinin a) üstten b) soldan c) sağdan d) arkadan görünümü.....	82
Şekil 5.3: P-110 veri seti öncelik ilişkileri diyagramı.....	83
Şekil 5.4: $RP=1$ için B' 'ye göre çevrim zamanı ve hat etkinliği değişimi.....	84
Şekil 5.5: $RP=1$ için B' 'ye göre istasyon sayısı ve hat etkinliği değişimi.....	85
Şekil 5.6: P-110 lego veri seti $RP=1$ için mevcut durum.	86

Şekil 5.7: P-110 lego veri seti $RP=1$ için rMILP optimal durum.	87
Şekil 5.8: P-110 lego veri seti $RP=1$ için mevcut durumda istasyonların boş zamanı.	88
Şekil 5.9: P-110 lego veri seti $RP=1$ için yeniden dengelenmiş durumda istasyonların boş zamanı.	88
Şekil 5.10: $RP=2$ için B'ye göre çevrim zamanı ve hat etkinliği değişimi.	89
Şekil 5.11: $RP=2$ için B'ye göre istasyon sayısı ve hat etkinliği değişimi.	89
Şekil 5.12: P-110 lego veri seti $RP=2$ için mevcut durum.	90
Şekil 5.13: P-110 lego veri seti $RP=2$ için rMILP algoritması en iyi çözüm.	91
Şekil 5.14: P-110 lego veri seti $RP=2$ için mevcut durumda istasyonların boş zamanı.	91
Şekil 5.15: P-110 lego veri seti $RP=2$ için rMILP algoritması en iyi çözüm istasyonların boş zamanı.	92



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1: Montaj hattı dengeleme problemlerinin amaca göre sınıflandırılması	2
Tablo 2.1: Karışık modelli montaj hatlarında yapılan başlıca çalışmalar.	18
Tablo 2.2: Tip-E problemine genel bakış.	25
Tablo 3.1: Matematiksel model notasyonu.....	29
Tablo 3.2: rMILP tarafından kullanılan değişkenler.	32
Tablo 3.3: P-10 veri seti $RP=1$ ve $RP=2$ için kullanılan parametreler.	35
Tablo 3.4: P-10 veri seti $RP=1$ için model sonuçları.	35
Tablo 3.5: P-10 veri seti $RP=2$ için model sonuçları.	38
Tablo 4.1: P-19 thomopoulos veri seti $RP=1$ ve $RP=2$ için kullanılan parametreler.	42
Tablo 4.2: P-19 thomopoulos veri seti $RP=1$ için model sonuçları.	43
Tablo 4.3: P-19 thomopoulos veri seti $RP=2$ için model sonuçları.....	47
Tablo 4.4: P-28 heskia veri seti $RP=1$ ve $RP=2$ için kullanılan parametreler.	50
Tablo 4.5: P-28 heskia veri seti $RP=1$ için model sonuçları.	52
Tablo 4.6: P-28 heskia veri seti $RP=2$ için model sonuçları.	56
Tablo 4.7: P-32 lutz-1 veri seti $RP=1$ ve $RP=2$ için kullanılan parametreler.....	59
Tablo 4.8: P-32 lutz-1 veri seti $RP=1$ için model sonuçları.....	61
Tablo 4.9: P-32 lutz-1 $RP=2$ için model sonuçları.....	65
Tablo 4.10: P-45 kilbrid veri seti $RP=1$ ve $RP=2$ için kullanılan parametreler.....	68
Tablo 4.11: P-45 kilbrid veri seti $RP=1$ için model sonuçları.....	69
Tablo 4.12: P-45 kilbrid veri seti $RP=2$ için model sonuçları.....	73
Tablo 5.1: $RP=1$ için veri setlerinde kullanılan parametreler.....	77
Tablo 5.2: $RP=1$ için MINLP ve rMILP modellerinin karşılaştırılması.....	78
Tablo 5.3: $RP=2$ için veri setlerinde kullanılan parametreler.....	79
Tablo 5.4: $RP=2$ için farklı veri setleri için MINLP ve rMILP modellerinin karşılaştırılması.....	80
Tablo 5.5: P-110 lego test problemi veri seti için $RP=1$ ve $RP=2$ kullanılan parametreler.	84
Tablo 5.6: P-110 lego vaka çalışması veri seti $RP=1$ için model sonuçları.....	85
Tablo 5.7: P-110 lego vaka çalışması veri seti $RP=2$ için model sonuçları.....	90
Tablo A.1: P-10 veri seti görev süreleri	102
Tablo A.2: P-10 veri seti talep oranları	102
Tablo A.3: P-19 veri seti görev süreleri	102
Tablo A.4: P-19 veri seti talep oranları	103
Tablo A.5: P-28 veri seti görev süreleri	103
Tablo A.6: P-28 veri seti talep oranları	104
Tablo A.7: P-32 veri seti görev süreleri	104
Tablo A.8: P-32 veri seti talep oranları	105
Tablo A.9: P-45 veri seti görev süreleri	105
Tablo A.10: P-45 veri seti talep oranları	106
Tablo A.11: P-70 veri seti görev süreleri	107
Tablo A.12: P-70 veri seti talep oranları	108
Tablo A.13: P-83 veri seti görev süreleri	108
Tablo A.14: P-83 veri seti talep oranları	109
Tablo A.15: P-89 veri seti görev süreleri	109
Tablo A.16: P-89 veri seti talep oranları	110

Tablo A.17: P-94 veri seti görev süreleri	110
Tablo A.18: P-94 veri seti talep oranları	110
Tablo A.19: P-111 veri seti görev süreleri	111
Tablo A.20: P-111 veri seti talep oranları.....	112
Tablo A.21: P-148 veri seti görev süreleri	113
Tablo A.22: P-148 veri seti talep oranları	114
Tablo A.23: P-110 veri seti görev süreleri	115
Tablo A.24: P-110 veri seti talep oranları	117



SEMBOL LİSTESİ

$C_{artış}$: Adım büyüklüğü
C_{best}	: En iyi çevrim süresi
C_{max}	: Maksimum çevrim süresi
C_{min}	: Minimum çevrim süresi
F_i	: Mevcut durum ve yeniden dengelenmiş durum arasındaki fark
K_{best}	: En iyi çözümdeki istasyon sayısı
K_{max}	: Maksimum istasyon sayısı
K_{min}	: Minimum istasyon sayısı
M_{ik}	: Mevcut durum
$Model_{best}$: En iyi çözüm
WT_k	: k istasyonunun süresi
WT_{max}	: k istasyonunun sürelerinin en büyüğü
X_{ik}	: i görevi k istasyonuna atanmışsa 1 atanmamışsa 0 değişkeni
Z_k	: k istasyonu açık ise 1 değilse 0 değişkeni

KISALTMA LİSTESİ

B-MHD	: Basit montaj hattı dengeleme
K-MHD	: Karışık modelli montaj hattı dengeleme
LE	: Hat Etkinliği
MHD	: Montaj hattı dengeleme
MILP	: Mixed integer linear programming
MINLP	: Mixed integer nonlinear programming
OP	: Toplam operatör sayısı
rMILP	: İteratif karışık tamsayılı doğrusal programlama
RP	: İzin verilen operatör sayısı
SI	: Düzensizlik indeksi



ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim boyunca bana bilgileriyle ışık tutan, her zaman destekleyici olup bir adım daha ilerlememi sağlayan sayın danışman hocam Doç. Dr. İbrahim Küçükkoç'a teşekkür ederim. Beni her konuda destekleyen, bana inanan ve hep yanımda olan başta annem Birsen Çamlı olmak üzere, canım abim Anıl Çamlı'ya, babam Coşkun Çamlı'ya ve minik yeğenim Aslan Çamlı'ya teşekkür ederim.

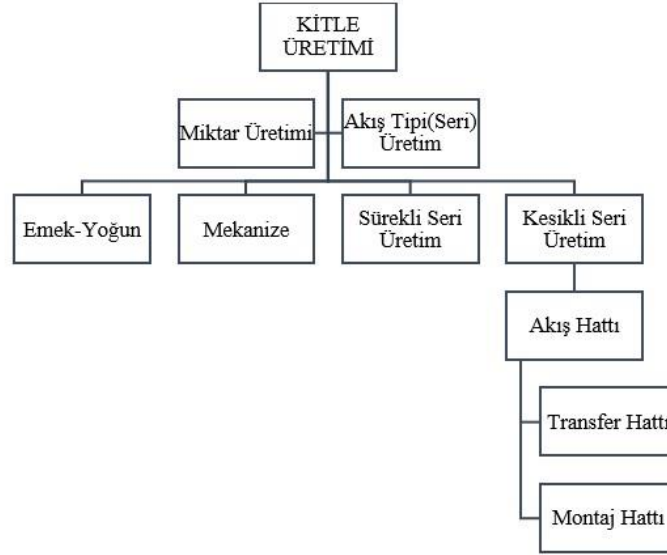
Balıkesir, 2024

Damla ÇAMLI



1. GİRİŞ

Üretim süreçleri tarih boyunca önemli değişimlere uğramıştır, en önemli gelişmelerden biri de montaj hattının icadıdır. Sanayi devrimi, 18. ve 19. yüzyıllarda üretim sistemlerinin evrimine yol açmıştır ve kitle üretiminin temelini oluşturmuştur. Kitle üretimi, miktar üretimi ve akış tipi üretim olarak iki ana kategoriye ayrılır. Miktar üretimi, genellikle daha basit ve büyük ölçekli ürünlerin üretimini ifade ederken, ürünlerin karmaşıklığı arttıkça akış tipi üretime geçilir. Akış tipi üretim, kesikli üretim ve seri üretim olmak üzere ikiye ayrılır. Seri üretimde, düzenli bir üretim akışı bulunur. Kesikli üretimde ise üretim ürüne olan talebe göre planlanmaktadır. Kesikli üretimde ise üretim ürüne olan talebe göre planlanmaktadır. Montaj hatları, akış tipi üretim sistemlerinin kesikli üretim grubunun bir alt modelidir [1].



Şekil 1.1: Üretim sistemleri sınıflandırması [2].

Günümüzde firmalar arasındaki rekabet artışı ve açık pazar nedeniyle ürünlerin daha küçük parçalar halinde, özelleştirilmiş taleplere hitap edecek şekilde daha hızlı ve daha az maliyetli bir biçimde üretilmesi gerekmektedir. Bu gibi sebepler üretimde montaj hattına olan ihtiyacı arttırmaktadır. Henry Ford ve ekip arkadaşları otomobil üretimi üzerine ilk montaj hattını Ekim 1913 yılında uygulamaya koymuşlardır. Henry Ford, işçilerin etrafına yerleştiği bir yürüyen bant sistemi geliştirmiştir. Yürüyen bant sistemi, işçilerin yarı mamul durumundaki otomobil parçalarının yanına gitmek yerine, parçaların iş istasyonlarına belirli bir hızla gelmesini sağlamıştır. Ford bu sistemi geliştirerek ünlü model T'yi üretmiştir. Henry Ford

tarafından yapılan bu uygulama ile otomotiv sektöründe adeta yeni bir çağ açılmıştır. Bu uygulama sayesinde iş gücü etkin bir şekilde kullanılmış ve birim zamana düşen üretim miktarı artmıştır. Montaj hattı, ürünün veya ürünlerin üretilmesi için işlerin gerçekleştiği bir taşıma mekanizması ile birbirine bağlanan iş istasyonlarından oluşmaktadır [3].

Montaj hattının üreticilere birçok faydası olmaktadır. Bu faydalar, genel olarak şu şekilde özetlenebilir:

- Atıl zamanları minimize ederek maliyeti düşürmektedir ve üretimdeki kaynakların etkin bir biçimde kullanılmasını sağlamaktadır.
- İş istasyon sayısını ve/veya çevrim süresini en aza indirerek sistemin etkinliğini ve birim zamandaki üretimini arttırmaktadır.
- Düzgün bir iş dağılımı yaparak hem sistemin etkinliğini arttırmaktadır hem de ergonomik koşulları sağlamaktadır.
- Siparişin termin zamanında karşılanmasını sağlamaktadır.

Montaj hattı dengeleme problemini etkileyen temel öğeler ve problemin kısıtları yapılan çalışmanın ilerleyen bölümünde detaylı bir şekilde açıklanacaktır. Montaj hattı dengeleme (MHD) problemleri amaçlarına göre 4'e ayrılmaktadır:

- Tip-1 MHD: Çevrim süresinin belli olduğu durumda istasyon sayısını minimize etmektir.
- Tip-2 MHD: İstasyon sayısının belli olduğu durumda çevrim süresini minimize etmektir.
- Tip-E MHD: Hem istasyon sayısını hem de çevrim süresinin belirli olmadığı durumda hat etkinliğini maksimize etmektir.
- Tip-F MHD: İstasyon sayısının ve çevrim süresinin belirli olduğu durumda hat dengesi oluşturmaktır.

Tablo 1.1: Montaj hattı dengeleme problemlerinin amaca göre sınıflandırılması [4].

İstasyon Sayısı/ Çevrim Süresi	Verilmiş	Minimize Edilen
Verilmiş	MHD-F	MHD-2
Minimize Edilen	MHD-1	MHD-E

Montaj hattı dengelemenin sınıflandırılmasında sıklıkla kullanılan sınıflandırmalardan biri de Scholl [5] ve Chen [6] gibi çalışmalara dayanmaktadır. Aşağıdaki sınıflandırma B-MHD (basit montaj hattı dengeleme) içindir [7].

- BMHD-1: Çevrim süresine göre istasyon sayısını en aza indirme
- BMHD-2: Belirli bir istasyon sayısı için çevrim süresini en aza indirme
- BMHD-E: Hattın verimliliğini en üst düzeye çıkarma, aynı zamanda istasyon sayısını ve çevrim süresini en aza indirme
- BMHD-F: Uygulanabilir bir çözüm bulma
- BMHD-3: Belirli bir istasyon sayısı için iş yükü düzgünlüğünü en üst düzeye çıkarma
- BMHD-4: İş yükü ile ilgili bağlantıyı en üst düzeye çıkarma
- BMHD-5: Çoklu hedefler

Bu sınıflandırmanın karışık modellerde montaj hattı dengeleme içinde yapılabileceği göz önüne alınmalıdır.

Bu çalışmaların ortak amacı, bir birimde üretilen üretim sayısını artırırken âtil süreyi azaltmak, iş yükü dağılımını düzenli bir hale getirmek, iş düzgünlük indeksini azaltmak ve hattı daha verimli bir hale getirebilmektir.

Bu çalışmada ise, literatürde az çalışılmış olan karışık modelli tip-E montaj hattı dengeleme problemi (KMHD-E) üzerinde çalışılmaktadır. Çözüm yöntemi olarak karışık tam sayılı doğrusal olmayan matematiksel model (MINLP) geliştirilmiştir. Geliştirilen modelin amacı karışık modellerde çevrim süresini ve istasyon sayısını minimize etmektir. Geliştirilen matematiksel model Gurobi optimizör ile çözülmüştür ve veri setleri ile test edilmiştir.

Literatürde yayınlanan bilimsel çalışmalar incelendiğinde, bu tez çalışması kapsamında çözülen problemin matematiksel modeline ve senaryo bazlı benzer bir çalışmaya rastlanmamıştır. Dolayısıyla, yapılan çalışma özgün bir çalışmadır.

1.1 Çalışmanın Önemi

Günümüzde özelleşen talepler ve giderek artan rekabetten kaynaklı firmalar etkin üretim yapabilme arayışına girmişlerdir. Firmalar için; değişen pazar koşullarına hızlı bir şekilde uyum sağlama, müşteri memnuniyetini artırma ve küresel rekabet avantajı elde etme büyük bir stratejik öneme sahiptir. Bu noktada karışık modelli montaj hatları firmalara birçok avantaj sağlamaktadır. Karışık modelli montaj hatları eş zamanlı üretim yapabilmesi ve ayarlama zamanına ihtiyaç duyulmaması açısından diğer montaj hatlarına göre daha avantajlı durumdadır. Aynı zamanda, karışık modelli montaj hatları, farklı ürün modellerini aynı hatta üretilmeye imkân sağlamasından dolayı müşteri taleplerine daha hızlı ve esnek yanıt vermeye olanak sağlar. Bundan dolayı, günümüz tüketicilerinin bireysel taleplerini de karşılayabilme yeteneğine sahiptir. Firmaların talebe hızlı yanıt verebilmesi müşteri memnuniyetini ve dolayısıyla satışlarını arttırabilmesi açısından çok önemli bir role sahiptir. Bu noktada, karışık modelli montaj hatlarının firmalar için ne denli öneme sahip olduğunu görmüş bulunmaktayız. Dolayısıyla, yapılan çalışmanın montaj hatlarının verimli kullanılabilmesi açısından üretim sürecini optimize etme ve maliyetleri kontrol edebilme açısından oldukça önemlidir. Hat etkinliğini maksimize edebilmek için firmaların vermesi gereken operasyonel kararlar bulunmaktadır. Bunlardan bazıları istasyonlara atanacak olan operatör sayısı, çevrim süresi ve açılacak istasyon sayısıdır. Bu tez çalışmasında geliştirdiğimiz model, kullanıcıya farklı kriterler altında örneğin, mevcut montaj hattını yeniden dengeleyebilmek için yapılabilecek değişiklik sayısını ve hat üzerinde kullanabileceği operatör sayısını göz önünde bulundurarak, hat etkinliğini maksimize edebilme yeteneği sağlamaktadır.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Özgün Katkısı

Üretim süreçlerinin optimize edilmesi firmalara birçok farklı avantaj sağlar. Süreçleri iyileştirmek, daha fazla ürünü daha kısa sürede üreterek verimliliğin arttırılmasını sağlar ve bu sayede kaynak kullanımını minimize edilmiş olur. Bu da firmaların maliyetlerinin kontrol edilmesine ve azalmasına yardımcı olur. Bu çalışmada da karışık modelli montaj hatlarının istasyon sayısını ve çevrim süresinin çarpımını minimize ederek hat etkinliğini maksimize eden matematiksel model geliştirilmiştir. Bu sayede amaç boş zamanı minimize edip dengelenmiş üretim hattı ile üretim kapasitesini ve kaynaklarını optimum kullanılacak hale getirerek hızla değişen müşteri taleplerini en hızlı şekilde karşılayabilmektir. Aynı zamanda, matematiksel model istasyonlara çoklu operatör ataması da dahil edilerek formüle edilmiştir. Montaj hattı yeniden dengeleme probleminde işlerin tamamen farklı istasyonlara atanması

mevcut montaj hattında yapılacak olan büyük değişiklikleri ifade eder. Bu durumdan dolayı izin verilen değişiklik sayısı yeni bir kısıt olarak modele eklenmiştir. Geliştirilen modelde, çevrim süresine C_{min} ve C_{max} olmak üzere alt ve üst sınır koyarak zamanı ve istasyonları tam verimli bir şekilde kullanabilmek için modele esneklik sağlanmıştır. Ve bunun rekabet ortamında büyük bir avantaj sağlayacağı ön görülmektedir. Çalışılan problem NP-hard (çözümü zor olan problem) olup karmaşık yapısından dolayı literatürde az çalışılmış bir konudur. Önerdiğimiz yöntem makul bir sürede; matematiksel modele sezgisel bir algoritma entegre ederek büyük boyutlu problemlere kadar firmalara optimal çözüm vermektedir.

1.3 Bölüm Sonu Değerlendirmesi

Giriş bölümünde genel olarak montaj hattı dengelemeye neden ihtiyaç duyulduğu ve montaj hattı dengelemenin öneminden bahsedilmiştir. Aynı zamanda montaj hattı dengeleme problemlerinin sınıflandırılması ile ilgili bilgiler verilmiştir. Karışık modelli montaj hattını etkin kullanmanın firmalara avantajlarından bahsedilip yapılan çalışmanın önemine ve özgün katkısına vurgu yapılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde, montaj hattı dengeleme konusunda genel bilgiler verilmiş ve aynı zamanda problem tanıtımı yapılmıştır. Montaj hattı dengeleme probleminde kullanılan kavramlar ve montaj hattı dengeleme problemlerinin sınıflandırılması, hat yerleşimleri detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Aynı zamanda, konuyla ilgili geniş kapsamlı literatür çalışması verilmiştir. Üçüncü bölümde ise çözüm yöntemi olarak geliştirilen karışık tam sayılı doğrusal olmayan matematiksel model, modelde kullanılan notasyon ve tanımlamalar anlatılmıştır. Dördüncü bölümde, modelin test edildiği veri setinin tanıtımı, modelin test sonuçları verilmiş ve test sonuçları tartışılmıştır. Beşinci bölüm ise tezin sonuç ve tartışma bölümü olup önerilen modelin ne kadar etkin olduğunu ve gelecek çalışmalarla ilgili neler yapılabileceğini anlatan bölümdür.

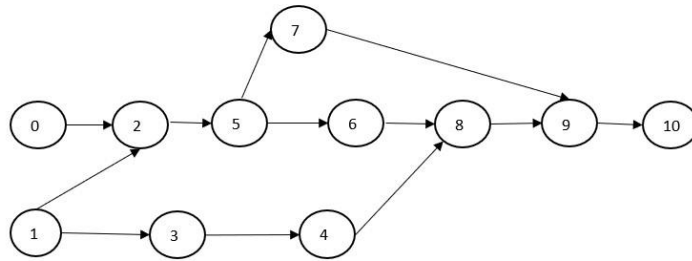
2. TERMİNOLOJİ VE LİTERATÜR TARAMASI

Montaj hattı dengeleme problemi, teknolojik kısıtların getirdiği öncelik ilişkilerini ihlal etmeden işlerin istasyonlara atanması problemi. Bu problem literatürde montaj hattı dengeleme problemi olarak geçmektedir. Montaj hattı dengeleme probleminde kullanılan özel kavramlar bulunmaktadır.

2.1 Montaj Hattı Dengeleme Problemlerindeki Tanımlar

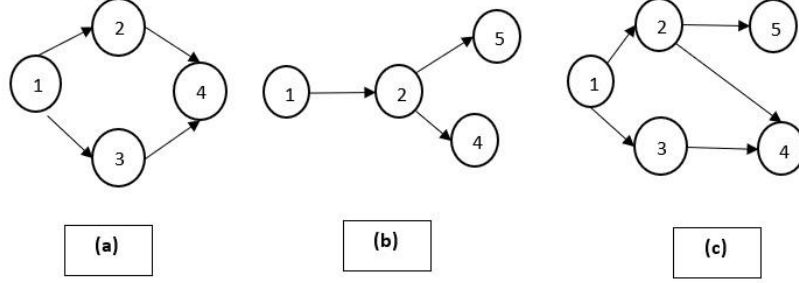
Montaj hattı dengeleme probleminde kullanılan genel kavramlar aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

- İş (Görev): İşin parçalarına ayrılamayan en küçük birimidir.
- Görev Süresi: Görevin tamamlanması için geçmesi gereken süreye denmektedir.
- Çevrim zamanı: Bir iş akışındaki üretim hattında iki ürün arasındaki farktır. Diğer bir deyişle istasyona atanan ürünlerin üretilmesi için gereken zaman diyebiliriz [8].
- Hat dengeleme: İşlerin iş istasyonlarına kısıt ihlali yapmadan düzgün iş dağılımı ile dengeli bir şekilde atanmasıdır.
- Toplam iş kapsamı: Ürünün üretim hattına ilk girdiği zamandan, tamamlanıp sistemden çıkmasına kadarki sürecin toplamıdır.
- Öncelik ilişkileri kısıtı: Üretilmesi gereken işlerin öncelik ilişkilerinden kaynaklı gerçekleşebilme sıraları vardır. Bu öncelik ilişkileri diyagramı ya da boyutu görev sayısına eşit olan ve a_{ij} elemanlarından meydana gelen ikili (binary) bir kare matris olarak ifade edilebilir. Aşağıda örnek olarak bir öncelik ilişkisi diyagramı yer almaktadır [9].



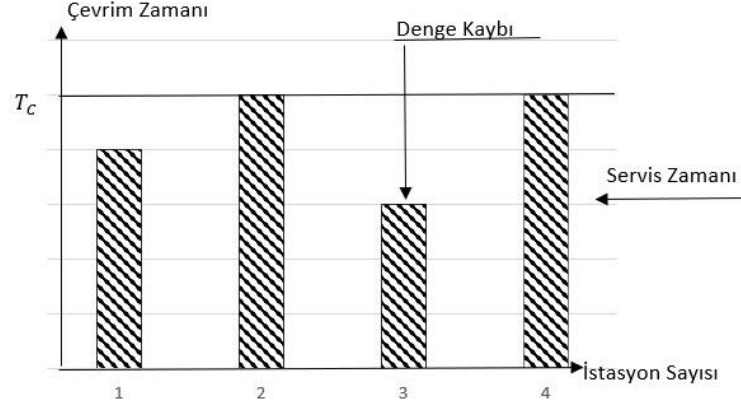
Şekil 2.1: Öncelik ilişkileri diyagramı.

- Birleştirilmiş öncelik diyagramı: İki farklı diyagramın öncül ve ardıl ilişkilerinin birbirine uyduğu durumlarda öncelik diyagramlarının birleştirilmesidir. Macaskill [10], ilk biçimsel gösterimini yapmıştır.

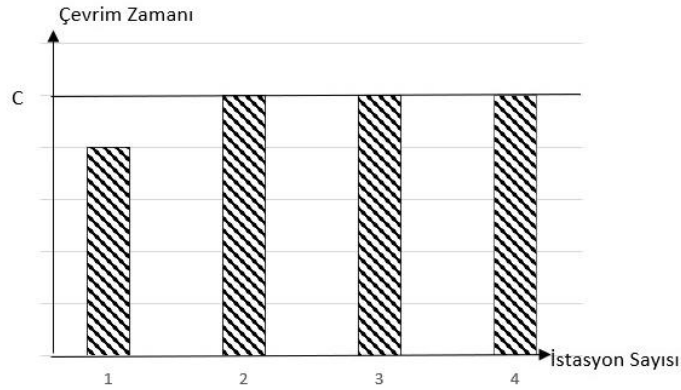


Şekil 2.2: İki farklı ürüne ait öncelik ilişkileri diyagramının (a ve b) birleştirilmesi (c).

- Bölgeleme kısıtı: Bölgeleme kısıtı, pozitif bölgeleme kısıtı ve negatif bölgeleme kısıtı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Pozitif bölgeleme kısıtında işler aynı istasyonda yapılmaktayken negatif bölgeleme kısıtında bazı işler aynı istasyona atanamaz.
- Yeniden dengeleme kısıtı: Bu kısıt, bir montaj hattı dengelemede yeniden dengeleme yapılması gereken durumlarda kullanılır. Bu durumların sebeplerinden bazıları arızalar, elektrik kesintileri ya da hattın tasarımının değişmesi olarak ifade edilebilir.
- Paralel montaj: Bir hat üzerinde istasyonların çoğaltılması ile oluşmaktadır. Hattın daha hızlı olması ve verimliliğin artması için kullanılır.
- Denge kaybı: İşlerin dengesiz bir şekilde istasyonlara atanmasından kaynaklı oluşan boş zamandır. Diğer bir deyişle denge kaybı, bir işin tamamlanması için gereken süre, servis zamanı, ile işin yapılması için ayrılan süre, çevrim zamanı, arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Şekil 2.3 denge kaybı olan bir üretim hattı örneğini göstermektedir. T_c hat dengelenmeden önceki çevrim zamanını ifade etmektedir. Şekil 2.4 Tam dengeli montaj hattı örneğini göstermektedir [11].



Şekil 2.3: Denge kaybı olan bir üretim hattı örneği [11].



Şekil 2.4: Tam dengeli montaj hattı örneği [11].

- Düzgünlük İndeksi (SI): Hat dengelemesi yapıldıktan sonra montaj hattındaki iş istasyonlarının işlem sürelerinin düzgünlüğünün göstergesidir. Aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır [6].

$$SI(\%) = \frac{\sqrt{\sum (WT_{max} - WT_k)^2}}{K * C} * 100 \quad (2.1)$$

WT_K : k istasyonunun süresi

WT_{max} : iş istasyonunun sürelerinin en büyüğü

$WT_{max} = \max_{k=1, \dots, K} \{WT_K\}$

C = Çevrim Süresi

K = İstasyon Sayısı

- İstasyon Boş Zamanı: İşlerin yapılması için gereken zaman ile istasyon zamanı arasındaki farktır. Eğer istasyon boş zamanı negatifse istasyon gecikme zamanı olarak tanımlanır. Gecikme zamanı olumsuz bir durumdur ve her istasyon için en minimum düzeyde olması istenmektedir [4].

- Hat etkinliği (LE): Dengelenmiş bir hattın performansı hakkında fikir verecek en temel göstergelerden birisidir. İşin tamamlanması için yapılması gereken toplam iş süresinin ($T = \sum_{i=1}^N t_i$), işin yapılması için ayrılan zamana (KC) oranıdır veya kısaca verimli sürenin toplam süreye oranı olarak ifade edilebilir ve aşağıdaki gibi hesaplanır: [9]

$$LE(\%) = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{KC} * 100 \quad (2.2)$$

K: Çözüm sonucu elde edilen istasyon sayısı

Yapılan teorik çalışmalarda, %90 ve üzerinde hat etkinliğine sahip bir çözümün oldukça başarılı olduğu kabul edilir. Pratikte ise bu çok mümkün olmayan bir durumdur. Bu durum hat dengelemenin ne kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır [6].

- Minimum istasyon sayısı: Montaj hattı dengeleme problemlerinde minimum istasyon sayısı (K_{min}) bir çevrim kısıtı altında çözümlenerek bulunmaktadır. Minimum istasyon sayısı teorik bir değerdir. Montaj hattı dengeleme probleminin çözümlendikten sonra yorumlanabilmesi için kullanılmaktadır. Çözümün optimuma yakınlığı konusunda yorum yapılmasını sağlamaktadır.

$$K_{min} = \max\{K_1, K_2\} \quad [4]. \quad (2.3)$$

K_1 ifadesi, toplam iş sürelerinin çevrim süresine bölünmesi ile elde edilmektedir. En yakın üstündeki tam sayı değerine yuvarlama yapılması gerekmektedir.

$K_1 = (T/C)^+$ şeklinde ifade edilmektedir. Buradaki T ifadesinin açık formülü

$\sum_{i=1}^N t_i$ şeklindedir.

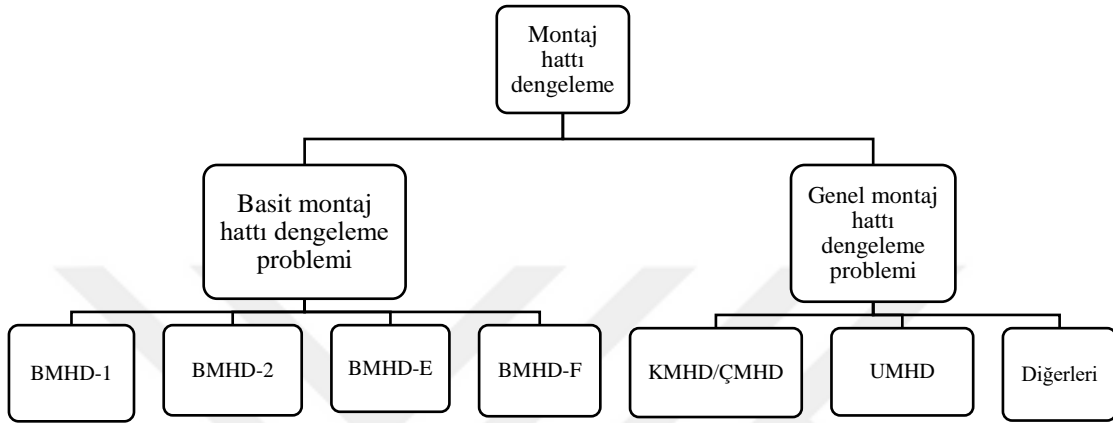
(2.4)

K_2 değeri, çevrim süresini aşmaması için çevrim süresinin yarısından büyük süreye sahip iş öğelerinin sayısını almaktadır.

$$K_2 = i'lerin sayısı \ t_i > C/2 \quad (2.5)$$

2.2 Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinin Sınıflandırılması

Literatür de montaj hattı dengeleme problemleri incelendiğinde pek çok sınıflandırma olduğu görülmektedir. En çok üç farklı yöntem ile sınıflandırma yapılmaktadır. Problemin amacı, ürün çeşitliliği ve hattın yerleşimine göre sınıflandırılmıştır. Montaj hattı dengeleme problemi basit montaj hattı dengeleme ve genel montaj hattı dengeleme olarak ikiye ayrılmaktadır.



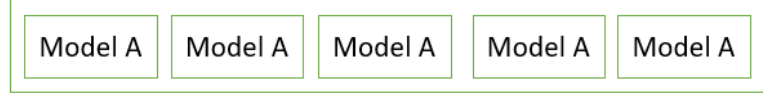
Şekil 2.5: Montaj hattı dengeleme probleminin sınıflandırılması [13].

Görev sürelerinin deterministik olarak bilindiği ve bir verimlilik kriterinin optimize edilmesi gereken montaj hattı problemi basit montaj hattı dengeleme problemidir. Tek modelinin özel bir oluşumudur. Bu montaj hattı dengeleme probleminin en basit şeklidir. Modele diğer kısıtlamaları veya faktörleri (örneğin paralel istasyonlar, U-tipi yerleşim, iki taraflı yerleşim, bölge kısıtlamaları) dahil ettiğinizde problem Genel Montaj Hattı Dengeleme Problemi haline gelir [14]. Basit montaj hattı dengelemenin özelliklerini Baybars [3] bu şekilde tanımlamıştır.

- Bir iş, istasyon veya istasyonlar arasında bölünemez.
- Tüm işler işlenmelidir.
- Tüm istasyonların işi eşit işleyebilme niteliği vardır.
- Probleme ait tüm girdiler bilinmektedir.
- Teknolojik kısıtlardan dolayı görevler rastgele işlenemez. Öncelik ilişkileri kısıtına uyması gerekmektedir.

Problemler ürün çeşitliliğine göre üçe ayrılırlar:

- Tek modelli montaj hatları: Montaj hattında üretim yapılırken sadece bir çeşit homojen ürün vardır. Eğer farklı bir ürün sisteme gelip üretilecekse montaj hattı durdurulup ayarlamalar yapıldıktan sonra yeni gelecek farklı olan ürün üretime alınır.



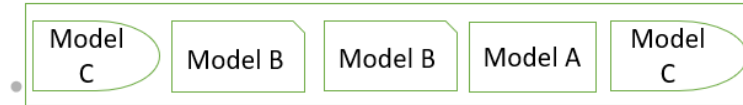
Şekil 2.6: Tek modelli montaj hattı.

- Çok modeller: Farklı modelli ürünler aynı hat üzerinde üretilir. Ürün geçişleri arasında ayarlama süreleri vardır, dolayısıyla ürünler büyük partiler halinde üretilirler.



Şekil 2.7: Çok modelli montaj hattı.

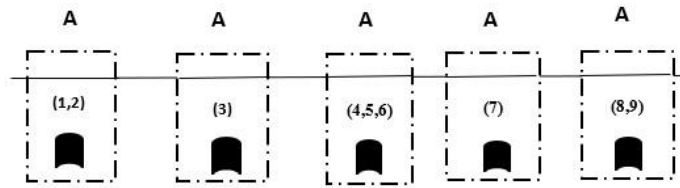
- Karışık modeller: Farklı modelli ürünler, eş zamanlı ayarlama süresi olmadan üretilebilirler. Parti büyüklükleri istenilen şekilde olabilmektedir. Müşteri taleplerine hızlı cevap vermesi, ayarlama süresine ve yeniden hattın kurulmasına ihtiyaç olmaması yönünden karışık modeller diğer modellerle karşılaştırıldığında daha avantajlıdır.



Şekil 2.8: Karışık modelli montaj hattı.

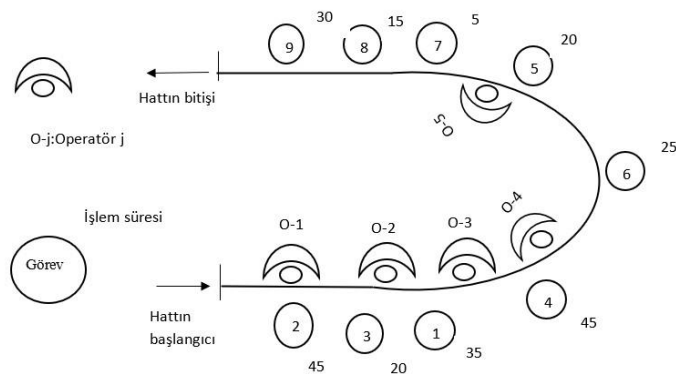
2.3 Hat Yerleşimi

Montaj hatları, şekilleri ve hat üzerinde üretilen farklı ürünlerin sayısı bakımından çeşitli gruplara ayrılabilirler. En yaygın kullanılan yerleşim türleri U tipi, iki taraflı, düz (geleneksel) ve paralel hatlardır. Geleneksel düz montaj hatları birçok seri üretim endüstrisinde çok eski zamanlardan itibaren kullanılmaktadır [15]. Planlaması ve dengelemesi kolay olması açısından avantajdır. Düz montaj hatları aşağıdaki şekilde gibi gösterilebilir:



Şekil 2.9: Düz montaj hattı dengeleme [15].

Gelişen pazar ve gittikçe artan rekabet, üreticilerin daha verimli üretim teknikleri bulmasına neden olmuştur. Tam zamanlı üretim üretim sisteminin altında yatan gerçeklik budur [16]. U tipi yerleşim tiplerinde ön giriş (yarı mamul girişi) ve arka çıkış (tamamlanmış ürünün çıkışı) bulunmaktadır. Herhangi bir oluşabilecek aksilikte operatörlerin sorun olan istasyonlara ulaşabilmesi daha kolay olacaktır. Çoğunlukla tam zamanlı üretim yapan şirketler de kullanılmaktadır. Görevlerin hem girişe hem de çıkışa atanabilecek olması çevrim zamanı ve istasyon zamanı arasındaki farkı azaltır, bir başka deyişle boş zamanı da azaltmaktadır.



Şekil 2.10: U tipi hat yerleşim örneği [17].

İki taraflı hatlar: İki taraflı hatlarda hattın iki tarafına da istasyon kurulmaktadır ve aynı anda montaj işlemi gerçekleştirilmektedir. İki taraflı hatlar ile genellikle büyük hacimli ürünler (otomobil, kamyonet gibi) üretilmektedir. Üretilen ürünlerin hacimlerin büyük olması sebebiyle hattın etrafında dolaşmak kolay olmayacağından hattın her iki tarafına da istasyon kurulmuştur. Böylece montaj hattının sağ tarafında yapılması gereken işler sağ tarafındaki istasyon tarafından, sol tarafında yapılması gereken işler ise sol tarafındaki istasyon tarafından tamamlanmaktadır. Ürünün içinde, üzerinde vb. gerçekleştirilmesi gereken işler var ise bu işler de yine boş zamanlarını minimize edecek şekilde sağ ve sol operatörlere atanmaktadır. İki taraflı hatlarda öncelik ilişkileri diyagramının yanı sıra işlerin atanması gereken yönlerde belirtilmektedir (L, R ve E şeklinde).

Paralel hatlar: Paralel hatlar birden fazla hattın aynı anda çalıştığı montaj hattıdır. Paralel hatlar, aralarına ortak istasyon kurarak yan yana yerleştirilirler ve bu hatların çevrim süreleri birbirlerinden farklı olabilir. Çevrim sürelerinin farklılığı firmalara esneklik sağlamaktadır çünkü farklı taleplere sahip ürünlerin montajları farklı hatlar üzerinde eş zamanlı olarak yürütülebilmektedir. Aynı zamanda ortak istasyon kurulması boş zamanın minimize edilmesini sağlar.

Paralel iki taraflı hatlar: Paralel iki taraflı hatlar, aynı veya benzer ürün modellerinin üretildiği ve benzer üretim süreçlerine sahip olan birden fazla iki tarafı olan montaj hattının aynı anda dengelemesine odaklanmaktadır. Paralel iki tarafı olan montaj hatları, her bir hatta sadece bir model tipini monte etmeye izin verir [18].

2.4 Karışık Modelli Montaj Hattı Dengeleme Üzerine Literatür Taraması

Literatür incelendiğinde basit montaj hattı dengeleme problemi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Üretim yapan bir işletmede basit montaj hattı dengeleme, gelişen sektör ve küreselleşen pazarın taleplerini karşılayabilecek kadar etkili değildir. Bu sebeple bir dizi benzer modelin eş zamanlı üretiminin yapılmasına karışık modelli montaj hattı dengeleme problemi denir. Karışık modelli montaj hatları belirli olmayan ve spesifik taleplere daha iyi cevap verebilmektedir, bu yüzden sektörde daha fazla benimsenmektedir. Karışık modeller de tek modelli montaj hatları gibi hat verimliliğini maksimum yapacak şekilde hattı dengelemeyi hedeflemektedir [19].

Montaj hattı dengeleme problemi NP-hard (çözülmesi uzun ve zor) problem sınıfındadır. Bu problemleri çözerken sezgisel ve meta sezgisel yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler kullanıldığında optimuma yakın sonuçlar bulunmaktadır.

Montaj hattı dengeleme ile ilgili ilk çalışma yüksek lisans tez çalışmasıdır [20]. Montaj hattı dengeleme probleminin ilk analitik ifadeleri Helgeson ve arkadaşları tarafından 1954 yılında formüle edilmiştir [21]. Salveson [21] yaptığı çalışmayı ilk kez matematiksel model haline getirip bu modelle ilgili doğrusal bir çözüm önermiştir. Bu durumun beraberinde, montaj hattı problemi, kombinatoriyal optimizasyon problemlerinin NP zor grubundandır. Gutjahr [22] optimal çözümlere ulaşabilmek amacıyla sürekli etkili çözümler için çalışmaktadır.

Salveson [21]'den sonra tek modellenli deterministik montaj hattı dengelemenin çözülmesi için bazı sezgiseller geliştirilmiştir. Helgeson [23] sıralanmış pozisyonlu ağırlık metodu, Tongue [24] üç safhalı sezgisel prosedürü, Kilbridge [25] sezgisel metodu, Arcus [26] Comsoal metodu, Dar-El [27] MALB metodu karışık modellenli montaj hattı dengeleme problemine çözüm olarak geliştirilmiştir. Bu metotlar, karışık modellenli montaj hattı dengeleme problemi için ilk önerilen yöntemlerdir ve literatürde sıklıkla kullanılan sezgiseller arasındadır. Bu yıllarda ayrıca karışık modeller ile ilgili çalışmalara başlanmıştır.

Thomopoulos [28] karışık modeller ile ilgili ilk yöntem öneren kişidir. Yaptığı çalışmada karışık modellenli montaj hatları tek modellenli montaj hatları gibi ele alınıp çözülmüştür. Thomopoulos [29] işlerin yük dengesini sağlamak amaçlı yaptığı düzgünleştirme çalışmasında düzgünlük indeksini azaltmıştır.

Karışık modellerle ilgili Hadi [27]'den önce tek amaç ele alınıyorken, Hadi [30] yaptığı çalışmada çok amaca hitap etmiştir. İlk defa karışık modeller de çok amaç üzerine çalışılmıştır. Bundan sonraki dönemde karışık modellerle ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Emde vd. [31] karışık modellenli montaj hatlarında ortaya çıkan iş yükü çeşitliliği sorunlarına odaklanarak, iş yükü düzeltme yöntemlerini araştırmışlardır. Kullanılan dal ve sınır (branch-and-bound) ve benzetimli tavlama algoritmalarıyla yapılan çalışmanın etkili sonuçlar verdiği test edilmiştir.

Lopes vd. [32] çalışmasında istasyon atamalarının dengelenmesini, çevrim süresinin minimize edilmesini ve farklı ürün modellerini döngüsel şekilde sıralaması ve planlanması

için MILP kullanmıştır. Belkharroubi ve Yahyaoui [33] çalışmalarında karışık modelli montaj hatları dengeleme tip-2 problemini ele almışlardır. Çözüm yöntemi olarak sıralı pozisyonel ağırlık, reaktif aç gözlü rastgele ayarlamalı prosedürü geliştirilmiştir. Aynı kişiler daha sonraki çalışmalarında, Belkharroubi ve Yahyaoui [34] karışık modellerde iş istasyon sayısını minimize etmeyi amaçlamışlardır. Aç gözlü arama prosedürü kullanılmıştır.

Lopes vd. [35] çalışmalarının amacı verimliliği maksimize etmek, genel tampon kapasitesini azaltmak ve operasyonları düzenlemektir. Çalışmalarında karışık tamsayılı programlama (MILP) kullanmışlardır.

Mönch vd. [36] yaptıkları çalışmada değişen müşteri talepleri ve kısa ürün ömürleri gibi zorlu koşullarda rekabet avantajı elde etmek için tek ve esnek bir montaj hattı benimsemenin önemini vurgulamakta, değişken takt zamanlarının (ortalama çevrim süresi) işgücü verimliliğini artırdığını ve karmaşık montaj hatlarını basitleştirdiğini göstermektedir. Ayrıca, Fendtin tarım makine pazarındaki deneyiminden ilham alarak geliştirilen model, operatör çalışma bölgelerini dikkate alarak montaj hattını yeniden dengeleme karar sürecini hızlandırarak şirketlere zaman ve maliyet tasarrufu sağlamaktadır.

Kai Meng vd. [37] yaptığı çalışmada karışık modeller de ergonomik koşulları ele alarak istasyon sayısını minimize etmeye amaçlamıştır. Samouei ve Ashayeri [38] çalışmalarında hattın dengeleme maliyetini, kaynak seçimini (operatörler, yardımcı robot ve robot) ve görev atamasını en aza indirmeye çalışmaktadır. Bu amaç doğrultusunda matematiksel model geliştirilmiştir.

Zikai Zhang [39] yaptıkları çalışmada açılan istasyonun maliyetini ve operatörlerin işe alım maliyetini en aza indirmeyi hedeflemiştir. Çalışma ekonomik sürdürülebilirlik açısından önemlidir. MINLP modeli önermişlerdir.

Aşağıdaki Tablo 2.1 de karışık modellerde, ağırlıklı olarak düz yerleşim tipli, montaj hatlarında yapılan literatür çalışması verilmiştir. Nourmohammadi vd. [40] yaptığı çalışmada belirli istasyon sayısında çevrim süresini minimize etmeyi amaçlamıştır. Modelde çevrim süresini, istasyonların maksimum ergonomik risklerini ve toplam ergonomik riskleri minimize edecek şekilde çok amaçlı MILP modeli geliştirmişlerdir.

Kucukkoc vd. [41] yaptığı çalışmada karışık modellenli tip-2 montaj hattı problemine odaklanmıştır. Maliyet odaklı amaç fonksiyonu olan karma tamsayı tabanlı sezgisel yöntem ve özelleştirilmiş bir mahalle arama algoritması geliştirmişlerdir. Delice vd. [42] çalışmasında karışık modellenli montaj hatlarında maliyeti minimize edecek matematiksel model geliştirmişlerdir. Geliştirilen model iş istasyonu kurulum maliyeti, süpermarket kurulum maliyeti ve nakliye maliyetinin toplamını en aza indirmeyi amaçlar. Aynı zamanda büyük boyutlu problemlerin çözümü için karınca kolonisi algoritması ve benzetimli tavlama algoritması önerilmiştir.

Mura ve Dini [43] çalışmasında karışık modellenli montaj hatlarını dengeleme probleminde geliştirilen modelin amacı karışık modellenli montaj hattı dengeleme tip-1'e göre iş istasyonu sayısının en aza indirilmesine olanak sağlarken, enerji yükü ve gürültü varyansı, atanan montaj görevlerini yerine getirirken çalışanların enerji harcamalarını ve algılanan gürültü düzeyini azaltacak ve düzeltecektir. Anel vd. [44] çalışmalarında karışık modellenli montaj hatlarında tip-2 problemine odaklanmışlardır. Amaç verilen istasyon sayısı için çevrim süresini minimize edecek çözümü bulmaktır ve bunun için genetik algoritma geliştirilmiştir.

Cil vd. [45] çalışmalarında karışık modellenli montaj hatları dengeleme tip-2 problemi ve operatör atama problemini ele almışlardır. Çevrim süresini minimize ederken istasyonlara atacak olan operatörler sayısını da optimize etmişlerdir. İstasyonlarda operatör olarak işçiler ve robotlar birlikte çalışabilmektedir. Aynı zamanda birden fazla operatörün bir istasyona atanabilmesine izin verildiği için çoklu operatör atama problemi olarak değerlendirilmektedir. Çözüm yöntemi olarak matematiksel model geliştirilmiş, aynı zamanda arı kolonisi ve yapay arı kolonisi algoritmaları büyük boyutlu problemlerin çözümü için önerilmiştir. Alakas ve Toklu [46] karışık modellenli montaj hatları dengeleme probleminde tip-2 problemi ele alınmıştır ve çözüm yöntemi olarak kısıt programlama kullanılmıştır.

Yuwei vd. [47] karışık modellenli montaj hatlarında tip-1 problemini ele almışlardır ve çözüm yöntemi olarak genetik algoritmayı kullanmışlardır. Çoklu amaç fonksiyonu, minimum eşleştirilmiş istasyon sayısı (N), maksimum montaj hattı denge oranı ve minimum düzgünlük endeksi kullanılmıştır. Yaphiar vd. [48] çalışmasında karışık modellenli tip-1 montaj hattı dengeleme problemini ele almışlardır. Aynı zamanda çalışmaları, operatör atama problemini de içermektedir. Her iş istasyonu sadece operatör olarak insan, sadece robot veya çalışan

insan ve robotu aynı anda içerebilir. Modelin birincil amacı, eşleştirilmiş istasyon sayısını ve toplam istasyon sayısını en aza indirmektir.

Lalaoui ve Afia [49] karışık modelli montaj hattı dengeleme tip-2 problemini ele almışlardır ve çözüm yöntemi olarak benzetimli tavlama algoritmasını kullanmışlardır. Sadeghi vd. [50] karışık modelli montaj hattı dengeleme tip-1 problemini ele almışlardır. Çözüm yöntemi olarak değişken mahalle inişi ve sıralı pozisyonel ağırlık algoritmaları kullanılmıştır. Her istasyonda bir operatör olacak şekilde, mevcut zaman göz önüne alındığında, operatörlerin iş yükünü düzgünleştirirken iş istasyonu sayısını en aza indirir.

Naderi vd. [51] çalışmalarında karışık modelli montaj hattı dengeleme problemi için verilen çevrim süresi ve istasyon sayısına göre çalışacak operatör sayısını minimize etme amaçlı matematiksel model geliştirmişlerdir ve doğrusal gevşetme yöntemi kullanmışlardır. Aynı zamanda etkili bir mantık tabanlı Benders ayrıştırma algoritması geliştirilmiştir. Liu vd. [52] çalışmalarında karışık modelli montaj hattı dengeleme tip-F problemini ele almışlardır ve çözüm yöntemi olarak genetik algoritma kullanılmıştır. Amaçları verimliliği en üst düzeye çıkarırken, karmaşıklığı ve toplam tampon kapasitesini en aza indirmektir.

Lopes vd. [32] karışık modelli tip-2 montaj hattı dengeleme problemini ele almışlardır ve matematiksel model geliştirmişlerdir. Amaçları görev-istasyon atamalarının dengelenmesi ve farklı ürün modellerinin döngüsel bir şekilde sıralanması/programlanmasıdır. Tanhaie vd. [53] karışık modelli montaj hattı dengeleme tip-1 problemini ele almışlardır. Geliştirilen matematiksel hem istasyon sayısını minimize etme hem de montaj görevlerini yerine getirmek için görev tekrarının ve operatör atamasının toplam maliyetini minimize etme amaçlıdır.

Tablo 2.1: Karışık modelli montaj hatlarında yapılan başlıca çalışmalar.

Yazar	Yıl	Tip-1	Tip-2	Tip-E	Tip-F	Maliyet Odaklı Amaç Fonksiyonu	Operatör Kısıtı	Metodoloji
Zhang vd. [39]	2024					√	Çok operatörlü	MILP
Nourmohammadi vd. [40]	2023		√				-	MILP
Kucukkoc vd. [41]	2023		√			√	-	Karma tamsayı tabanlı sezgisel yöntem ve özelleştirilmiş bir mahalle arama algoritması
Delice vd. [42]	2023					√	-	MILP
Mura ve Dini [43]	2023	√				√	-	Genetik algoritma
Mönch vd. [36]	2021		√				Çoklu Operatör	Matematiksel Model
Meng vd. [37]	2022		√				-	MILP, co-evolüsyoner algoritma
Belkharroubi ve Yahyaoui [34]	2022	√					-	Aç gözlü arama prosedürü
Anel vd. [44]	2022		√				-	Genetik algoritma
Belkharroubi ve Yahyaoui [33]	2021		√				-	Sıralı pozisyonel ağırlık, reaktif aç gözlü rastgele ayarlamalı prosedürü
Çil vd.[45]	2020		√				Çok Operatörlü-Robotik	MILP, arı koloni algoritması
Alakaş ve Toklu [46]	2020		√				-	Kısıt programlama (Constraint Programming)
Yuwei vd. [47]	2020	√					-	Genetik algoritma
Lopes vd. [35]	2020		√				-	Simülasyon tabanlı sezgisel yöntem
Yaphiar vd. [48]	2020	√				√	Tek Operatörlü-Robotik	MILP
Lalaoui ve Afia. [49]	2019		√				-	Simülasyonlu tavlama
Samouei ve Ashayeri [38]	2019					√	Çok Operatörlü-Robotik	Matematiksel model

Tablo 2.1 (devam)

Yazar	Yıl	Tip-1	Tip-2	Tip-E	Tip-F	Maliyet Amaç Fonksiyonu	Operatör Kısıtı	Metodoloji
Naderi vd. [51]	2018				√		Çok operatörlü	MILP, doğrusal gevşetme
Liu vd. [52]	2019				√		-	Genetik algoritma
Lopes vd. [32]	2019		√				-	MILP
Sadeghi vd. [50]	2018	√					-	Değişken mahalle inişi, Sıralı pozisyonel ağırlık
Tanhaie [53]	2019	√				√	Tek operatörlü	Çok amaçlı matematiksel model
Manavizadeh vd. [54]	2012			√			-	Çok amaçlı evrimsel algoritma
Su vd. [19]	2014			√			-	Karışık tamsayılı doğrusal olmayan programlama, iki aşamalı sezgisel yöntem
Legesse vd. [12]	2020			√			-	Matematiksel Model, metasezgisel yöntem

2.5 Tip-E Montaj Hattı Dengeleme Problemi Üzerine Çalışmalar

Sınıflandırma için kullanılan kriterler farklı olması nedeniyle, farklı karışık modelli montaj hattı dengeleme problemleri ortaya çıkmaktadır. Boysen [55] farklı kriterlerden kaynaklı hem tek modelli montaj hattı dengeleme problemleri hem de karışık modeller için amaçlarını gösteren sınıflandırma yapmıştır. Bu sınıflandırma üç'e ayrılır [56]:

- KMHD-I: Çevrim zamanı verildiği durumda istasyonların minimize edilmesi
- KMHD-II: İstasyon sayısını verildiği zaman çevrim süresinin minimize edilmesi
- KMHD-E: Hem istasyon sayısının hem de çevrim zamanının minimize edilmesi

Literatürde tip-E montaj hattı dengeleme problemi Tip-1, Tip-2 ve Tip-F montaj hattı dengeleme problemlerine göre daha az çalışılmıştır. Tablo 4.1 literatürde tip-E montaj hattı dengeleme problemini çalışan makaleleri özetlemektedir. Görüldüğü gibi literatürdeki çalışmalar, ürün çeşit modeline, hat yerleşim tipine ve kullandıkları metodolojilere göre raporlanmıştır. Tabloyu incelediğimizde sadece üç tane çalışmanın karışık modelli montaj hattı dengeleme problemine odaklandığını görmekteyiz. Literatürdeki diğer tüm çalışmalar tek modelli montaj hattı dengeleme problemine odaklanmıştır. Genellikle düz hat yerleşim tipinin çalışıldığını görmekteyiz.

Scholl [57] tip-E basit montaj hattı dengeleme problemini ele almıştır. BMHD-E'nin amacı çevrim süresinin bir üst sınırı verildiğinde buna göre istasyon sayısının en küçüklenmesidir. Bu da MHD deki zamanı etkin kullanmak, bir birim başına düşen üretimi arttırırken maliyeti minimize etmek amaçlarıyla örtüşmektedir.

Plans [58] BMHD-E problemi için hat verimliliğini arttırmak üzere yapılmış olan bir çalışmadır. BMHD-E, BMHD-1 ve BMHD-2 problemlerine kısıtları ile benzerlik göstermesine rağmen amaç fonksiyonunun doğrusal olmaması sebebiyle doğrusallaştırılması gerekmektedir. Bu çalışmada MILP incelenmiştir. MILP'in çözüm süresi uzun olabileceğinden ve maliyetlere yol açabileceğinden çözüm için Dillenberger [59] önerdiği MILP'lerin çözümü için düzelt ve rahatla (fix and relax) sezgiseli kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda sezgisel yöntem ile daha hızlı, daha az maliyetli ve etkin sonuçlar elde edildiği ortaya çıkmıştır.

Wei [60] çalışmasında hat verimliliğini arttırmak ve boş zamanı en küçükleme üzerine çalışmıştır. Basit montaj hattı dengelemede Tip-1 ve Tip-2 amaçlarını birleştirerek tip-E problem için E_i öncelik ilişkileri göz önüne alındığında i görevinin atanabileceği en erken istasyon ve L_i öncelik ilişkileri göz önüne alındığında i görevinin atanabileceği en geç istasyonu belirten kısıtları ekleyerek tip-E basit montaj hattı dengelemenin çözümü için yeni bir yöntem geliştirilmiştir.

Bildiğimiz kadarıyla tip-E karışık modellerde yapılan ilk çalışma Manavizadeh [54]'e aittir. Sipariş üzerine üretim yapan bir ortamda ele almıştır. Yaptığı çalışmada bölgeleme kısıtlarını da göz önüne almıştır. Çevrim süresini ve İstasyon sayısını birlikte minimize etmeyi hedeflemiştir. Çok amaçlı evrimsel algoritma yaklaşımı arasından en iyi çözümü çok amaçlı genetik algoritma vermiştir.

Su vd. [19] KMHD-E probleminin çözülmesi için öncelik ilişkileri Petri Ağı ile gösterilmiş optimizasyon için karışık tamsayı doğrusal olmayan algoritma geliştirilmiştir. İstasyonun azaltılması için iş istasyonu sayısını en aza indirirken Petri Ağı algoritması kullanırken döngü sayısını en aza indirmek için İkili Arama Algoritması ve Petri Ağının birleşimidir. Petri Ağı ile oluşturulan iş istasyonu sayısını minimize etmek için kullanıp ardından çevrim süresini minimize etmek için ikili arama algoritmasını kullanan iki aşamalı bir sezgisel olan algoritma kullanılmıştır. Önerilen iki aşamalı sezgisel Genetik Algoritma ile karşılaştırıldığında da iki aşamalı sezgiselin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Legesse [12] karışık modellerle stokastik bir ortamda çalışmıştır. Çevrim süresini ve istasyon sayısını en aza indirmeyi amaçlamıştır. Matematiksel model geliştirilmiştir ve problem meta-sezgisel yöntemlerle çözülmüştür. Siparişin üretime gelmesi ve stokastik dağılımı ele alınarak test edilmiştir.

Zacharia ve Nearchou [61] bulanık işlem sürelerine sahip tek modelli bir düz montaj hattı dengeleme probleminde hattı dengelemeyi ve hat verimliliğini maksimum yapmayı amaçlamaktadır. Matematiksel bir çözüm sunulduktan sonra bulanıklık ile problemin model formülasyonu, yeni bir modifiye genetik algoritma çözümü için önerilmiştir.

Kucukkoc [62] için bu iki çelişen hedefi en aza indirmeyi amaçlamaktır. Paralel iki taraflı hatlar ilk defa birlikte ele alınmıştır. Bu iki çelişen hedefi en aza indirmeyi amaçlamaktır.

Karınca kolonisi optimizasyonu parametrelerinin Yanıt yüzey metodu aracılığıyla optimize edildiği yeni bir karınca kolonisi optimizasyonu tabanlı yaklaşımın, paralel iki taraflı montaj hattı sistemlerinin dengelenmesi için olası bir çözüm yaklaşımı olarak ilk kez önerilmesidir. Aynı zamanda, literatürde ilk defa tip-E paralel iki taraflı montaj hattı dengeleme problemi tanıtılmıştır.

Esmailbeigi vd. [63] çalışmasında tip-E basit montaj hattı dengeleme problemi ele alınmıştır. Hattın verimliliğini maksimum yapmak, çevrim zamanı ve istasyon sayısının birlikte en küçüklenmesi ve düzgünlük indeksinin en küçüklenmesi hedeflenmiştir. Probleme çözüm için karışık tamsayılı doğrusal olmayan programlama önerilmiştir. Sunulan formülasyonu güçlendirmek üç farklı doğrusallaştırma yöntemi kullanılmıştır.

Jusop ve Rashid [64] çalışmasında tip-E basit montaj hattı dengeleme probleminin genetik algoritma ile çözümleri incelenmiştir. Jusop ve Rashid [65] bu çalışmada tek model için tip-E kaynak kısıtlı basit montaj hattı dengeleme problemi ele alınmıştır. İstasyon sayısı ve çevrim süresini birlikte en küçüklerken kaynak kısıtını da en azlamak hedefidir. Elitist Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması, etkinliği test etmek için kıyaslama problemleri kullanılmıştır. Geliştirilen algoritma Genetik Algoritma ve Hibrit Genetik Algoritma karşılaştırıldığında daha iyi sonuç vermiştir.

Zhang vd. [66] Uçak montaj hattındaki montaj personelinin mobil çalışmasını temel alan tip-E dengeleme Genel montaj hattının ve her bir montaj istasyonunun düzgünlük indeksini en aza indirmesi ve aynı zamanda insan gücü maliyetlerini de en aza indirilmesidir.

Corominas vd. [67] Bu çalışmada, tek modellenmiş tip-E basit montaj hattı dengeleme problemin çözümünde karışık tamsayılı doğrusal programlama kullanılmış ve iteratif yöntem sunulmuştur.

Belassiria vd. [68] tip-E basit montaj hattında bölgeleme kısıtını ve iş istasyonlarının dengelenmesini ele alan montaj hattı dengeleme problemini ele alınmıştır. Bölgeleme kısıtını ve işlerin düzgün dağılmasını göz önüne alarak hat verimliliğini maksimum yapılması hedeflenmiştir. Çözüm için hibrit bir genetik algoritma geliştirilmiştir.

Oksuz vd. [69] Montaj hattında işçi atama ve dengelemede işçi performansı göz önüne alınarak hattın dengelenmesi ve hat verimliliğinin en büyüklenmesi problemini ele almışlardır. Bu problem için ilk defa yapay arı koloni algoritması önerilmiştir.

Fathi vd. [70] çalışmasında tek modelli düz montaj hattı tip-E problemini ele almıştır. Amaç çevrim süresi ve istasyon sayısının en iyi kombinasyonun belirleyerek denge verimliliğini en üst düzeye çıkarmaktır. Bunun için MINLP bir model geliştirmişlerdir. Bu çalışma, BMHD-E'yi şu ana kadar ele alan, aynı zamanda, görevin sabit bir istasyona atanmasını sağlayan gerekliliği ele alan ve özellikle matematiksel bir yaklaşım uygulayarak işçi memnuniyeti arttırmak için kullanılan kriteri optimize eden ilk çalışmadır.

Khalid vd. [71] çalışmasında tek modelli düz montaj hattı tip-E problemini ele almıştır. Bu çalışma, tip-E montaj hattı dengeleme problemi çözülürken öncelikle dar boğazın optimize edilerek hat verimliliğinin sağlanmasına odaklanmıştır. Bunun için Yapay bağışıklı sistemi, Bulaşıcı Bağışıklık Ağı algoritmasını önermişlerdir. Yine aynı kişiler diğer çalışmalarında Khalid vd. [72] aynı problem için Bulaşıcı yapay bağışıklık ağı yaklaşımı olan yapay bağışıklık sistemi algoritmasını önermişlerdir.

Jiao vd. [73] çalışmasında tek modelli U tipi yerleşim hattında tip-E montaj hattı dengeleme problemini ele almıştır. Montaj hattının dengelenmesini ve maksimum verimliliğinin sağlanmasını iş yükünün dengelenmesi ile sağlamaktadır. Aynı zamanda, düz montaj hatları ile U tipi yerleşimli montaj hatları karşılaştırılmıştır. Sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Genetik algoritma kullanılmış ve simüle edilmiştir. Genetik algoritmanın sonuçlarının Tavlama algoritmasından daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

Belkharroubi ve Yahyaoui [74] çalışmasında tek modelli düz montaj hattı tip-E problemini ele almıştır. Amaç hat verimliliğini maksimuma çıkarmaktır. Probleme çözüm için Genetik Algoritma geliştirilmiştir. Aynı zamanda genetik algoritmanın performansını değerlendirmek ve karşılaştırmak için hibrit reaktif aç gözlü rasgele arama prosedürü kullanılmıştır.

Khan vd. [75] tek modelli düz montaj hattı tip-E problemini çalışmışlardır. Yeniden yapılandırılabilir makineleri tahsis ederken hat dengeleme problemini ele almaktadır. Toplam Süreyi, Hat Verimliliği Endeksi'ni ve Müşteri Memnuniyeti Endeksi'ni optimize

etmeyi amaçlamışlardır. Bunun için Yapay Elektrik Alanı Algoritması önerilmiştir. Önerilen sezgisel algoritmanın sonuçları Evrimsel Parçacık Sürü Optimizasyonu ve Değişken Mahalle Araması ile karşılaştırılmıştır.

Ahmadi vd. [76] çalışmasında tek modelli iki taraflı montaj hattında tip-E problemini ele almaktadır. Probleme çözüm olarak MINLP matematiksel model önerilmiştir. Toplam boşa kalma süresini en aza indirmeyi ve çevrim süresi minimize etmeyi amaçlayan, aynı zamanda farklı kısıtlamalar getiren yeni bir matematiksel model geliştirmişlerdir.

Fadzil ve Ramli [77] basit montaj hatlarında tip-E problemini ele almıştır. Bu problemi çözmek için yeni bir metasezgisel algoritma geliştirilmiştir. Tiki-Taka oyunundan esinlenmiş bir metasezgiseldir.

Gurevsky vd. [78] çalışmasında basit montaj hatlarında tip-E problemini ele almıştır. Belirli görevlerin işlem süresindeki olası değişikliklere ilişkin olarak bu problem için uygun ve optimal çözümlerin kararlılığı araştırılmıştır. Önerilen algoritma polinom zaman algoritmasıdır.

Kucukkoc vd. [41] çalışmasında kullanım ömrü sonu ürünlerin kurtarılması için birbiriyle çelişen iki hedefin söküm hatlarının verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için çevrim süresini ve istasyon sayısının eş zamanlı optimizasyonudur. Çalışmanın diğer bir katkısı ise çoklu operatör kullanarak hat etkinliğinin maksimize edilmesidir. Literatürde tip-E söküm hattı dengeleme sorunu ile ilgili yapılan ilk çalışmadır.

Yapılan literatür araştırmasına göre Tablo 2.2'den de görülebileceği üzere, karışık modelli tip-E montaj hattı dengeleme problemi literatürde diğer çalışmalara göre daha az ele alınmıştır. Sadece üç çalışmanın temel konusu karışık modelli montaj hatlarında çevrim süresini ve istasyon sayısını minimize etmektir. Bu tezde, işlerin istasyona atanma problemi ile birlikte çoklu operatör kullanımı ve yeniden hat dengeleme problemi de dikkate alınması sebebiyle literatürde bulunan çalışmalardan ayrılmaktadır. Dolayısıyla, yapılan çalışma literatürdeki bahsedilen bu boşluğu doldurmaktadır.

Tablo 2.2: Tip-E problemine genel bakış.

Yazar	Yıl	KM	TM	Hat Yerleşim Tipi	Metodoloji
Manavizadeh vd. [54]	2012	√		Düz	Çok amaçlı evrimsel algoritma
Su vd. [19]	2014	√		Düz	Karışık tamsayılı doğrusal olmayan programlama, iki aşamalı sezgisel yöntem
Legesse vd. [12]	2020	√		Düz	Matematiksel Model, metasezgisel yöntem
Wei ve Chao [60]	2011		√	Düz	Karışık tamsayılı doğrusal olmayan programlama
Zacharia ve Nearchou [61]	2013		√	Düz	Genetik algoritma
Kucukkoc [4]	2015		√	Paralel iki taraflı hat	Matematiksel model, karınca koloni algoritması
Esmailbeigi vd. [63]	2015		√	Düz	Karışık tamsayılı doğrusal programlama
Jusop ve Rashid [64]	2015		√	Düz	Genetik algoritma
Jusop ve Rashid [65]	2016		√	Düz	Elitist baskın olmayan genetik algoritma
Zhang vd. [66]	2016		√	Düz	İkili parçacık sürü algoritması, hızlandırılmış ikili parçacık sürü algoritması
Corominas vd. [67]	2016		√	Düz	Karışık tamsayılı doğrusal programlama
Belassiria vd. [68]	2017		√	Düz	Matematiksel model, genetik algoritma, hibrit genetik algoritma
Oksuz vd. [69]	2017		√	U tipi	Karışık tamsayılı doğrusal olmayan programlama, iki aşamalı sezgisel yöntem, yapay arı koloni algoritması
Fathi vd. [48]	2018		√	Düz	Karışık tamsayılı doğrusal olmayan programlama
Khalid vd. [71]	2020		√	Düz	Yapay bağışıklık sistemi, bulaşıcı bağışıklık ağı
Khalid vd. [72]	2021		√	Düz	Yapay bağışıklık sistemi
Jiaovd. [73]	2022		√	U tipi	Matematiksel model, sezgisel algoritma
Belkharroubi ve Yahyaoui [74]	2022		√	Düz	Genetik Algoritma

Tablo 2.3 (devam)

Yazar	Yıl	KM	TM	Hat Yerleşim Tipi	Metodoloji
Khan vd. [75]	2022		√	Düz	Matematiksel model, yapay elektrik alanı algoritması
Ahmadi vd. [76]	2023		√	İki taraflı	Karışık tamsayılı doğrusal olmayan programlama
Fadzil ve Ramli [55]	2023		√	Düz	Tiki-Taka metasezgiseli ve çok amaçlı Tiki-Taka sezgiseli
Plans [58]	1999		√	Düz	Karışık tamsayılı doğrusal programlama, sezgisel prosedür
Gurevsky vd. [78]	2012		√	Düz	Polinom zaman algoritması
Ravelo [79]	2022		√	Düz	Polinom zaman algoritması
Kucukkoc [41]	2019		√	Düz	Karışık tamsayılı doğrusal olmayan ve iteratif karışık tamsayılı programlama

TM: Tek Modelli, KM: Karışık Modelli

2.6 Yeniden Dengeleme (Re-balancing) Üzerine Çalışmalar

Yapılan literatür çalışmasında, yeniden dengeleme (re-balancing) çalışmaları genellikle maliyeti minimize etmek üzerinedir. Düz hat yerleşimi, paralel hatlar, U-tipi ve iki taraflı hatlar için yeniden dengeleme çalışması yapılabilmektedir. Bu tez kapsamında düz hat yerleşimli karışık modelli montaj hattı dengeleme problemi çalışılmasından dolayı bu problem özelinde literatür taraması yapılmıştır. Dolayısıyla, karışık modelli montaj hattı yeniden dengeleme çalışmaları dikkate alınmıştır. Bunlara örnek olarak; Ağpak [80] çevrim süresi dalgalanmalarını minimum düzeyde tutmayı, Yang vd. [81] istasyon sayısını minimize etmeyi, Serin vd. [82] farklı modeller için her istasyondaki iş yükü değişimini ve yeniden dengeleme maliyetini en aza indirmeyi hedeflemişlerdir. Yang vd. [81] çalışmasında yeniden ataması yapılan görevler için maliyet fonksiyonu tanımlamışlardır. Amaç fonksiyonları yeniden atanan görevler için toplam işlem süresini minimize etmektir. Aynı zamanda belirli bir çevrim süresi ve istasyon sayısı vardır dolayısıyla çevrim süresi ve istasyon sayısı modele parametre olarak verilmektedir. Tip-F problemi başlığı altında değerlendirilebilir. Büyük boyutlu problemleri çözebilmek amacıyla genetik algoritma önerilmiştir. Oliveira vd. [83], çalışmasında karışık modelli montaj hatlarında yeniden dengeleme problemini dikkate almıştır. Odaklanılan verilen çevrim süresi için istasyon sayısını minimize etmektir dolayısıyla çalışma tip-1 başlığı altında değerlendirilebilir.

Probleme çözüm için matematiksel model ve sezgisel bir algoritma geliştirmişlerdir ve iki yöntemin etkinliği küçük boyutlu veri setleri ile test edilip karşılaştırılmıştır.

Bu tez kapsamında ele alınan probleme en yakın çalışma Makssoud [84] tarafından yapılmıştır. Makssoud [84] mevcut durumdaki montaj hattında yapılacak olan değişiklik sayısını ve açılacak olan istasyon maliyetini minimize etmek amaçlı bir matematiksel model geliştirilmiştir. Modelin amaç fonksiyonu maliyet odaklıdır ve basit montaj hatları için yapılmış bir çalışmadır. Verilen çevrim süresi için minimum istasyon sayısını bulmaya çalışmasından dolayı Tip-2 problemi altında değerlendirilen bir çalışmadır. Modelin performansı sadece küçük veri setleri ile test edilmiştir.

Bu tez kapsamında sunulacak olan matematiksel model, karışık modelli hatlarda çok operatör koşulları dikkate alınarak mevcut durumdaki montaj hattında yapılabilecek maksimum değişiklik kısıtı B 'nin eklenmesi kullanıcıya en az değişiklik altında hat etkinliğini maksimize edebilme avantajı sağlamaktadır. Bu durumda firmalara maliyet ve zaman açısından avantaj sağlamaktadır.

2.7 Bölüm Sonu Değerlendirmesi

Bu bölümde montaj hattı dengelemede kullanılan terimler ve bu terimlerin tanımları detaylı olarak verilmiştir. Sonrasında, montaj hattı dengeleme problemleri amaca göre sınıflandırılmıştır. Bu çalışmada odaklanılan problemin karışık modelli tip-E montaj hattı dengeleme problemi olduğundan bahsedilmiştir ve literatür taraması bu problem özelinde verilmiştir. Öncelikle literatürde karışık modelli montaj hatları kapsamında yapılan çalışmaların hepsi detaylı olarak verilmiştir. Sonrasında tip-E özelinde yapılan çalışmalar detaylı olarak incelenmiştir ve yapılan bu tez çalışmasının literatürdeki çalışmalardan farkı açıklanmıştır.

3. ÖNERİLEN MATEMATİKSEL MODEL

Bu bölümde, tez kapsamında geliştirilmiş olan MINLP ve rMILP (iteratif karışık tamsayılı doğrusal programlama) modelleri kullanılan notasyonlar verilerek açıklanmıştır. Sunulan modeller bir sonraki bölümde (Deneysel Testler) detaylı olarak test edilecek ve avantajlarından bahsedilecektir.

3.1 MINLP

Burada karışık modelli tip-E montaj hattı dengeleme problemi için karışık tam sayılı doğrusal olmayan matematiksel model geliştirilmiştir. Modelin amacı çevrim süresini ve istasyon sayısını birlikte minimize etmektir. Bu doğrultuda K istasyon, I görev ve M model kümesi olacak şekilde tanımlanmıştır. Her bir istasyon $k \in K$ ile, her bir görev $i, r, s \in I$ ile, her bir model $m \in M$ ile ifade edilmektedir. OP izin verilen toplam operatör sayısını ifade ederken RP bir istasyona atanabilecek en fazla operatör sayısını ifade etmektedir. Hat üzerinde izin verilen toplam operatör sayısı OP ile ifade edilmektedir.

Montaj hattının dengelenmemiş ve mevcut durumu M_{ik} ile ifade edilmektedir. Daha detaylı açıklamak gerekirse, M_{ik} montaj hattının mevcut durumunda i görevinin k istasyonuna atanıp atanmadığını gösteren bir matristir. Eğer i görevi k istasyonuna atanmış ise 1; değilse 0 değerini alır. Geliştirilen model mevcut durumdaki dengelenmemiş montaj hattında verilen maksimum değişiklik sayısını, B , aşmayacak şekilde ve operatör sayısına göre hattı yeniden dengeler. Modelimiz, verilen herhangi bir mevcut durumda çalışabilme kapasitesine sahiptir. Yeniden montaj hattı dengelemede i görevinin hangi k istasyonuna atanacağına karar verilir ve bu karar modelde x_{ik} ile ifade edilmektedir. Eğer i görevi k istasyonuna atanmışsa 1; değilse 0 değerini alır. Aynı zamanda görevleri istasyonlara atarken hangi istasyonun açıldığına karar verilir ve bu karar modelde, z_k ile ifade edilmektedir. Eğer istasyon açılmış ise 1; değilse 0 değerini alır.

Montaj hattı yeniden dengelendiğinde i görevi mevcut durumdan farklı bir istasyona atandıysa bu durum yapılan bir değişiklik olarak görülmektedir ve f_i ile ifade edilmektedir. Eğer i görevinin atandığı istasyon değişmiş ise 1; değilse 0 değerini alır.

Görevlerin istasyonlara atanması öncelik ilişkileri kısıtı ihlal edilmeden yapılmalıdır. Bundan dolayı görevlerin öncelik ilişkileri kümesi önceden biliniyor olup S kümesi şeklinde

gösterilmektedir ve modele parametre olarak verilmektedir. Bir öncelik ilişkisi, eğer r görevi s görevinin komşu öncülü ise 1 değil ise 0 değerini alır ve bu değerler her bir görev ikilisi için $(r, s) \in S$ olmak üzere öncelik ilişkisi matrisini oluşturur.

İşlem süreleri görev ve modele göreve değişiklik göstermektedir bundan dolayı i görevinin m modelindeki işlem süresi t_{im} ile ifade edilmektedir. Aynı zamanda, işlem süreleri deterministik olup herhangi bir dağılıma bağlı değildir.

3.1.1 Notasyon

Geliştirilen modelde kullanılan notasyon aşağıdaki tabloda verildiği gibidir.

Tablo 3.1: Matematiksel model notasyonu.

Kümeler	İstasyonlar	$k \in K$
	Görevler	$i, r, s \in I$
	Modeller	$m \in M$
Parametreler	Maksimum istasyon sayısı	K_{max}
	Minimum çevrim süresi	C_{min}
	Maksimum çevrim süresi	C_{max}
	i görevinin m modeli için işlem süresi	t_{im}
	Öncelik ilişkileri kümesi	S
	Bir öncelik ilişkisi; r görevi s görevinin komşu öncülüdür.	$(r, s) \in S$
	İzin verilen maksimum değişiklik sayısı	B
	Mevcut durumda i görevi k istasyonuna atanmış ise 1; değilse 0	M_{ik}
	İzin verilen toplam operatör sayısı	OP
	Bir istasyona atanabilecek en fazla operatör sayısı	RP
Karar Değişkenleri	Çevrim zamanı	C
	i görevi k istasyonuna atanmışsa 1; değilse 0	x_{ik}
	k istasyonu açılmışsa 1; değilse 0	z_k
	Eğer i görevinin atandığı istasyon değişmiş ise 1; değilse 0	f_i

Burada sunulan notasyon ilerleyen bölümlerde de aynı şekilde kullanılacaktır.

3.1.2 Matematiksel Model

Karışık modellenli tip-E montaj hattı dengeleme problemi için geliştirilen karışık tamsayılı doğrusal olmayan matematiksel model aşağıdaki gibidir:

Amaç Fonksiyonu:

$$\min C \sum_{k=1}^{K_{max}} z_k \quad (3.1)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{k=1}^{K_{max}} x_{ik} = 1 \quad \forall i \quad (3.2)$$

$$\sum_{i=1}^N t_{im} x_{ik} \leq C * z_k \quad \forall m, k \quad (3.3)$$

$$\sum_{k=1}^{K_{max}} k(x_{rk} - x_{sk}) \leq 0 \quad \forall (r, s) \in S \quad (3.4)$$

$$C \geq C_{min} \quad (3.5)$$

$$C \leq C_{max} \quad (3.6)$$

$$z_k \leq RP \quad \forall k \quad (3.7)$$

$$\sum_{k=1}^{K_{max}} z_k \leq OP \quad (3.8)$$

$$\sum_{i=1}^N f_i \leq B \quad (3.9)$$

$$x_{ik} - M_{ik} \leq f_i, \quad \forall i, k \quad (3.10)$$

$$z_{k-1} \geq z_k \quad \forall k \mid k \neq 1 \quad (3.11)$$

$$x_{ik}, f_i \in \{0,1\} \quad \forall i, k \quad (3.12)$$

$$C, z_k \in \mathbb{Z}^+ \quad (3.13)$$

Amaç fonksiyonu (3.1), hat etkinliği hesaplamasında kullanılan, çevrim süresi ve açılmış olan istasyon sayısının çarpımını minimize eder. Kısıt (3.2) her bir görevin toplamda sadece bir istasyona atanmasını garanti eder. Görevler sadece bir istasyonda işlem görebileceği için sadece bir istasyona atanmalıdır. Kısıt (3.3) ise her bir istasyona her bir model tipi için atanmış görevlerin toplam işlem süresinin çevrim süresini aşmamasını sağlar. Bunun için istasyonun açık olup olmaması önemlidir çünkü görevler sadece açık istasyonlara atanmaktadır. Dolayısıyla, açık olan istasyonlara atanmış görevlerin toplam işlem süresine bakılmaktadır. Kısıt (3.4) ise öncelik ilişkilerinin ihlal edilmemesini sağlar. Kısıt (3.5) çevrim süresinin

alabileceği en küçük değeri ifade ederken Kısıt (3.6) çevrim süresinin alabileceği maksimum değeri ifade eder. Kısıt (3.7) bir istasyona atanacak operatör sayısının önceden belirlenen operatör sayısını (RP)'yi aşmamasını ifade eder. Kısıt (3.8) kurulacak istasyonlara atanacak toplam operatör sayısını işletme kaynakları açısından kurulan hat üzerinden görevlendirilecek toplam operatör sayısını aşmamasını sağlar. Eğer r görevi s görevinin komşu öncülü ise r görevinin işlemi bitmeden s görevinin işlemi başlayamaz. Yeniden hat dengelemede yapılan toplam değişiklik sayısı maksimum izin verilen değişik sayısı kadar olabilir. Bu durum kısıt (3.9) ile ifade edilmektedir. Kısıt (3.10) ise her bir görevin mevcut durumda ve yeniden dengelenmiş durumda aynı istasyona atanıp atanmadığını kontrol eden kısıttır. Eğer bir görev mevcut durumda atanmış olduğu istasyondan farklı bir istasyona atanıyor ise değişik olmuş demektir. Kısıt (3.11) ise görevlerin istasyonlara sıralı bir şekilde atanmasını sağlamaktadır. Kısıt (3.12) ve kısıt (3.13) ise modelin karar değişkenlerinin değer aralıklarını tanımlar.

3.2 rMILP

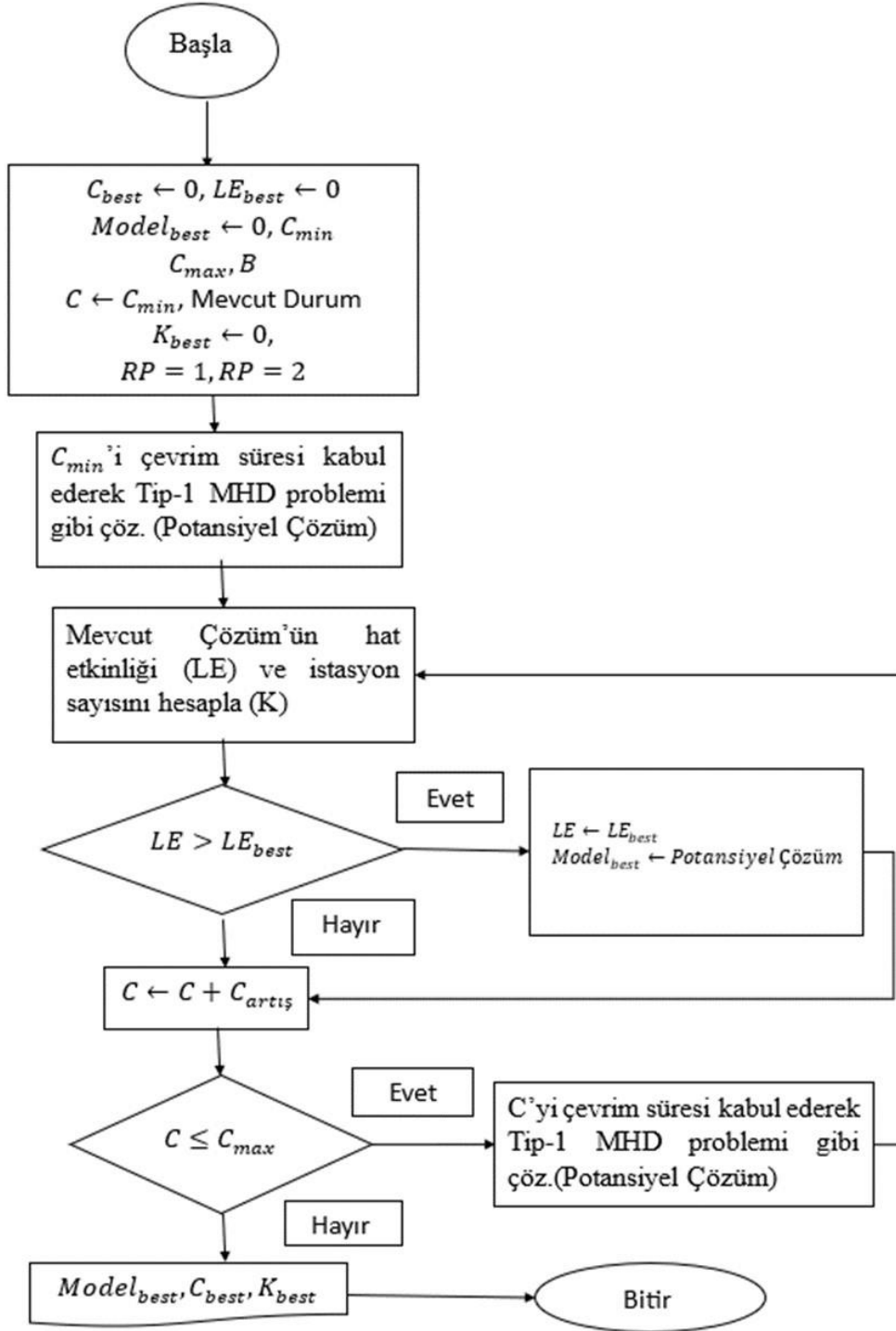
KMHD-E problemine önerilmiş olan MINLP modeli 3.1 bölümünde detaylı olarak açıklanmıştır. Önerilen modelin doğrusal olmamasından ve karmaşıklığından dolayı büyük boyutlu problemlerde makul bir sürede optimal çözüm elde edilememektir. MINLP model ile sadece küçük boyutlu problemler çözülebilmektedir. Modelin uygulamalarıyla ilgili detaylar bölüm 4.1'de verilmiştir. Bundan dolayı, büyük boyutlu problemleri çözebilmek adına MINLP modele sezgisel bir algoritma entegre edilmiştir. Önerilen model, rMILP ile ifade edilmektedir. rMILP modeli için kullanılmış notasyon, kümeler, parametreler ve karar değişkenleri, MINLP modeli için kullandığımız notasyonun genel olarak aynıdır. Tek değişiklik, çevrim süresinin rMILP modelinde karar değişkeni olarak tanımlanmamasıdır. Başka bir ifade ile çevrim süresinin karar değişkeni olarak tanımlanmaması modeli Tip-1 MHD problemi haline dönüştürmüştür. Çevrim süresi C_{min} ve C_{max} değerleri arasında değer alabilir. Matematiksel model çevrim süresi C_{min} ve C_{max} arasındaki her değer için iteratif bir şekilde çalıştırılmıştır. Çevrim süresinin karar değişkeni olarak tanımlanmaması modelin amaç fonksiyonunu doğrusallaştırmıştır. Sonuç olarak, MINLP modeli doğrusallaştırılıp iteratif şekilde çalıştırılarak rMILP modeli geliştirilmiştir.

Önerilmiş olan model verilen bir probleme uygulanırken takip edilen adımlar aşağıdaki Şekil 3.1'de gösterildiği gibidir. Öncelikle verilen problem özelinde minimum (C_{min}) ve maksimum (C_{max}) çevrim süresi belirlenir. Minimum çevrim süresi verilen problemdeki

görevlerin işlem sürelerinin altında kalmayacak şekilde belirlenir. Maksimum çevrim süresi ise üretim hızının çok düşmemesi amaçlı belirli bir aralıkta alınmaktadır. Aynı zamanda, mevcut olan montaj hattında yapılabilecek olan maksimum değişiklik sayısı belirlenir. Mevcut durum M_{ik} , her problem özelinde tanımlı olan görev ve görev sürelerine göre istasyon sayısı minimize edilecek şekilde alınmıştır. Sonrasında ise geliştirilen model, çevrim süresini verilmiş olan minimum çevrim süresi kabul ederek çözülür. Elde edilen çözümün hat etkinliği mevcut montaj hattının hat etkinliğinden daha iyi olup olmadığı kontrol edilir. Eğer daha iyi bir çözüm bulunmuş ise algoritma elde edilmiş çözüm ile çevrim süresini bir arttırarak devam eder. Eğer mevcut durumun hat etkinliği daha iyi ise bu durumda algoritma mevcut durumdaki çözüm ile çevrim süresini bir arttırarak devam eder. Bu durum çevrim süresi maksimum çevrim süresine eşit oluncaya kadar devam eder. Çevrim süresi maksimum çevrim süresine geldiğinde ise algoritma durur ve o zamana kadar elde edilmiş olan en iyi çözümün hat etkinliği, çevrim süresi ve istasyon sayısı raporlanır. Akış diyagramında kullanılan terimlerin anlamları aşağıdaki gibidir.

Tablo 3.2: rMILP tarafından kullanılan değişkenler.

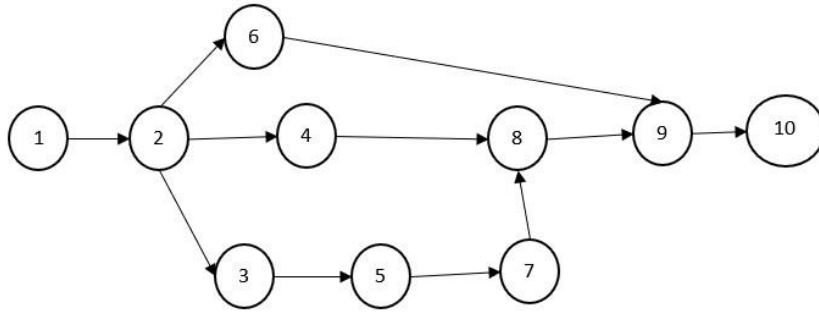
C_{best}	Programda tutulan en iyi çevrim süresi değeri
K_{best}	Programda tutulan en iyi istasyon sayısı değeri
$Model_{best}$	Modelin en iyi çözümü



Şekil 3.1: Geliştirilen algoritmaya ait akış diyagramı.

3.3 Sayısal Örnek

Bu bölümde örnek olarak az sayıda görevden oluşan bir problem önerilen modeller kullanılarak çözülecektir. P-10 veri seti 10 görev ve 2 farklı modelden oluşmaktadır [9]. Aşağıda verilen Şekil 3.2’de görevlerin öncelik ilişkisi diyagramı gösterilmektedir. Öncelik ilişkisi diyagramında verilen her bir düğüm görevi temsil ederken, her bir ok ise öncelik ilişkisini göstermektedir. Aynı zamanda veri setine ait görev süreleri ve talep oranları ekte Tablo A.1 ve Tablo A.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2: P-10 veri seti öncelik ilişkileri diyagramı.

3.3.1 P-10 Veri Seti/1 Operatör

Geliştirilen model, P-10 örnek veri seti kullanılarak çalıştırılmıştır. P-10 örnek veri seti için kullanılan parametreler Tablo 3.3’ de verilmiştir. Bir istasyona en fazla atanabilecek operatör sayısı (RP)’ de göz önüne alınıp önce 1 operatör daha sonrasında 2 operatör için çözümlere bakılmıştır. 1 operatör ve 2 operatör için aynı parametreler kullanılmıştır. Kullanılan parametreler daha önce bahsedildiği gibi Tablo 3.3’te verilmiştir. İzin verilen maksimum değişiklik sayısı, B değeri, 0’dan yani mevcut durum (hat yeniden dengelenmeden önceki durum)’dan başlatılarak $\{1, 2, \dots, I\}$ ’ye kadar arttırılarak model farklı B değerleri için çalıştırılmıştır. Program P-10 veri seti için 10 defa çalıştırılmıştır ve çıktılar alınmıştır. Program optimum sonucu $RP=1$ için 0,01sn’ de ve $RP = 2$ için 0,02sn gibi kısa bir sürede elde etmiştir.

Tablo 3.3: P-10 veri seti $RP=1$ ve $RP=2$ için kullanılan parametreler.

Parametreler	Değerler
C_{min}	9
C_{max}	13
K_{max}	6
OP	6

Tablo 3.4 incelendiğinde $RP = 1$ durumundayken B değerlerine bağlı olarak istasyon sayısının ve hat etkinliğinin değişimini görebilmekteyiz. $B = 0$ değeri mevcut durumda hiçbir değişiklik yapılmadığını göstermektedir. Bu durumda istasyon sayısı 6 iken çevrim zamanı 9 olup hat etkinliği değeri %87.03'tür. Tablo 3.4'e bakıldığında B değeri arttıkça mevcut durumun hat etkinliğinin arttığı görülmüştür. Örneğin $B = 7$ değeri için istasyon sayısı 5 iken çevrim zamanı 10 olup hat etkinliği %94'tür. $B = 10$ değeri için istasyon sayısı 5 iken çevrim zamanı 10 hat etkinliği %94'tür.

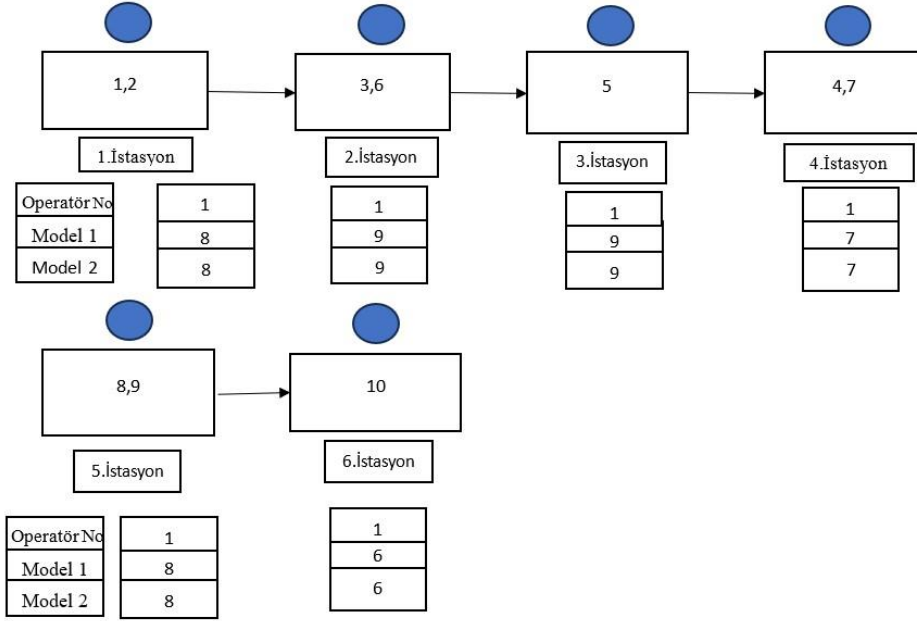
Tip-E problemi Bölüm 2.4.1'de bahsedildiği gibi çevrim süresini ve istasyon sayısını aynı anda minimize etmeyi amaçlamaktadır. Buna istinaden, aşağıdaki Tablo 3.4'te görüldüğü üzere açılan istasyon ve çevrim zamanı çarpımını minimize edilmiştir. Bu sonuçlar programımızın doğruluğunu kanıtlar niteliktedir. Bu tabloda değişimlerin açıklayıcı olması amacıyla sadece değişim yaratan B değerleri raporlanmıştır. Aynı şekilde, sonraki test problemlerinin sonuçlarında da sadece değişim yaratan B değerleri raporlanmıştır.

Tablo 3.4: P-10 veri seti $RP=1$ için model sonuçları.

B	Çevrim Zamanı	OP	İstasyon Sayısı	$OP * C$	LE (%)
0	9	6	6	54	87.03
7	10	5	5	50	94*
10	10	5	5	50	94*

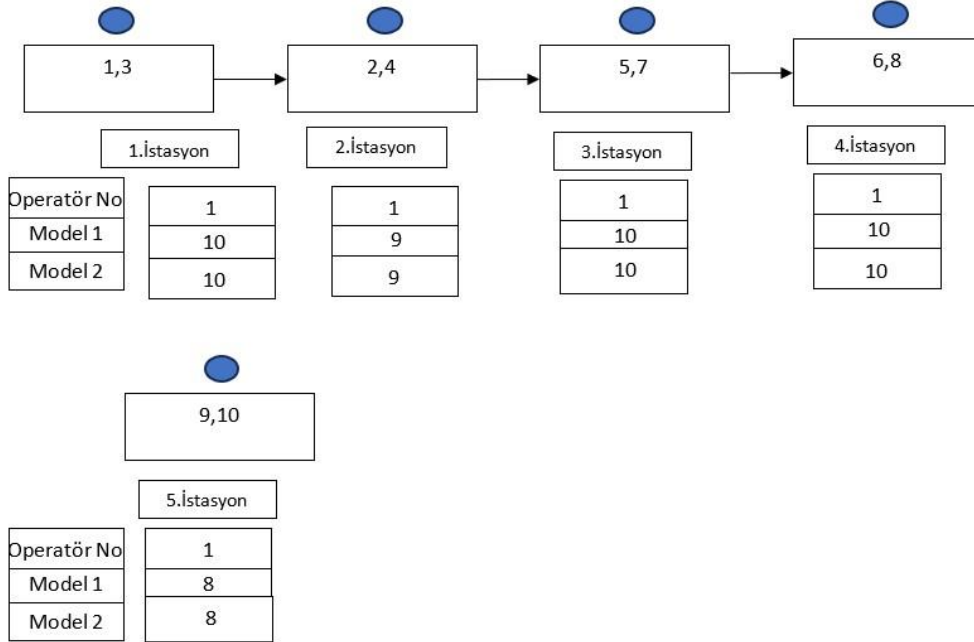
* OP : Dengeleme sonucu atanmış olan toplam operatör sayısı

Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te sırasıyla, $RP = 1$ için mevcut durum (hat etkinliği maksimize edilmeden önceki) ve önerilen durum (hat etkinliği maksimize edilmiş olan) verilmiştir. Belirtilen durumların atamaları, iş yüklerinin istasyonlara dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 3.3: P-10 veri seti $RP=1$ için mevcut durum.

Şekil 3.3'de iş istasyonlarının mevcut durumu görülmektedir. Mavi işaretli yuvarlak şekiller istasyona atanmış operatör sayısını göstermektedir. Örneğin 1. istasyona, 1 ile 2 görevleri ve 1 operatör atanmıştır. Her istasyonun iş yükleri toplamı model bazında hesaplanmıştır ve istasyonların altındaki kutucuklarda model 1 ve model 2 için raporlanmıştır.



Şekil 3.4: P-10 veri seti $RP=1$ için yeniden dengelenmiş montaj hattı.

Şekil 3.4'de iş istasyonları optimal durumu (veri seti için, adım büyüklüğü, $C_{artış}$, bir olmasından dolayı çevrim süresinin C_{min} ve C_{max} arasındaki her bir değeri rMILP modeli çalıştırılmaktadır dolayısıyla modelin optimal sonucu verdiği gözlemlenmiştir.) ve optimal durumda toplamda 5 istasyon bulunmaktadır. Eğer bir görev mevcut durumda ve optimal durumda aynı istasyona atanmış ise bu görevin atanmasında herhangi bir değişiklik olmamış demektir fakat herhangi bir görev optimal durumda mevcut durumda atandığından farklı bir istasyona atanmış ise bu görevin atanmasında bir değişiklik olduğunu göstermektedir. Bu duruma istinaden, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'e baktığımızda toplam değişiklik sayısının 7 olduğunu görmekteyiz. Yapılan değişimlerin, çevrim süresini ve izin verilen maksimum değişiklik sayısını aşmadığı ve öncelik ilişkilerine uygun olarak değiştiği görülmektedir. İstasyon iş yükleri incelendiği zaman ise istasyonların boş zamanlarının minimize edilip hat etkinliğinin maksimize edildiği görülmektedir. Mevcut durumdaki hat etkinliği %87.03 iken optimal durumda hat etkinliği %94'ye çıkarılmıştır. Mevcut durumda toplam istasyonların model bazında boş zamanlarına baktığımızda, model 1 için ve model 2 için 3.5sn boş zamanı var iken optimal durumda model 1 ve model 2 için 1.5sn boş zamanı vardır. Bu durumda, istasyonların iş yüklerinin daha dengeli olup boş zamanlarının minimize edildiği görülmektedir.

3.3.2 P-10 Veri Seti/2 Operatör

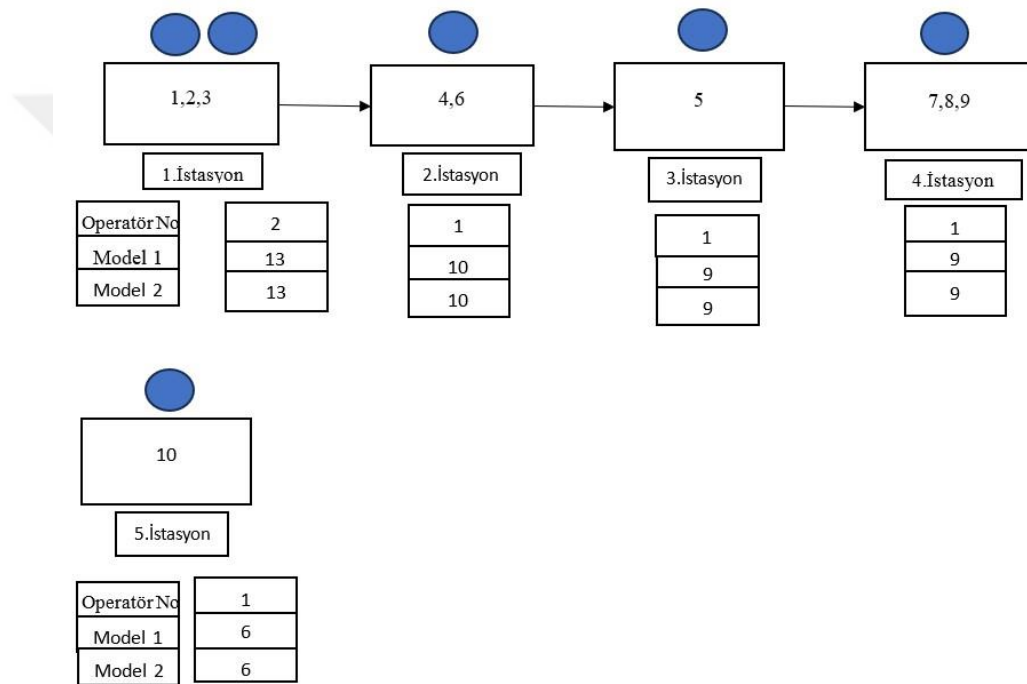
P-10 veri seti için Tablo 3.3'te verilen parametreler kullanılarak istasyonlara atanabilecek operatör sayısı ikiye çıkartılıp modelimiz çalıştırılmıştır. Tablo 3.5 incelendiğinde $RP = 2$ durumundayken B değerlerine bağlı olarak istasyon sayısının ve hat etkinliğinin değişimini görebilmekteyiz. $B = 0$ değeri için mevcut durumda istasyon sayısı 6 iken çevrim zamanı 10 olup hat etkinliği değeri %78.33'tür. Tablo 3.5'e bakıldığında B değeri arttıkça mevcut durumun hat etkinliğinin arttığı görülmüştür. Örneğin $B = 1$ değeri için istasyon sayısı 6 iken çevrim zamanı 9 olup hat etkinliği %87.03'tür. $B = 5$ anında ise istasyon sayısı 4 iken çevrim zamanı 12 hat etkinliği %97.91'dir. Aynı zamanda modelin sonuçları Tablo 3.5'te detaylı olarak verilmektedir. Tablo 3.5'te görüldüğü üzere açılan istasyon ve çevrim zamanı çarpımı minimize edilmiştir.

Tablo 3.5: P-10 veri seti $RP=2$ için model sonuçları.

B	Çevrim Zamanı	İstasyon Sayısı	OP	OP*C	LE (%)
0	10	5	6	60	78.33
1	9	5	6	54	87.03
4	10	4	5	50	94.00
5	12	2	4	48	97.91*
10	12	2	4	48	97.91*

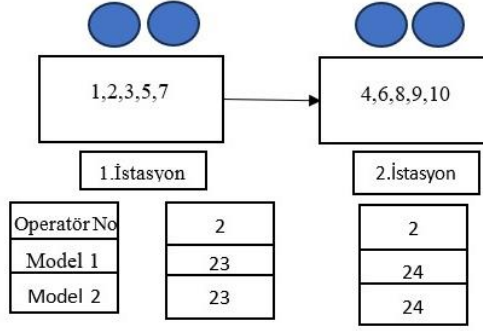
*OP: İzin verilen toplam operatör sayısı

Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da sırasıyla, $RP = 2$ için mevcut durum ve önerilen durum verilmiştir.



Şekil 3.5: P-10 veri seti $RP=2$ için mevcut durum.

Şekil 3.5'de iş istasyonlarının mevcut durumu görülmektedir. Mavi işaretli yuvarlak şekiller istasyona atanmış operatör sayısını göstermektedir. Örneğin 1. istasyona, 1,2 ve 3 görevleri ve 2 operatör atanmıştır.



Şekil 3.6: P-10 veri seti $RP=2$ için yeniden dengelenmiş montaj hattı.

Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'a baktığımızda toplam değişiklik sayısının 5 olduğunu görmekteyiz. Yapılan değişimlerin, çevrim süresini ve izin verilen maksimum değişiklik sayısını aşmadığı ve öncelik ilişkilerine uygun olarak değiştiği görülmektedir. İstasyon iş yükleri incelendiği zaman ise istasyonların boş zamanlarının minimize edilip hat etkinliğinin maksimize edildiği görülmektedir. Mevcut durumdaki hat etkinliği %78.33 iken optimal durumda hat etkinliği %97.91'e çıkarılmıştır. Mevcut durumda toplam istasyonların model bazında boş zamanlarına baktığımızda, model 1 ve model 2 için boş zamanı 6.5sn iken optimal durumda model 1 için ve model 2 için 1sn'dir. Bu durumda, istasyonların iş yüklerinin daha dengeli olup boş zamanlarının minimize edildiği görülmektedir. Bakıldığında operatör sayısı arttıkça kapasitenin de doğru orantılı bir biçimde arttığı ve buna bağlı olarak hat etkinliğinin de arttığı gözlemlenmiştir.

Bu bölümde problemimizin tanımını, matematiksel model, iş akış diyagramı verilmiştir. Bundan sonraki bölüm uygulama bölümüdür. Model ile ilgili küçük bir örnek ve modelin veri setleri ile test edilmesini içermektedir.

3.4 Bölüm Sonu Değerlendirmesi

Metot bölümünde karışık modelli tip-E montaj hattı dengeleme problemi için geliştirilen MINLP modeli verilmiştir. Modelin parametreleri, değişkenleri, amaç fonksiyonu ve kısıtları detaylı olarak açıklanmıştır. Daha sonrasında MINLP modelinin kısıtlamalarından bahsedilmiş ve rMILP sezgisel algoritması önerilmiştir. Önerilen sezgisel algoritmanın akış diyagramı verilerek her bir adımı detaylı olarak açıklanmıştır ve önerilen algoritmanın küçük bir örnekteki uygulamasının sonuçları verilmiştir.

4. DENEYSEL TESTLER

Bu bölüme kadar montaj hattı dengelemedeki kavramlardan, montaj hattı dengeleme problemlerinin sınıflandırılmasından, öneminden, problemin karmaşık yapısından bahsedilmiştir. Daha sonrasında bu çalışmada odaklanılan karışık modellenmiş montaj hattı kullanımının avantajlarından, konuyla ilgili yapılan çalışmalardan, tip-E montaj hattı dengelemenin neyi ifade ettiğinden ve problemimizin tam sayılı modellenmesinde yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Aynı zamanda, karışık tam sayılı doğrusal olmayan model ve kendi geliştirdiğimiz sezgisel entegre edilmiş karışık tam sayılı doğrusal matematiksel model verilmiştir ve modeller kıyaslanarak sezgisel entegre edilmiş olan modelimizin avantajlarından bahsedilmiştir.

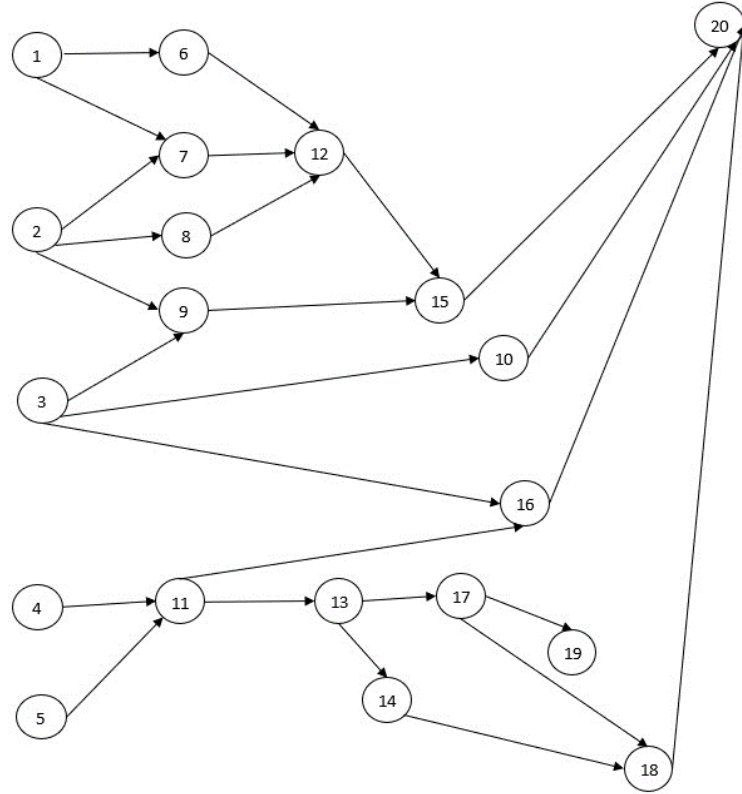
Bu bölümde geliştirilmiş olan matematiksel model Python programlama dilinde modellenip Gurobi Optimizer ile çözülmüştür. Hesaplama için kullanılan bilgisayar Intel(R) Core(TM) i5-10300H @ CPU @ 2.50GHz, 16 GB RAM'e sahiptir. Deneysel testler bölümünü iki ayrı konu başlığı altında ele alınmaktadır. Model; farklı boyutlardaki, farklı modellere ve farklı işlem sürelerine sahip halka açık veri setleri ile test edilmiştir [85]. Tezde kullanılan hat etkinliği ağırlıklı hat etkinliğidir. Ağırlıklı hat etkinliği denklem 4.1'deki formüldeki gibi hesaplanmaktadır.

$$WLE(\%) = \frac{(istasyon\ iş\ yükü * talep\ oranı)}{OP * C} \times 100 \quad (4.1)$$

Bundan sonraki bölümlerde kolaylık olması açısından ağırlıklı hat etkinliğinden, hat etkinliği olarak bahsedilecektir. İlk bölümde elimizde bulunan bütün farklı modellere sahip veri setleri rMILP ile çözülmüştür. Bu bölümde kullanmış olduğumuz veri setlerinin detayları, mevcut durum (hat dengelenmeden önceki hali) ve önerilen durum arasındaki farklar, istasyon sayısı, çevrim zamanı ve hat etkinliği değişimleri detaylı bir şekilde açıklanmakta ve farklı kriterler altında, kullanıcının değişiklik sayısını kısıtlayabilmesi ve hat üzerindeki operatör sayısının belirlenmesi gibi avantajlar sağlayarak hattın maksimize edildiğini göstermekteyiz.

4.1 P-19 Thomopoulos Test Problemi

P-19 thomopoulos veri seti 19 görev ve 3 farklı modelden oluşmaktadır. Aşağıdaki Şekil 4.1'de görevlerin öncelik ilişkisi diyagramı gösterilmektedir. Aynı zamanda veri setine ait görev süreleri ve talep oranları ekte Tablo A.3 ve Tablo A.4'te verilmiştir.



Şekil 4.1: P-19 thomopoulos veri seti öncelik ilişkileri diyagramı.

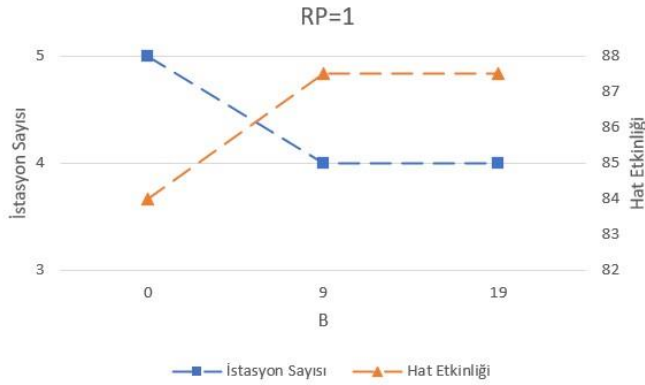
Geliştirilen model, P-19 thomopoulos veri seti kullanılarak çalıştırılmıştır. P-19 thomopoulos veri seti için kullanılan parametreler Tablo 4.1'de verilmiştir. İzin verilen maksimum değişiklik sayısı, B değeri, 0'dan yani mevcut durumdan başlatılıp $\{1, 2, \dots, I\}$ 'ye kadar 0.1 arttırılarak model farklı B değerleri için test edilmiştir. Program tüm veri setlerinde her bir B değeri için çalıştırılmıştır. Örnek olarak bu veri setinde toplamda 19 defa çalıştırılmıştır ve çıktılar alınmıştır. Program, $RP=1$ için optimum sonucu 0.029sn de ve $RP=2$ için 0.019sn gibi kısa bir sürede tamamlanmıştır.

Tablo 4.1: P-19 thomopoulos veri seti $RP=1$ ve $RP=2$ için kullanılan parametreler.

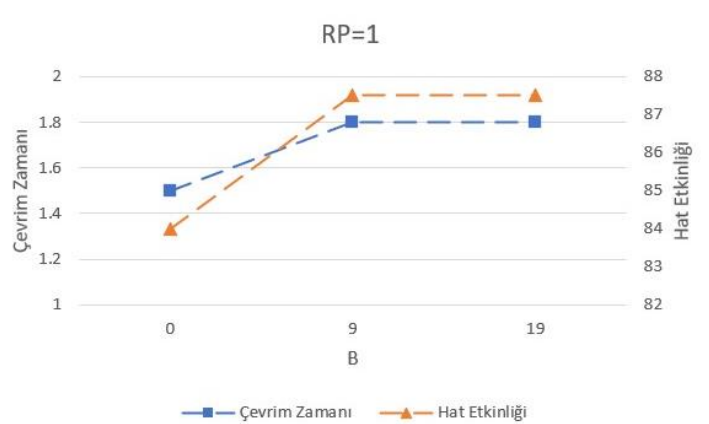
Parametreler	Değerler
C_{min}	1.5
C_{max}	3
K_{max}	5
OP	5

4.1.1 P-19 Veri Seti/ 1 Operatör

P-19 thomopoulos veri seti için Tablo 4.1’de verilen parametreler kullanılarak $RP=1$ için rMILP modeli çalıştırılmıştır. Şekil 4.2, her bir B değeri için istasyon sayısını ve hat etkinliğini göstermektedir. Şekil 4.3, her bir B değeri için çevrim süresi ve hat etkinliğini göstermektedir. B değerleri raporlanırken daha önce belirttiğimiz gibi sadece kırımlı yaratan B değerleri raporlanmıştır.



Şekil 4.2: $RP=1$ için B 'ye göre istasyon sayısı ve hat etkinliği değişimi.



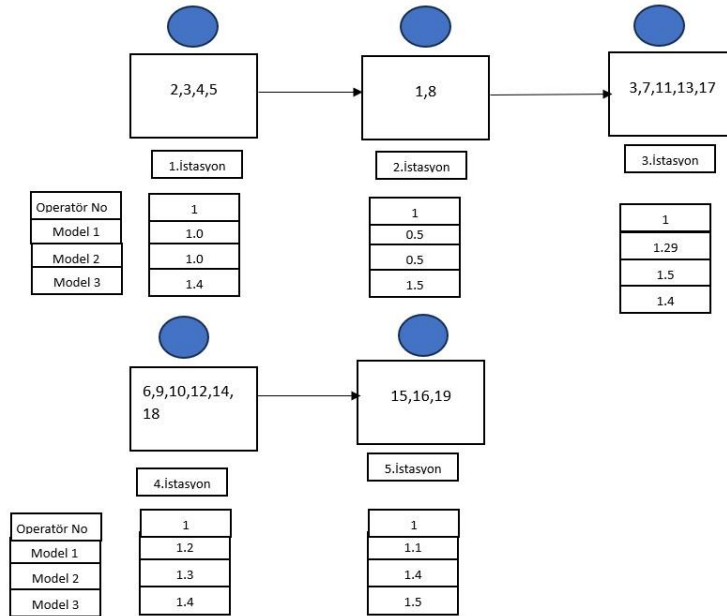
Şekil 4.3: $RP=1$ için B 'ye göre çevrim zamanı ve hat etkinliği değişimi.

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 incelendiğinde $RP = 1$ durumundayken B değerlerine bağlı olarak istasyon sayısının ve hat etkinliğinin değişimini görebilmekteyiz. $B = 0$ değeri için mevcut durumda istasyon sayısı 5 iken çevrim zamanı 1.5 olup hat etkinliği değeri %84'tür. Şekil 4.2'ye bakıldığında B değeri arttıkça mevcut durumun hat etkinliğinin arttığı görülmüştür. Örneğin $B = 9$ değeri için istasyon sayısı 4 iken çevrim zamanı 1.8 olup hat etkinliği %87.50'dir. $B = 19$ değeri için istasyon sayısı 4 iken çevrim zamanı 1.8 hat etkinliği %87.50'dir. Aynı zamanda bu sonuçlar Tablo 4.2'de raporlanmıştır ve Tablo 4.2'de görüldüğü üzere açılan istasyon sayısı ve çevrim zamanı çarpımı minimize edilmiştir. Bu sonuçlar programımızın etkin bir şekilde çalıştığını göstermektedir.

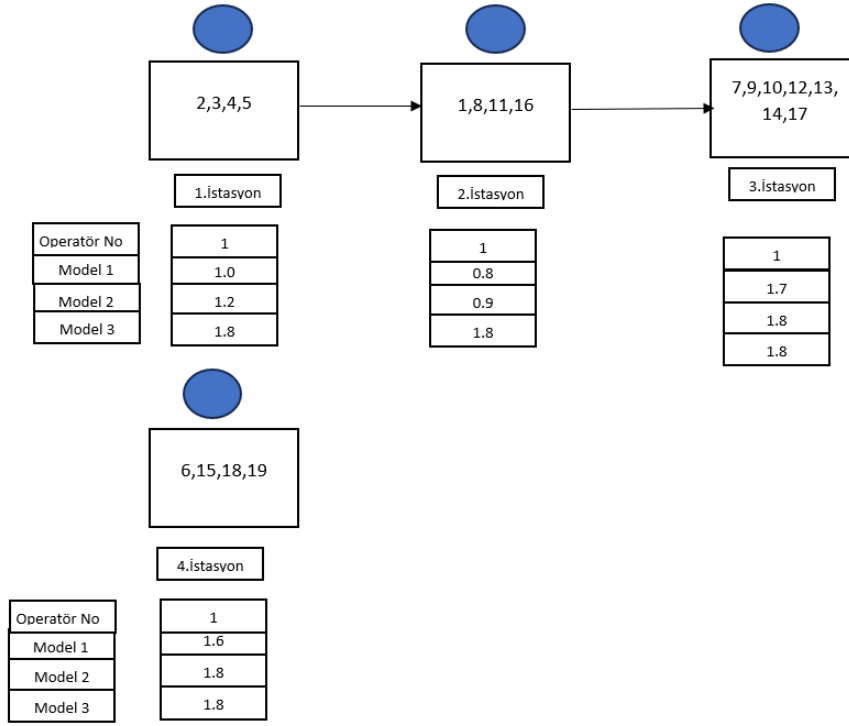
Tablo 4.2: P-19 thomopoulos veri seti $RP=1$ için model sonuçları.

B	Çevrim Zamanı	OP	İstasyon Sayısı	OP*C	LE (%)
0	1.5	5	5	7.5	84.00
9	1.8	4	4	7.2	87.50*
19	1.8	4	4	7.2	87.50*

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te $RP = 1$ için mevcut durum ve rMILP yöntemi en iyi çözümü verilmiştir.

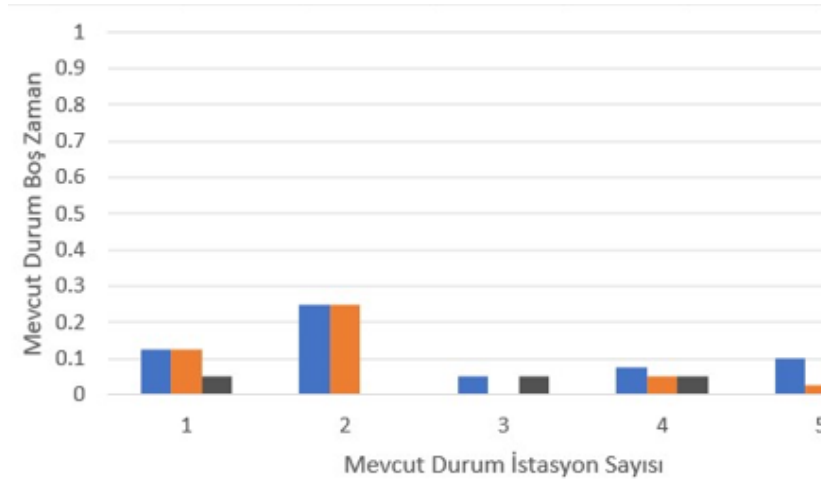


Şekil 4.4: P-19 thomopoulos veri seti $RP=1$ için mevcut durum.

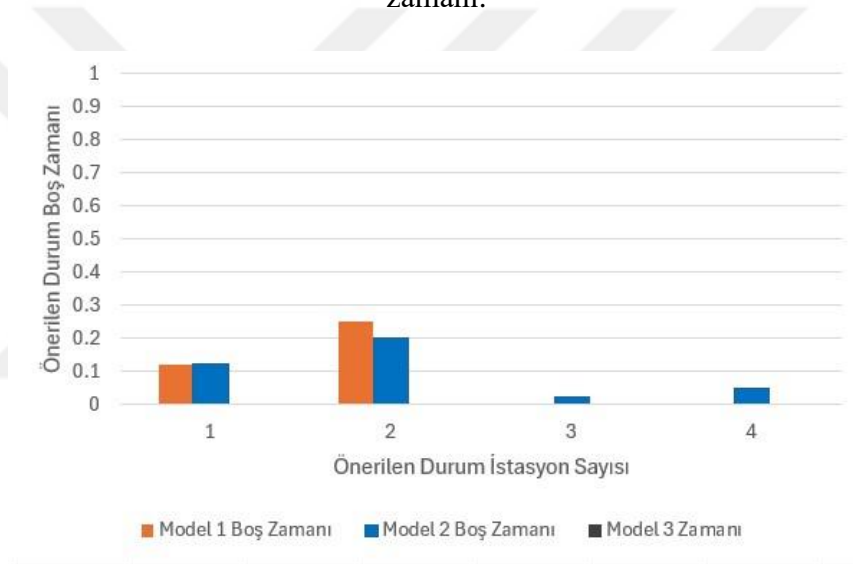


Şekil 4.5: P-19 thomopoulos veri seti $RP=1$ rMILP algoritması en iyi çözüm.

rMILP algoritması için en iyi olan çözümde açık olan istasyonlardan biri kapanmıştır ve toplamda 4 istasyon bulunmaktadır. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'e baktığımızda toplam değişiklik sayısının 9 olduğunu görmekteyiz. Yapılan değişimlerin, çevrim süresini ve izin verilen maksimum değişiklik sayısını aşmadığı ve öncelik ilişkilerine uygun olarak değiştiği görülmektedir. İstasyon iş yükleri incelendiği zaman ise istasyonların boş zamanlarının minimize edilip hat etkinliğinin maksimize edildiği görülmektedir. Mevcut durumdaki hat etkinliği %70 iken optimal durumda hat etkinliği %87.85'ye çıkarılmıştır. Mevcut durumda toplam istasyonların model bazında boş zamanlarına baktığımızda, model 1 için 0.602n ve model 2 için 0.45sn ve model 3 0.15sn iken optimal durumda model 1 için 0.475sn ve model 2 için 0.375sn ve model 3 için 0sn'dir. Bu durumda, istasyonların iş yüklerinin daha dengeli olup boş zamanlarının minimize edildiği görülmektedir. Aynı zamanda, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'ye bakıp mevcut durumun boş zamanının azaldığını gözlemleyebiliriz.



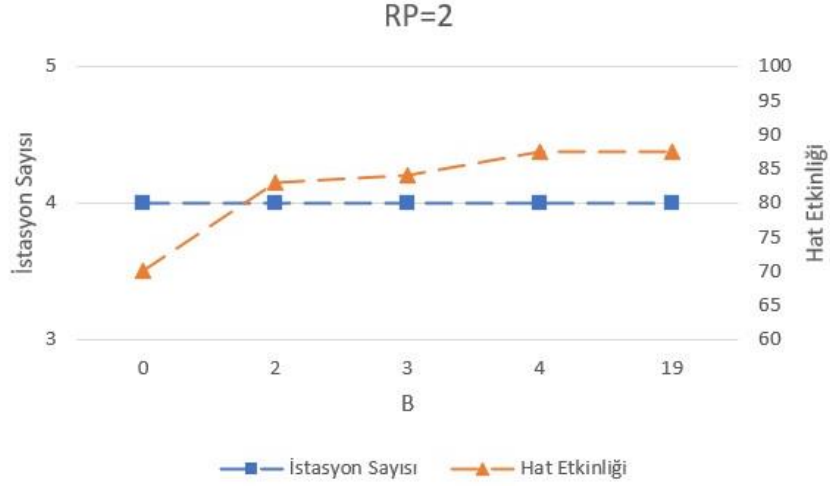
Şekil 4.6: P-19 thomopoulos veri seti $RP=1$ için mevcut durumda istasyonların boş zamanı.



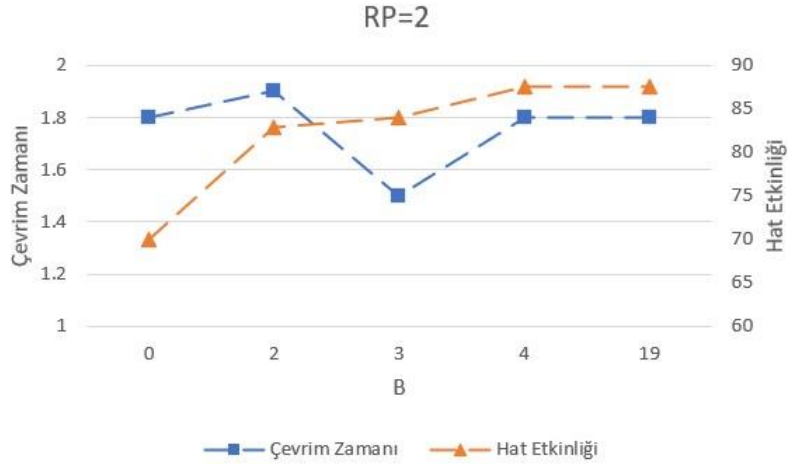
Şekil 4.7: P-19 thomopoulos veri seti $RP=1$ için rMILP algoritması en iyi çözüm boş zamanı.

4.1.2 P-19 Veri Seti/ 2 Operatör

P-19 veri seti için Tablo 4.1’de verilen parametreler kullanılarak istasyonlara atanabilecek operatör sayısı ikiye çıkartılıp rMILP modeli çalıştırılmıştır. Şekil 4.8, $RP = 2$ durumunda her bir B değeri için istasyon sayısını ve hat etkinliğini göstermektedir. Belirtilen istasyon sayısı, kullanılan toplam operatör sayısını da yansıtmaktadır. Örneğin, bir istasyona iki operatör atanmışsa, istasyonun kapasitesi iki katına çıkar ve bu nedenle belirtilen istasyon, iki istasyon olarak değerlendirilmektedir. Şekil 4.9, $RP = 2$ durumunda her bir B değeri için çevrim zamanı ve hat etkinliğini göstermektedir



Şekil 4.8: P-19 thomopoulos veri seti $RP=2$ için B 'ye göre istasyon sayısı ve hat etkinliği değişimi.



Şekil 4.9: P-19 thomopoulos veri seti için $RP=2$ için B 'ye göre çevrim zamanı ve hat etkinliği değişimi.

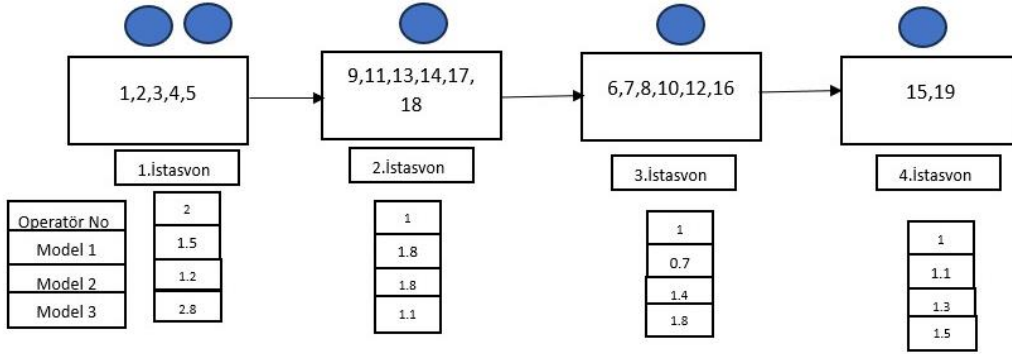
Şekil 4.8 ve Şekil 4.9, $RP = 2$ durumunda B değerlerine bağlı istasyon sayısının ve hat etkinliğinin değişimini göstermektedir. $B = 0$ değeri için mevcut durumda istasyon sayısı 4 iken çevrim zamanı 1.8 olup hat etkinliği değeri %70.00'dır. Şekil 4.8'e bakıldığında B değeri arttıkça mevcut durumun hat etkinliğinin arttığı görülmüştür. Örneğin $B = 2$ değeri için istasyon sayısı 4 iken çevrim zamanı 1.9 olup hat etkinliği %82.89'dur. $B = 4$ değeri için istasyon sayısı 4 iken çevrim zamanı 1.8 olup hat etkinliği %87.50'dir. Aynı zamanda bu sonuçlar Tablo 4.3'te raporlanmıştır ve Tablo 4.3'te görüldüğü üzere açılan istasyon sayısı ve çevrim zamanı çarpımı minimize edilmiştir. Çoklu operatör kullanılan

problemlerde istasyon sayısı toplam operatör sayısı olarak kabul edilmektedir, örneğin bir istasyona iki operatör atandığı durumda istasyonun kapasitesinin iki katına çıkmasından dolayı bu istasyon iki istasyon olarak düşünülür.

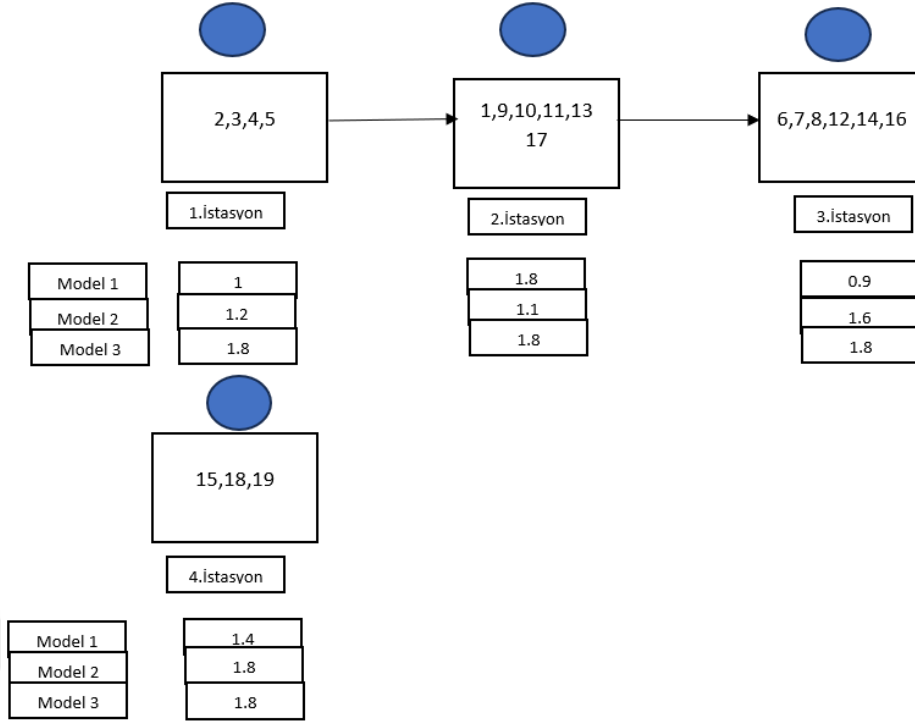
Tablo 4.3: P-19 thomopoulos veri set $RP=2$ için model sonuçları.

B	Çevrim Zamanı	İstasyon Sayısı	OP	OP*C	LE (%)
0	1.8	4	5	9	70.00
2	1.9	4	4	7.6	82.89
3	1.5	4	5	7.5	84.00
4	1.8	4	4	7.2	87.50*
19	1.8	4	4	7.2	87.50*

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11 de $RP = 2$ için mevcut durum ve rMILP algoritması en iyi çözüm verilmiştir.

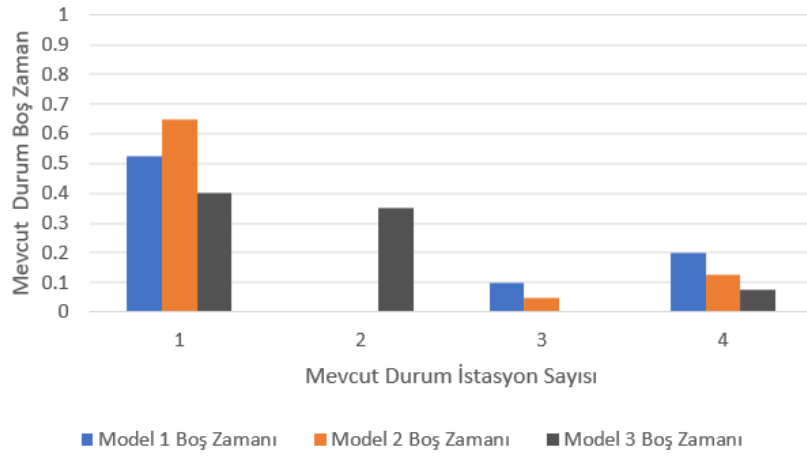


Şekil 4.10: P-19 thomopoulos veri seti $RP=2$ için mevcut montaj hattı.

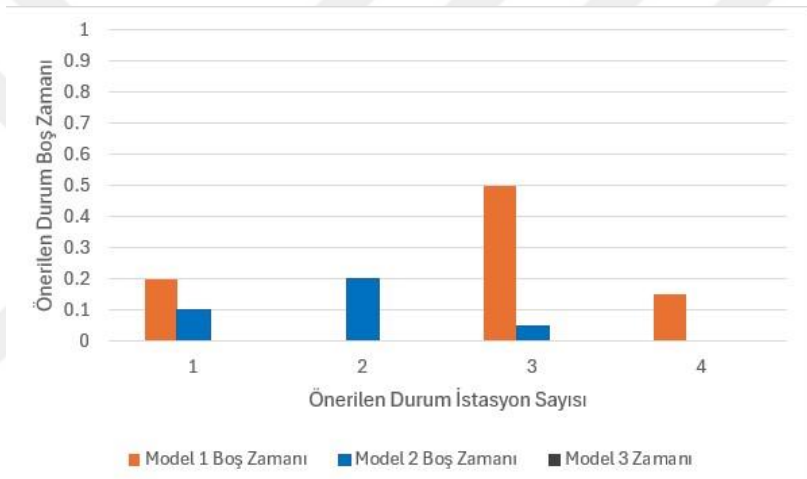


Şekil 4.11: P-19 thomopoulos veri seti $RP=2$ için rMILP algoritması en iyi çözüm.

rMILP algoritması için en iyi çözümde Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'e baktığımızda toplam değişiklik sayısının 4 olduğunu görmekteyiz. Yapılan değişimlerin, çevrim süresini ve izin verilen maksimum değişiklik sayısını aşmadığı ve öncelik ilişkilerine uygun olarak değiştiği görülmektedir. İstasyon iş yükleri incelendiği zaman ise istasyonların boş zamanlarının minimize edilip hat etkinliğinin maksimize edildiği görülmektedir. Mevcut durumdaki hat etkinliği %70 iken rMILP algoritması için en iyi çözümde hat etkinliği %87.85'ye çıkarılmıştır. Mevcut durumda toplam istasyonların model bazında boş zamanlarına baktığımızda, model 1 için 825sn ve model 2 için 0.825sn ve model 3 0.825sn iken rMILP algoritması için en iyi çözümde model 1 için 0.75sn ve model 2 için 0.375sn ve model 3 için 0sn'dir. Bu durumda, istasyonların iş yüklerinin daha dengeli olup boş zamanlarının minimize edildiği görülmektedir. Aynı zamanda, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'ye bakıp mevcut durumun boş zamanının azaldığını gözlemleyebiliriz.



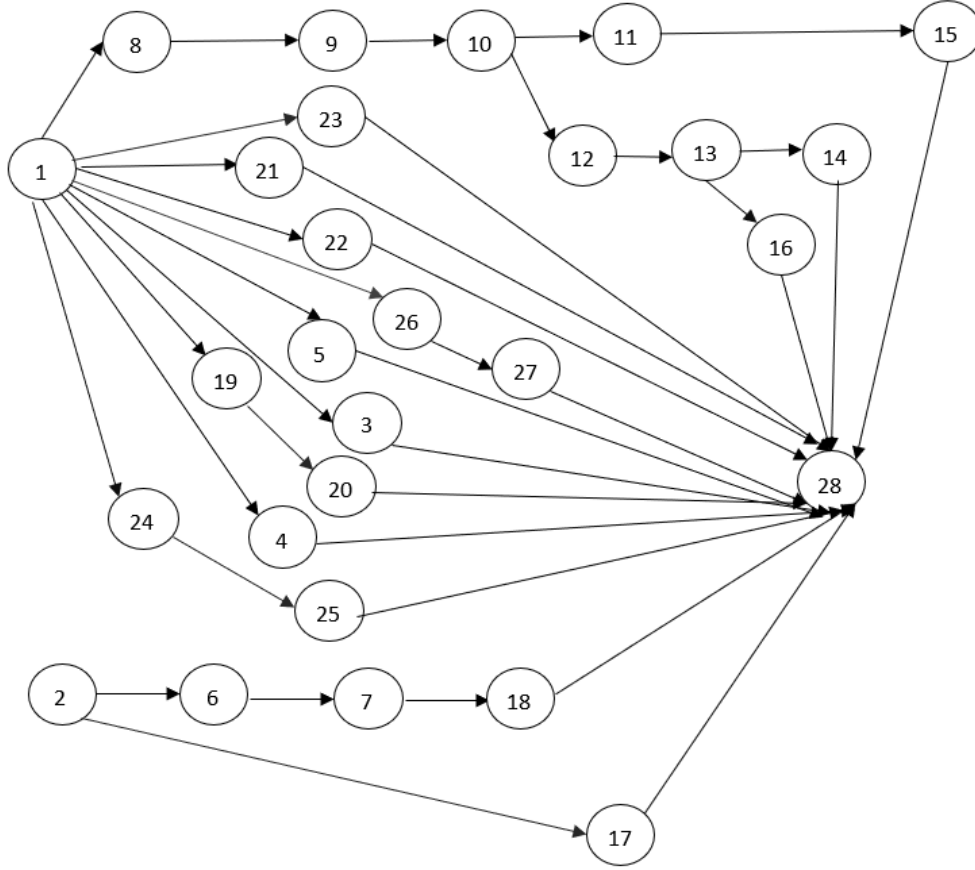
Şekil 4.12: P-19 thomopoulos veri seti $RP=2$ için mevcut durumda istasyonların boş zamanı.



Şekil 4.13: P-19 thomopoulos veri seti $RP=2$ için yeniden dengelenmiş durumda istasyonların boş zamanı.

4.2 P-28 Heskia Test Problemi

P-28 heskia veri seti 28 görev ve 2 farklı modelden oluşmaktadır. Aşağıdaki Şekil 4.14'te görevlerin öncelik ilişkisi diyagramı gösterilmektedir. Aynı zamanda veri setine ait görev süreleri ve talep oranları ekte Tablo A.5 ve Tablo A.6'da verilmiştir.



Şekil 4.14: P-28 heskia veri seti öncelik ilişkileri diyagramı.

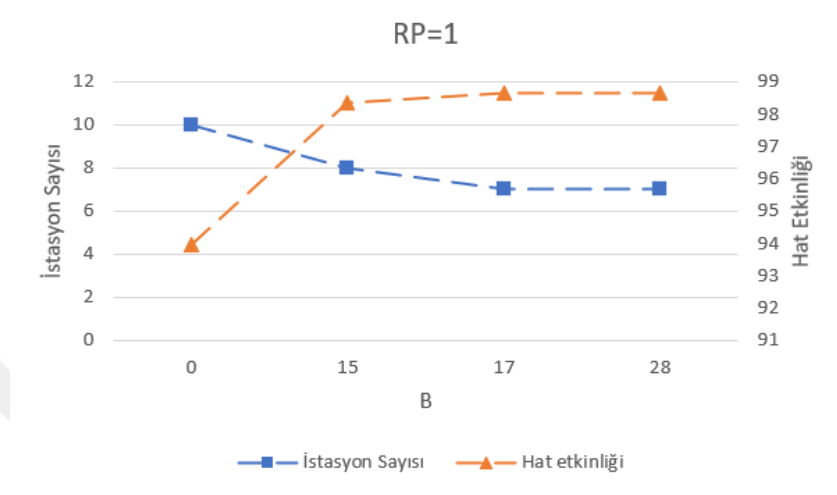
P-28 heskia veri seti için kullanılan parametreler Tablo 4.4'te verilmiştir. İzin verilen maksimum değişiklik sayısı, B değeri, 0'dan yani mevcut durumdan başlatılıp $\{1, 2, \dots, I\}$ 'ye kadar arttırılarak model farklı B değerleri için test edilmiştir. Bu veri setinde toplam 28 defa çalıştırılmıştır ve çıktılar alınmıştır. Program, $RP = 1$ için optimum sonucu 6.78sn'de ve $RP=2$ 6.10sn gibi kısa bir sürede elde etmiştir.

Tablo 4.4: P-28 heskia veri seti $RP=1$ ve $RP=2$ için kullanılan parametreler.

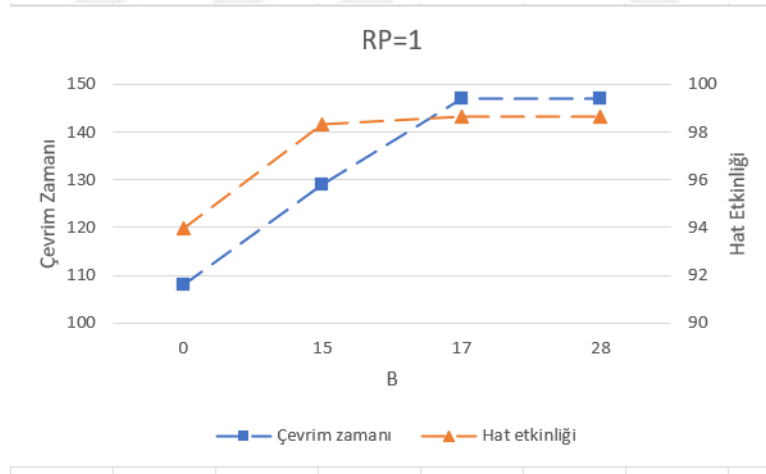
Parametreler	Değerler
C_{min}	108
C_{max}	162
K_{max}	13
OP	13

4.2.1 P-28 Veri Seti/ 1 Operatör

P-28 heskia veri seti için Tablo 4.4'te verilen parametreler kullanılarak $RP=1$ için rMILP modeli çalıştırılmıştır. Şekil 4.15, her bir B değeri için istasyon sayısını ve hat etkinliğini göstermektedir. Şekil 4.16, her bir B değeri için çevrim süresi ve hat etkinliğini göstermektedir.



Şekil 4.15: P-28 heskia veri seti $RP=1$ için B 'ye göre istasyon sayısı ve hat etkinliği değişimi.



Şekil 4.16: P-28 heskia veri seti $RP=1$ için B 'ye göre çevrim zamanı ve hat etkinliği değişimi.

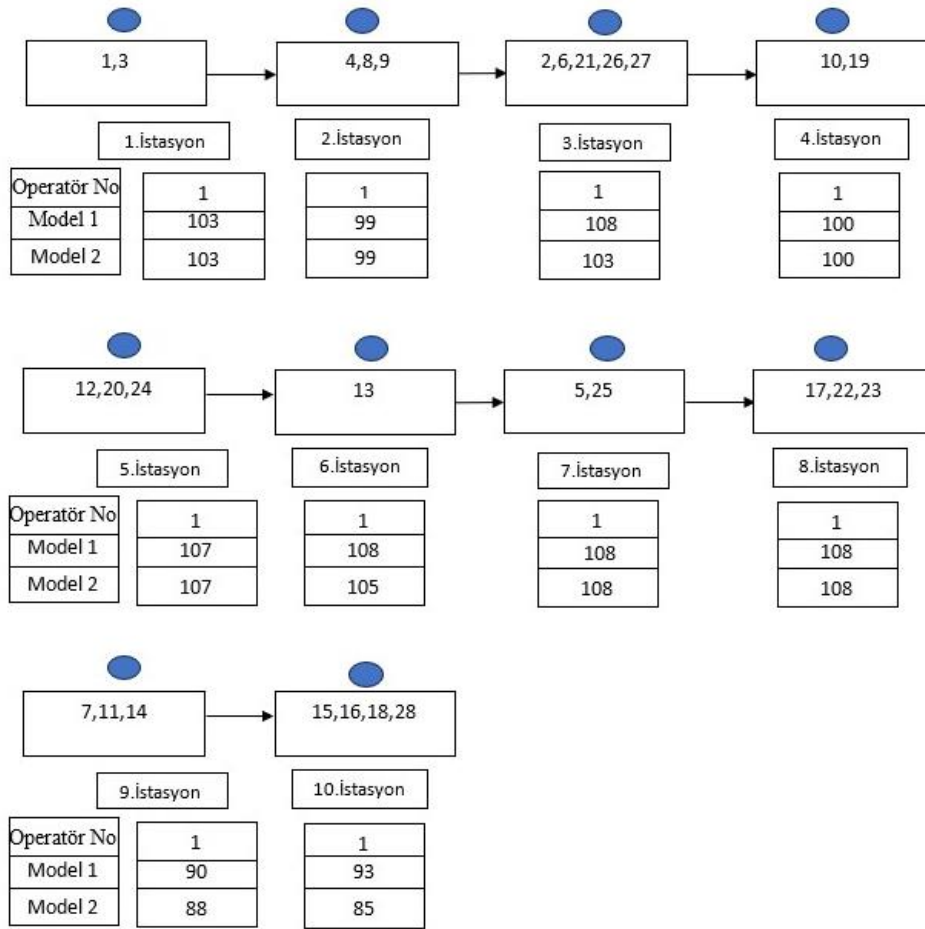
Şekil 4.15 ve Şekil 4.16, $RP = 1$ durumunda B değerlerine bağlı istasyon sayısının ve hat etkinliğinin değişimini göstermektedir. $B = 0$ değeri için mevcut durumda istasyon sayısı 10 iken çevrim zamanı 108 olup hat etkinliği %93.98'dir. Şekil 4.15'e bakıldığında B değeri arttıkça mevcut durumun hat etkinliğinin arttığı görülmüştür. Örneğin $B = 15$ değeri için

istasyon sayısı 8 iken çevrim zamanı 129 olup hat etkinliği %98.35'tir. $B = 17$ anında istasyon sayısı 7 iken çevrim zamanı 147 hat etkinliği %98.63'tür. Aynı zamanda, bu sonuçlar Tablo 4.5'te raporlanmıştır ve Tablo 4.5'te görüldüğü üzere açılan istasyon sayısı ve çevrim zamanı çarpımı minimize edilmiştir.

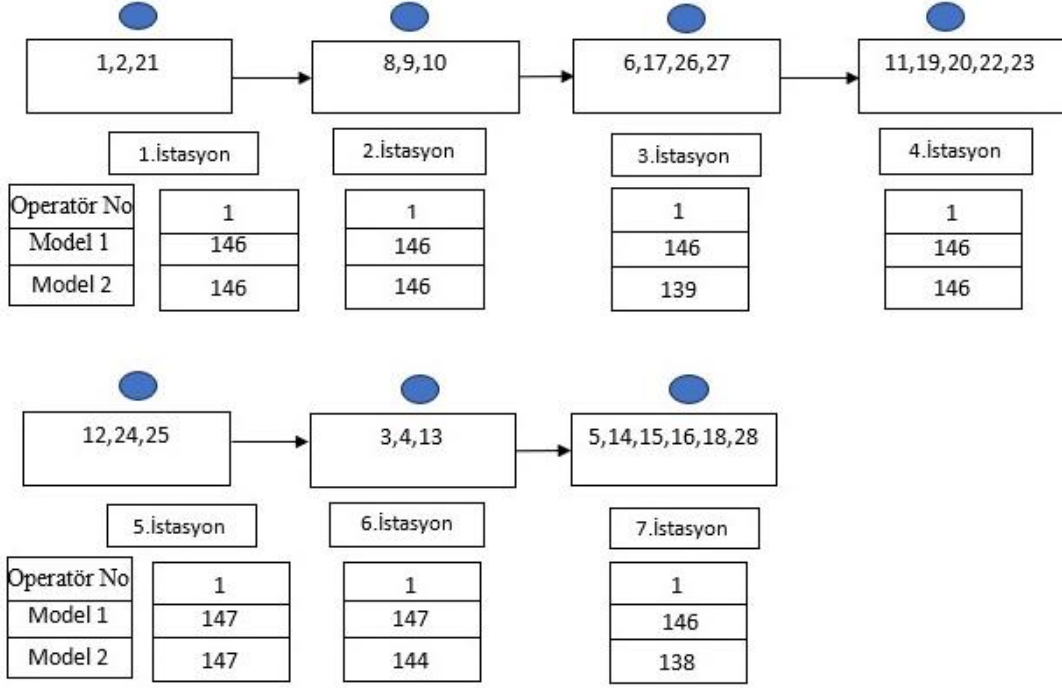
Tablo 4.5: P-28 heskia veri seti $RP=1$ için model sonuçları.

B	Çevrim Zamanı	OP	İstasyon Sayısı	OP*C	LE (%)
0	108	10	10	1080	93.98
15	129	8	8	1032	98.35
17	147	7	7	1028	98.63*
28	147	7	7	1028	98.63*

Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de $RP = 1$ için mevcut durum ve optimal durum verilmiştir.

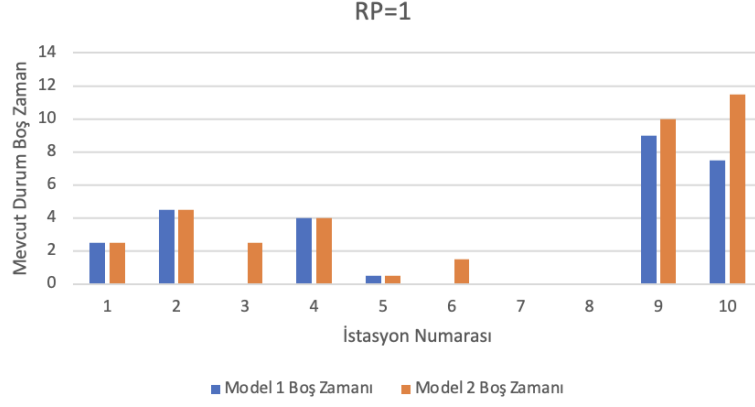


Şekil 4.17: P-28 heskia veri seti $RP=1$ mevcut montaj hattı.

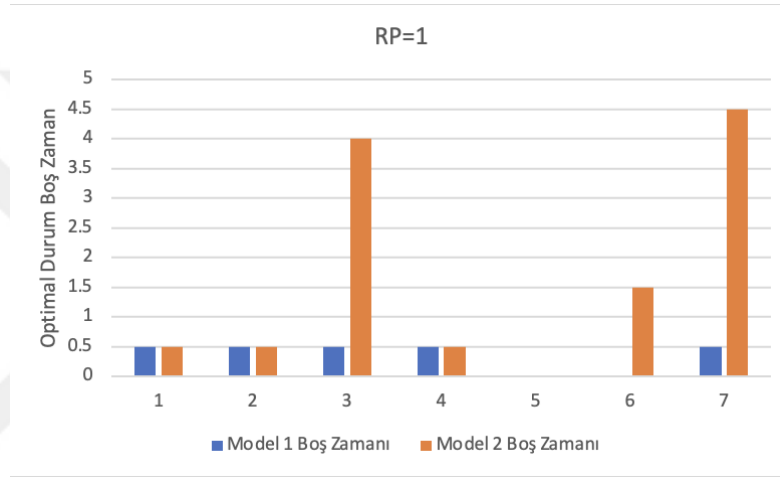


Şekil 4.18: P-28 heskia veri seti $RP=1$ için yeniden dengelenmiş montaj hattı.

Optimal durumda açık olan istasyonlardan üçünün kapandığını ve toplamda 7 istasyon olduğunu görmekteyiz. Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'e baktığımızda toplam değişiklik sayısının 17 olduğunu görmekteyiz. Yapılan değişimlerin, çevrim süresini ve izin verilen maksimum değişiklik sayısını aşmadığı ve öncelik ilişkilerine uygun olarak değiştiği görülmektedir. İstasyon iş yükleri incelendiği zaman ise istasyonların boş zamanlarının minimize edilip hat etkinliğinin maksimize edildiği görülmektedir. Mevcut durumdaki hat etkinliği %93.98 iken optimal durumda hat etkinliği %98.63'e çıkarılmıştır. Mevcut durumda toplam istasyonların model bazında boş zamanlarına baktığımızda, model 1 için 28sn ve model 2 için 37sn iken optimal durumda model 1 için 2.5sn ve model 2 için 11.5sn'dir. Bu durumda, istasyonların iş yüklerinin daha dengeli olup boş zamanlarının minimize edildiği görülmektedir. Aynı zamanda, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'e bakıp mevcut durumun boş zamanının azaldığını gözlemleyebiliriz.



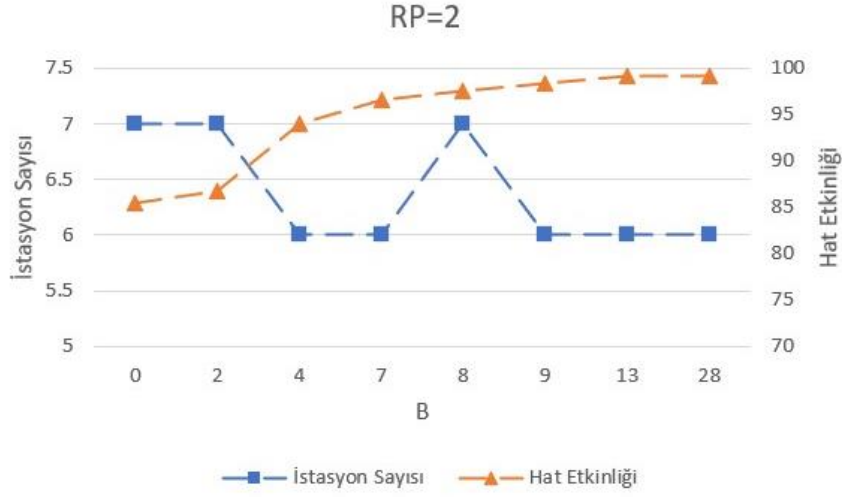
Şekil 4.19: P-28 heskia veri seti $RP=1$ için mevcut durumda istasyonların boş zamanı.



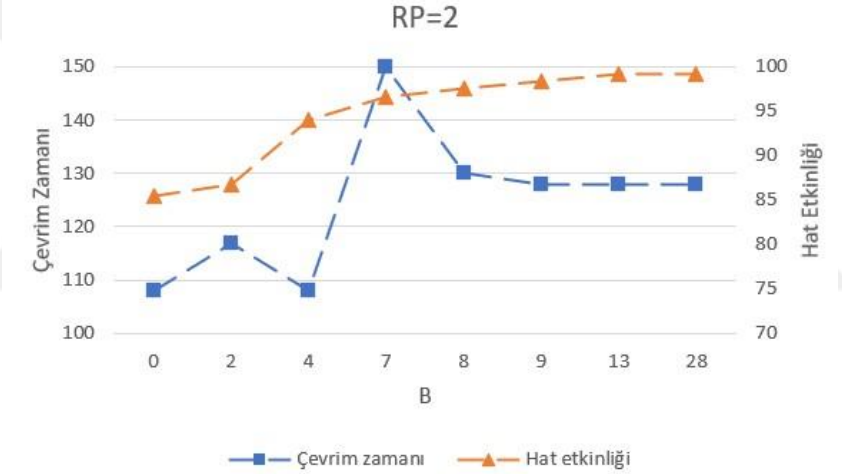
Şekil 4.20: P-28 heskia veri seti $RP=1$ için optimal durumda istasyonların boş zamanı.

4.2.2 P-28 Veri Seti/ 2 Operatör

P-28 heskia veri seti için Tablo 4.4'te verilen parametreler kullanılarak istasyonlara atanabilecek operatör sayısı ikiye çıkartılıp modelimiz çalıştırılmıştır. Şekil 4.21, $RP = 2$ durumunda her bir B değeri için istasyon sayısını ve hat etkinliğini göstermektedir. Şekil 4.22, $RP = 2$ durumunda her bir B değeri için çevrim zamanı ve hat etkinliğini göstermektedir.



Şekil 4.21: P-28 heskia veri seti $RP=2$ için B 'ye göre istasyon sayısı ve hat etkinliği değişimi.



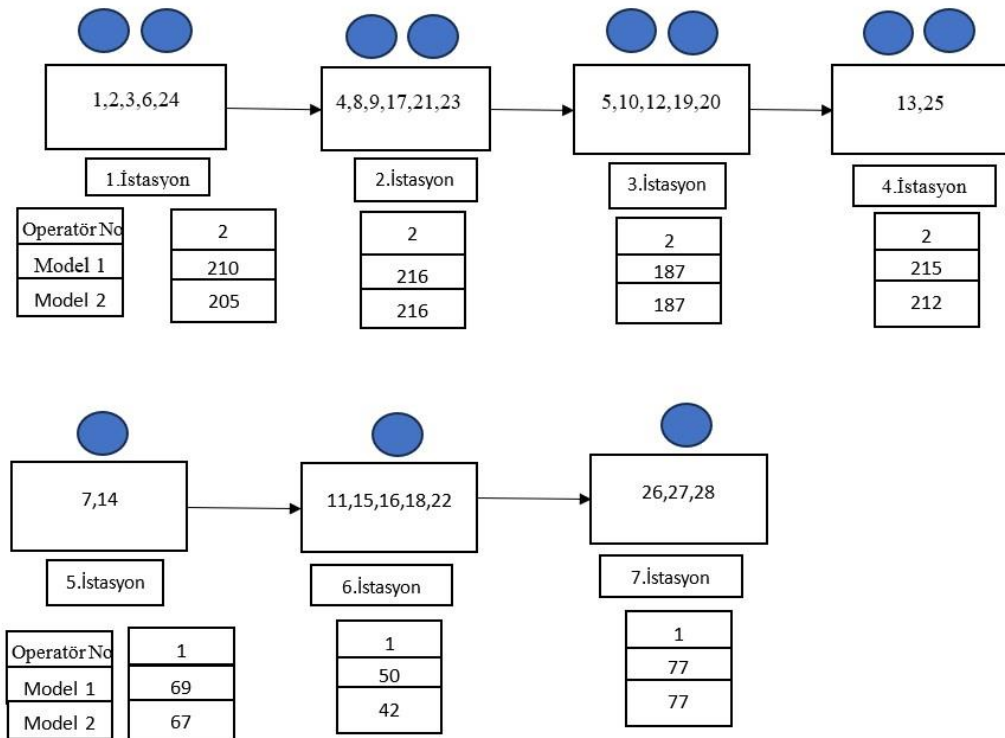
Şekil 4.22: P-28 heskia veri seti $RP=2$ için B 'ye göre çevrim zamanı ve hat etkinliği değişimi.

Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'yi incelediğimizde $RP = 2$ durumunda B değerlerine bağlı olarak istasyon sayısının ve hat etkinliğinin değişimini görebilmekteyiz. $B = 0$ değeri için mevcut durumda istasyon sayısı 7 iken çevrim zamanı 108 olup hat etkinliği değeri %85.43'tür. Şekil 4.34'e bakıldığında B değeri arttıkça mevcut durumun hat etkinliğinin arttığı görülmüştür. Örneğin $B = 2$ değeri için istasyon sayısı 7 iken çevrim zamanı 117 olup hat etkinliği %86.75'tir. $B = 13$ değeri için istasyon sayısı 6 iken çevrim zamanı 128 hat etkinliği %99.12'dir. Aynı zamanda bu sonuçlar Tablo 4.6'da raporlanmıştır ve Tablo 4.6'da görüldüğü üzere açılan istasyon sayısı ve çevrim zamanı çarpımı minimize edilmiştir.

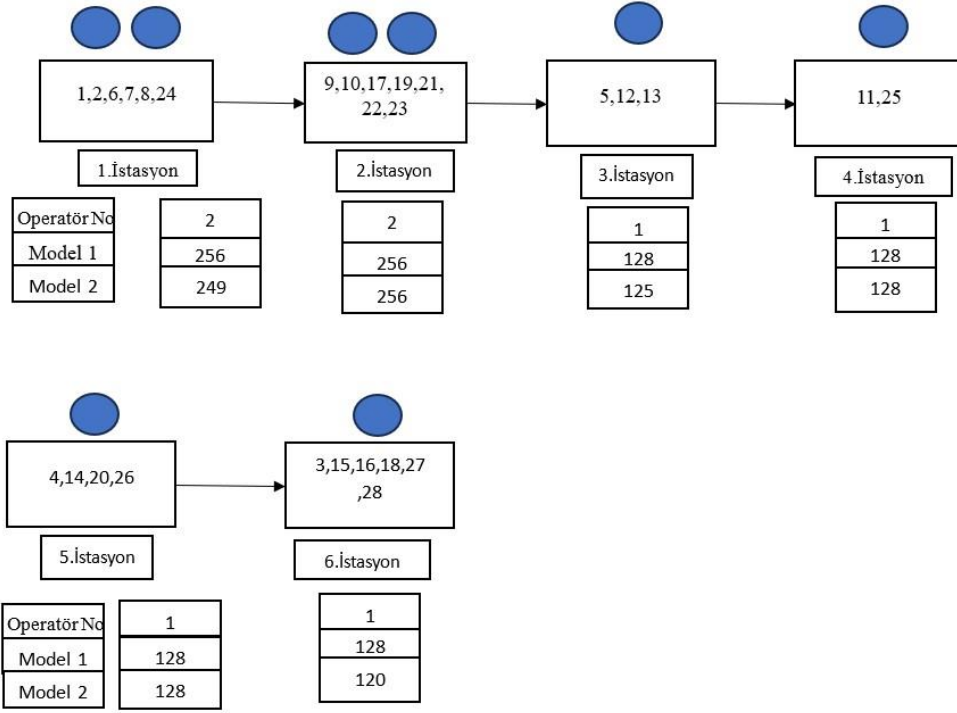
Tablo 4.6: P-28 heskia veri seti $RP=2$ için model sonuçları.

B	Çevrim Zamanı	OP	İstasyon Sayısı	OP*C	Hat Etkinliği
0	108	11	7	1188	85.43
2	117	10	7	1170	86.75
4	108	10	6	1080	93.98
7	150	7	6	1050	96.66
8	130	8	7	1040	97.59
9	129	8	6	1032	98.35
13	128	8	6	1024	99.12*
28	128	8	6	1024	99.12*

Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te $RP = 2$ için mevcut durum ve optimal durum verilmiştir.

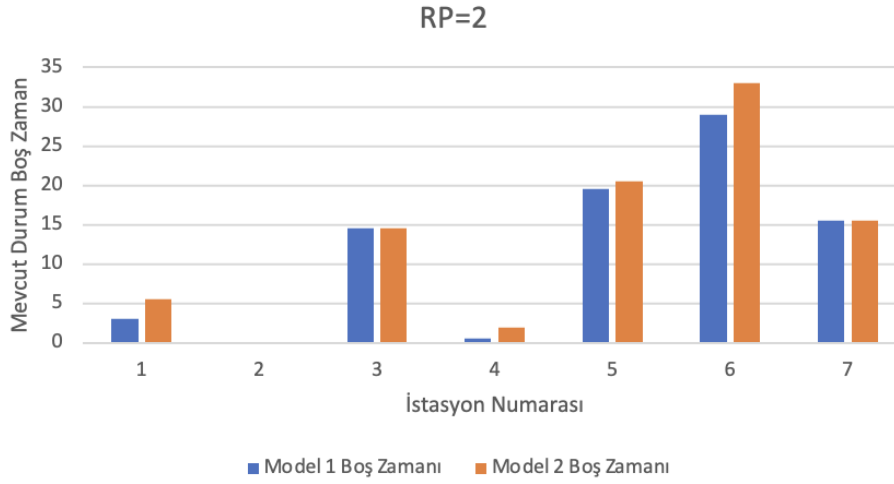


Şekil 4.23: P-28 heskia veri seti $RP=2$ için mevcut montaj hattı.

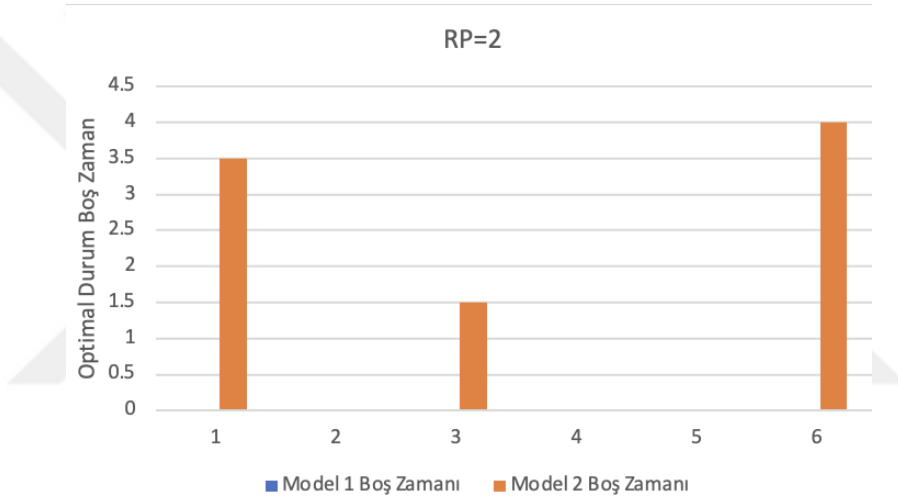


Şekil 4.24: P-28 heskia veri seti $RP=2$ için yeniden dengelenmiş montaj hattı.

Optimal durumda açık olan istasyonlardan birinin kapandığını ve toplamda 6 istasyon olduğunu görmekteyiz. Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'e baktığımızda toplam değişiklik sayısının 13 olduğunu görmekteyiz. Yapılan değişimlerin, çevrim süresini ve izin verilen maksimum değişiklik sayısını aşmadığı ve öncelik ilişkilerine uygun olarak değiştiği görülmektedir. İstasyon iş yükleri incelendiği zaman ise istasyonların boş zamanlarının minimize edilip hat etkinliğinin maksimize edildiği görülmektedir. Mevcut durumdaki hat etkinliği %85.43 iken optimal durumda hat etkinliği %98.35'e çıkarılmıştır. Mevcut durumda toplam istasyonların model bazında boş zamanlarına baktığımızda, model 1 için 82sn ve model 2 için 91sn iken optimal durumda model 1 için 0sn ve model 2 için 18sn'dir. Bu durumda, istasyonların iş yüklerinin daha dengeli olup boş zamanlarının minimize edildiği görülmektedir. Aynı zamanda, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'ya bakıp mevcut durumun boş zamanının optimize edildiğini gözlemleyebiliriz.



Şekil 4.25: P-28 heskia veri seti $RP=2$ için mevcut durumda istasyonların boş zamanı.

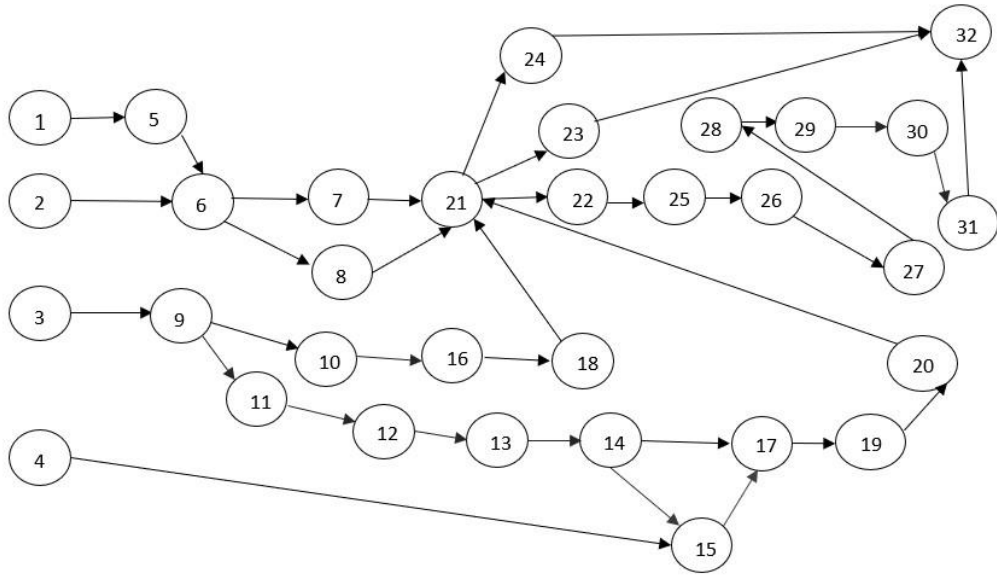


Şekil 4.26: P-28 heskia veri seti $RP=2$ için optimal durumda istasyonların boş zamanı.

4.3 P-32 Lutz-1 Test Problemi

P-32 lutz-1 veri seti 32 görev ve 2 farklı modelden oluşmaktadır. Aşağıdaki verilen Şekil 4.27'de görevlerin öncelik ilişkisi diyagramı gösterilmektedir. Aynı zamanda veri setine ait görev süreleri ve talep oranları ekte Tablo A.7 ve Tablo A.8'de verilmiştir.

P-32 lutz-1 veri seti için kullanılan parametreler Tablo 4.7'de verilmiştir. İzin verilen maksimum değişiklik sayısı, B değeri, 0'dan yani mevcut durumdan başlatılıp $\{1, 2, \dots, I\}$ 'ye kadar artırılarak model farklı B değerleri için test edilmiştir. Bu veri setinde model her bir B değeri için çalıştırıldığında toplamda 32 defa çalıştırılmıştır ve çıktılar alınmıştır. Program, $RP = 1$ için optimum sonucu 149.152sn'de ve $RP=2$ 165.47sn gibi kısa bir sürede elde etmiştir.



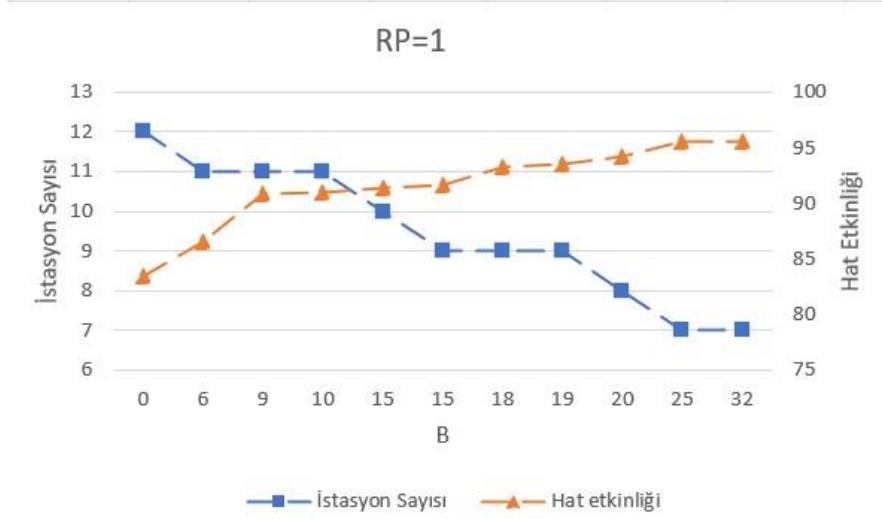
Şekil 4.27: P-32 lutz-1 veri seti öncelik ilişkileri diyagramı.

Tablo 4.7: P-32 lutz-1 veri seti $RP=1$ ve $RP=2$ için kullanılan parametreler.

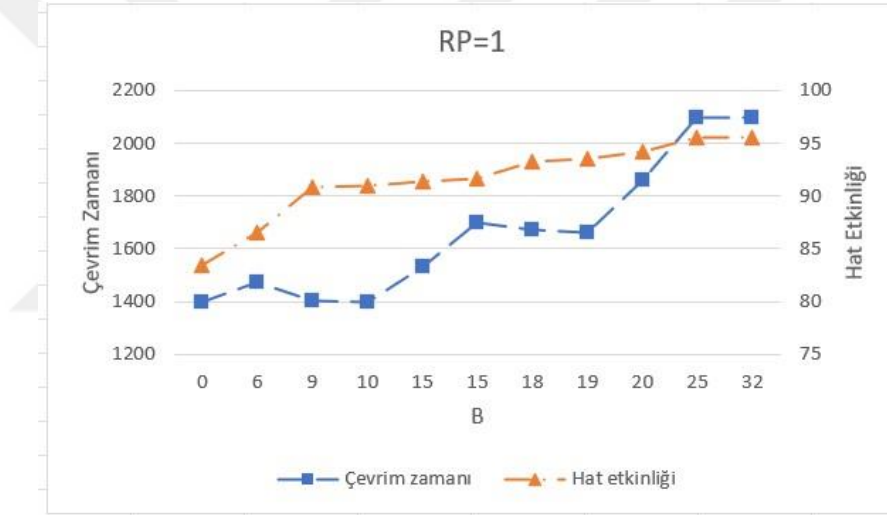
Parametreler	Değerler
C_{min}	1400
C_{max}	2100
K_{max}	13
OP	13

4.3.1 P-32 Veri Seti/ 1 Operatör

P-32 veri seti Tablo 4.7’de verilen parametreler kullanılarak $RP=1$ için rMILP modeli çalıştırılmıştır. Şekil 4.28, her bir B değeri için istasyon sayısını ve hat etkinliğini göstermektedir. Şekil 4.29, her bir B değeri için çevrim süresi ve hat etkinliğini göstermektedir.



Şekil 4.28: P-32 lutz-1 veri seti $RP=1$ için B 'ye göre istasyon sayısı ve hat etkinliği değişimi.



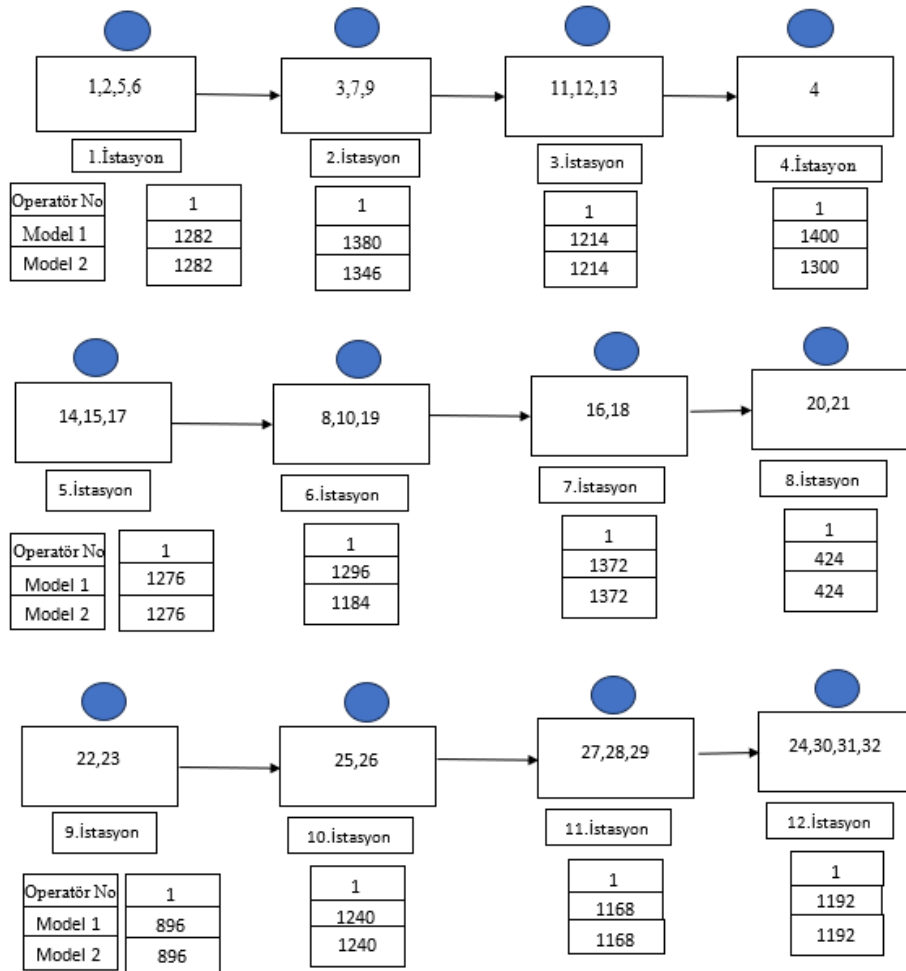
Şekil 4.29: P-32 lutz-1 veri seti $RP=1$ için B 'ye göre istasyon sayısı ve çevrim zamanı değişimi.

Şekil 4.28 ve Şekil 4.29 incelendiğinde $RP = 1$ durumundayken B değerlerine bağlı olarak istasyon sayısının, çevrim zamanının ve hat etkinliğinin değişimini görebilmekteyiz. $B = 0$ değeri için mevcut durumda istasyon sayısı 12 iken çevrim zamanı 1400 olup hat etkinliği değeri %83.43'tür. B değeri arttıkça mevcut durumun hat etkinliğinin arttığı görülmüştür. Örneğin $B = 6$ değeri için istasyon sayısı 11 iken çevrim zamanı 1472 olup hat etkinliği %86.56'dır. $B = 9$ değeri için istasyon sayısı 11 iken çevrim zamanı 1402 olup hat etkinliği %90.88'dir. Aynı zamanda bu sonuçlar Tablo 4.8'de raporlanmıştır ve Tablo 4.8'de görüldüğü üzere açılan istasyon sayısı ve çevrim zamanı çarpımı minimize edilmiştir. Bu sonuçlar programımızın doğruluğunu kanıtlar niteliktedir.

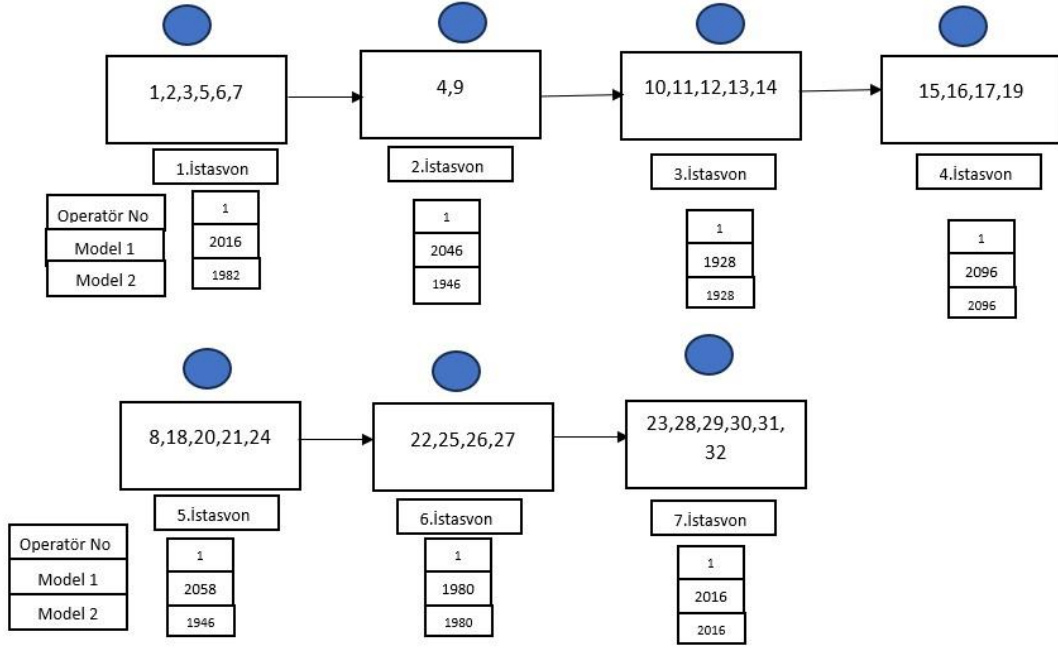
Tablo 4.8: P-32 lutz-1 veri seti $RP=1$ için model sonuçları.

B	Çevrim Zamanı	OP	İstasyon Sayısı	OP*C	LE (%)
0	1400	12	12	16800	83.43
6	1472	11	11	16192	86.56
9	1402	11	11	15422	90.88
10	1400	11	11	15400	91.01
15	1534	10	10	15340	91.37
16	1700	9	9	15300	91.61
19	1664	9	9	14976	93.59
20	1860	8	8	14880	94.20
25	2096	7	7	14672	95.53*
32	2096	7	7	14672	95.53*

Şekil 4.30 ve Şekil 4.31’de $RP = 1$ için mevcut durum ve optimal durum verilmiştir.

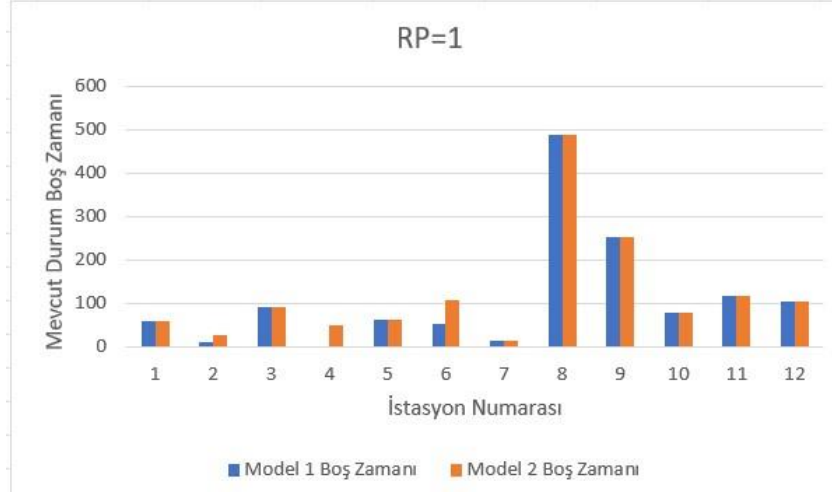


Şekil 4.30: P-32 lutz-1 veri seti $RP=1$ için mevcut montaj hattı.

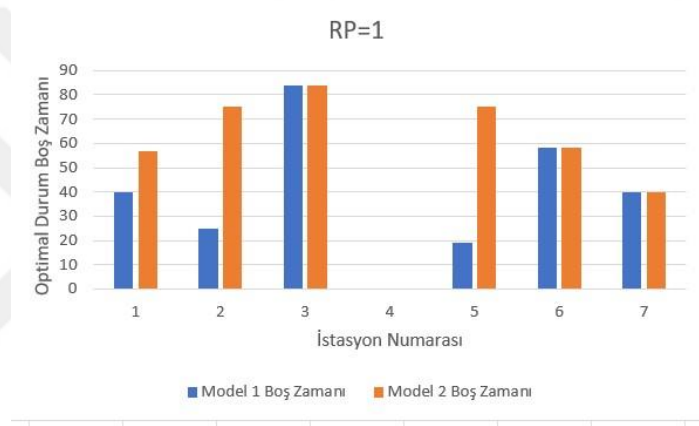


Şekil 4.31: P-32 lutz-1 veri seti $RP=1$ için yeniden dengelenmiş montaj hattı.

Optimal durumda açık olan istasyonlardan beşinin kapandığını ve toplamda 7 istasyon olduğunu görmekteyiz. Şekil 4.30 ve Şekil 4.31'e baktığımızda toplam değişiklik sayısının 25 olduğu görülmektedir. Yapılan değişimlerin, çevrim süresini ve izin verilen maksimum değişiklik sayısını aşmadığı ve öncelik ilişkilerine uygun olarak değiştiği görülmektedir. İstasyon iş yükleri incelendiği zaman ise istasyonların boş zamanlarının minimize edilip hat etkinliğinin maksimize edildiği görülmektedir. Mevcut durumdaki hat etkinliği %83.43 iken optimal durumda hat etkinliği %95.53'e çıkarılmıştır. Mevcut durumda toplam istasyonların model bazında boş zamanlarına baktığımızda, model 1 için 1330sn ve model 2 için 1453sn iken optimal durumda model 1 için 266sn ve model 2 için 389sn'dir. Bu durumda, istasyonların iş yüklerinin daha dengeli olup boş zamanlarının minimize edildiği görülmektedir. Aynı zamanda, Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'e bakıp mevcut durumun boş zamanının optimize edildiğini gözlemleyebiliriz.



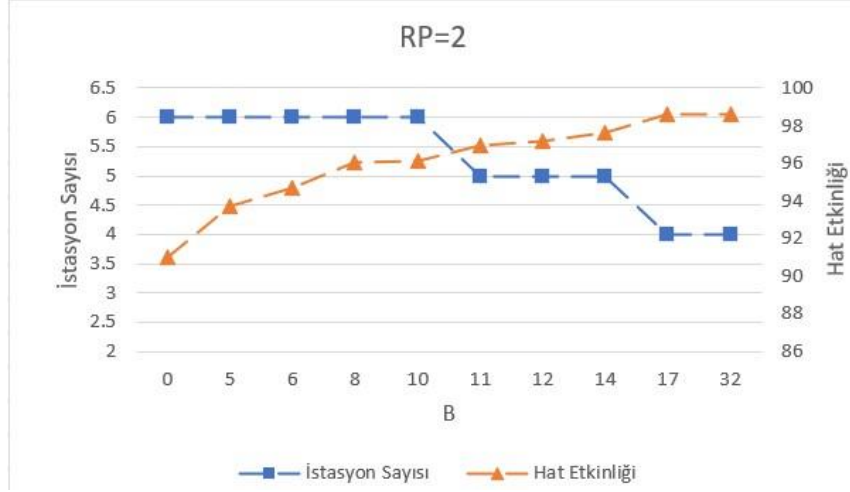
Şekil 4.32: P-32 lutz-1 veri seti $RP=1$ için mevcut durumda istasyonların boş zamanı.



Şekil 4.33: P-32 lutz-1 veri seti $RP=1$ için optimal durumda istasyonların boş zamanı.

4.3.2 P-32 Veri Seti/2 Operatör

P-32 Lutz-1 veri seti için Tablo 4.7’de verilen parametreler kullanılarak istasyonlara atanabilecek operatör sayısı ikiye çıkartılıp modelimiz çalıştırılmıştır. Şekil 4.34, $RP = 2$ durumunda her bir B değeri için istasyon sayısını ve hat etkinliğini göstermektedir. Şekil 4.35, $RP = 2$ durumunda her bir B değeri için çevrim zamanı ve hat etkinliğini göstermektedir.



Şekil 4.34: P-32 lutz-1 veri seti $RP=2$ için B 'ye göre istasyon sayısı ve hat etkinliği değişimi.



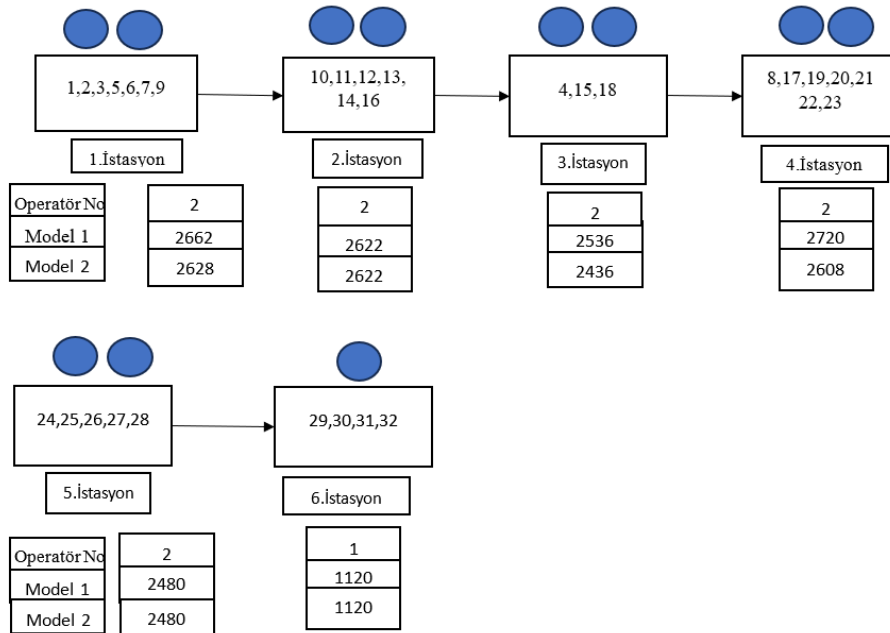
Şekil 4.35: P-32 lutz-1 veri seti $RP=2$ için B 'ye göre çevrim zamanı ve hat etkinliği değişimi.

Şekil 4.34 ve Şekil 4.35 incelendiğinde $RP = 2$ durumundayken B değerlerine bağlı olarak istasyon sayısının, çevrim zamanının ve hat etkinliğinin değişimini görebilmekteyiz. $B = 0$ değeri için mevcut durumda istasyon sayısı 6 iken çevrim zamanı 1400 olup hat etkinliği değeri %91.019'dur. B değeri arttıkça mevcut durumun hat etkinliğinin arttığı görülmüştür. Örneğin $B = 6$ değeri için istasyon sayısı 6 iken çevrim zamanı 1480 olup hat etkinliği %94.70'tir. $B = 17$ değeri için istasyon sayısı 4 iken çevrim zamanı 2031 olup hat etkinliği %98.59'dur. Aynı zamanda bu sonuçlar Tablo 4.9'da raporlanmıştır ve Tablo 4.9'da görüldüğü üzere açılan istasyon sayısı ve çevrim zamanı çarpımını minimize edilmiştir.

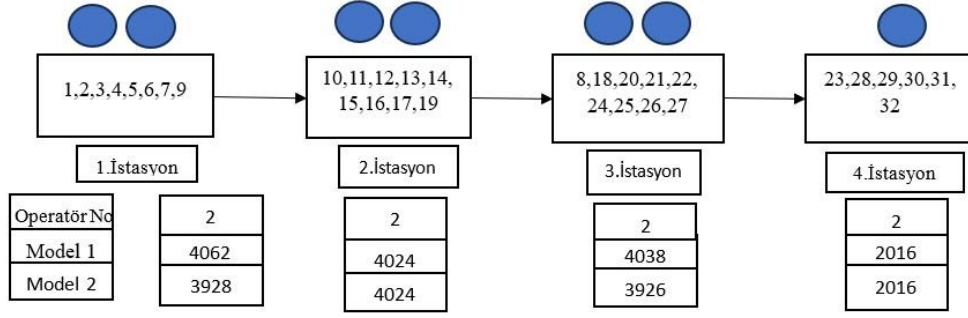
Tablo 4.9: P-32 lutz-1 $RP=2$ için model sonuçları.

B	Çevrim Zamanı	OP	İstasyon Sayısı	OP*C	LE (%)
0	1400	11	6	15400	91.01
5	1496	10	6	14960	93.69
6	1480	10	6	14800	94.70
8	1622	9	6	14598	96.02
10	1620	9	6	14580	96.13
11	1446	10	5	14460	96.93
12	1442	10	5	14420	97.20
14	1436	10	5	14360	97.61
17	2031	7	4	14217	98.59*
32	2031	7	4	14217	98.59*

Şekil 4.36 ve Şekil 4.37’de $RP = 2$ için mevcut durum ve optimal durum verilmiştir.

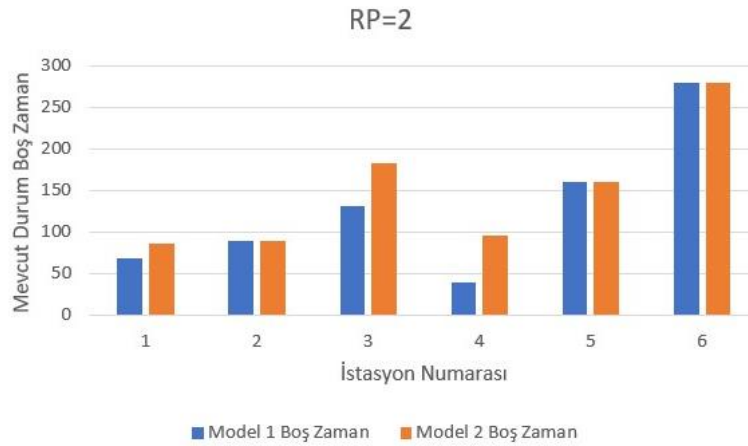


Şekil 4.36: P-32 lutz-1 $RP=2$ için mevcut montaj hattı.

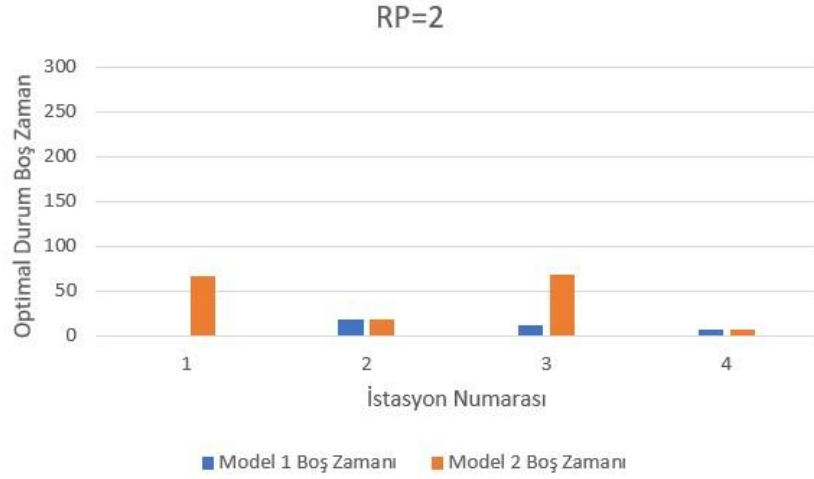


Şekil 4.37: P-32 lutz-1 $RP=2$ için yeniden dengelenmiş montaj hattı.

Optimal durumda açık olan istasyonlardan ikisinin kapandığını ve toplamda dört istasyon olduğunu görmekteyiz. Şekil 4.36 ve Şekil 4.37'ye baktığımızda toplam değişiklik sayısının 17 olduğu görülmektedir. Yapılan değişimlerin, çevrim süresini ve izin verilen maksimum değişiklik sayısını aşmadığı ve öncelik ilişkilerine uygun olarak değiştiği görülmektedir. İstasyon iş yükleri incelendiği zaman ise istasyonların boş zamanlarının minimize edilip hat etkinliğinin maksimize edildiği görülmektedir. Mevcut durumdaki hat etkinliği %91.09 iken optimal durumda hat etkinliği %98.59'a çıkarılmıştır. Mevcut durumda toplam istasyonların model bazında boş zamanlarına baktığımızda, model 1 için 770sn ve model 2 için 893sn iken optimal durumda model 1 için 38.5sn ve model 2 için 161.5sn'dir. Bu durumda, istasyonların iş yüklerinin daha dengeli olup boş zamanlarının minimize edildiği görülmektedir. Aynı zamanda, Şekil 4.38 ve Şekil 4.39'a bakıp mevcut durumun boş zamanının optimize edildiğini gözlemleyebiliriz.



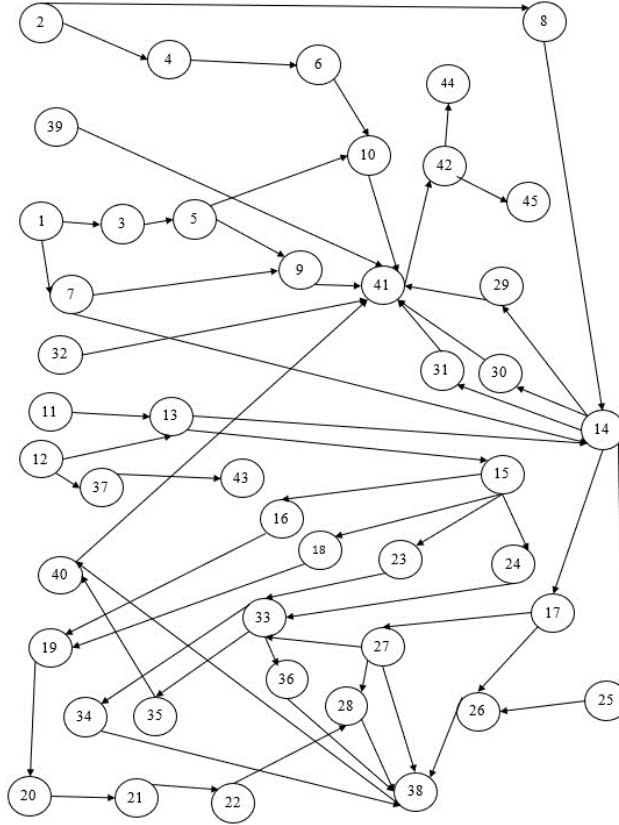
Şekil 4.38: P-32 lutz-1 $RP=2$ için mevcut durumda istasyonların boş zamanı.



Şekil 4.39: P-32 lutz-1 $RP=2$ için optimal durumda istasyonların boş zamanı.

4.4 P-45 Kilbrid Test Problemi

P-45 kilbrid veri seti 45 görev ve 2 farklı modelden oluşmaktadır. Aşağıdaki verilen Şekil 4.40'ta görevlerin öncelik ilişkisi diyagramı gösterilmektedir. Aynı zamanda veri setine ait görev süreleri ve talep oranları ekte Tablo A.9 ve Tablo A.10'da verilmiştir.



Şekil 4.40: P-45 kilbrid veri seti öncelik ilişkileri diyagramı.

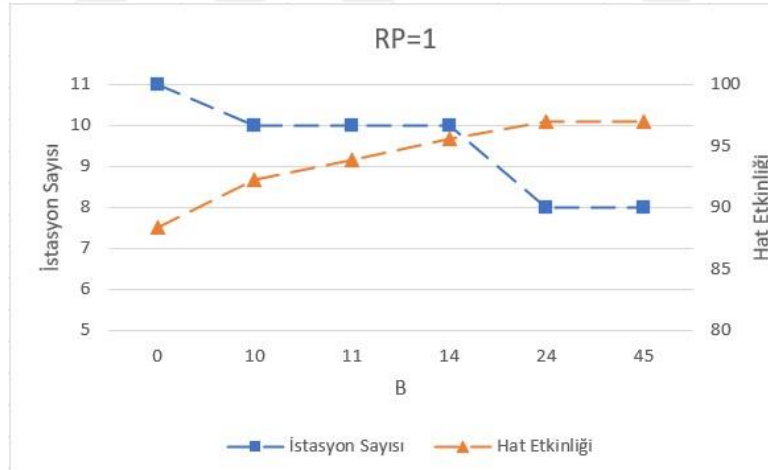
P-45 kilbrid veri seti için kullanılan parametreler Tablo 4.10’da verilmiştir. İzin verilen maksimum değişiklik sayısı, B değeri, 0’dan yani mevcut durumdan başlatılıp $\{1, 2, \dots, I\}$ ’ye kadar artırılarak model farklı B değerleri için test edilmiştir. Program bu veri setinde her bir B değeri için çalıştırılmış olup toplamda 45 defa çalıştırılmıştır. Program, $RP = 1$ için optimum sonucu 0.23sn’de ve $RP=2$ için 0.21sn gibi kısa bir sürede elde etmiştir.

Tablo 4.10: P-45 kilbrid veri seti $RP=1$ ve $RP=2$ için kullanılan parametreler.

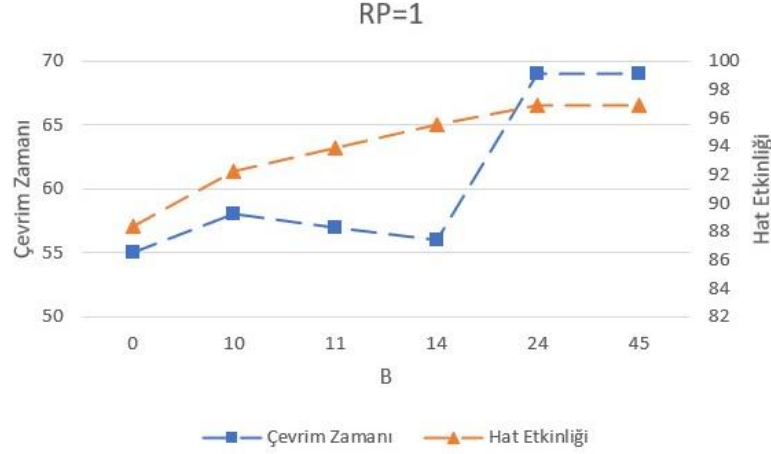
Parametreler	Değerler
C_{min}	55
C_{max}	83
K_{max}	12
OP	12

4.4.1 P-45 Veri Seti/1 Operatör

P-45 veri seti için Tablo 4.10’da verilen parametreler kullanılarak $RP=1$ için rMILP modeli çalıştırılmıştır. Şekil 4.41, her bir B değeri için istasyon sayısını ve hat etkinliğini göstermektedir. Şekil 4.42, her bir B değeri için çevrim süresi ve hat etkinliğini göstermektedir.



Şekil 4.41: P-45 kilbrid veri seti $RP=1$ için B 'ye göre istasyon sayısı ve çevrim zamanı değişimi.



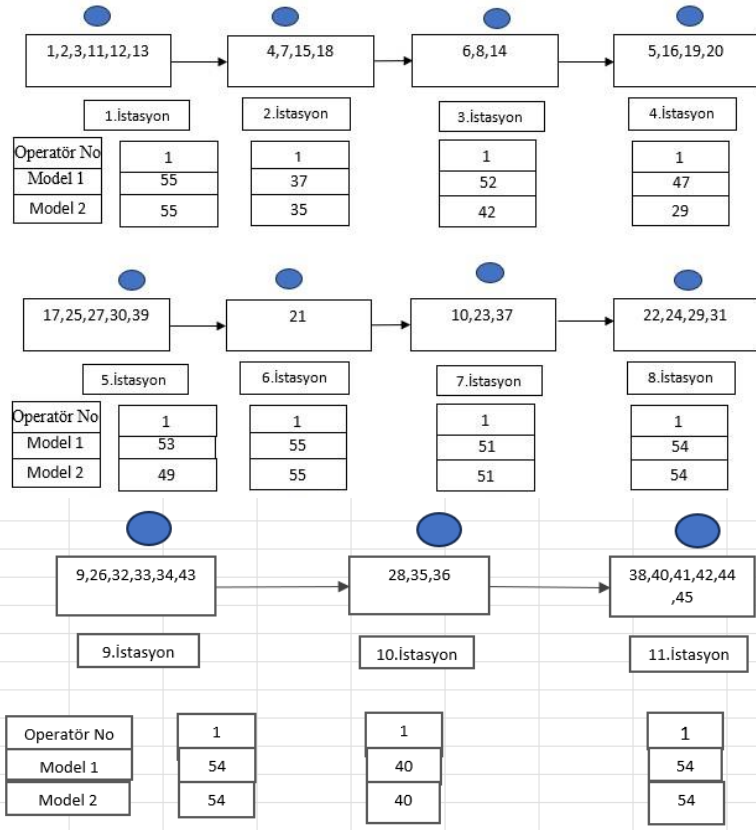
Şekil 4.42: P-45 kilbrid veri seti $RP=1$ için B' 'ye göre istasyon sayısı ve çevrim zamanı değişimi.

Şekil 4.41 ve Şekil 4.42, $RP = 1$ durumundayken B değerlerine bağlı olarak istasyon sayısı ve hat etkinliği değişimini göstermektedir. $B = 0$ değeri için mevcut durumda istasyon sayısı 11 iken çevrim zamanı 55 olup hat etkinliği değeri %88.42'dir. Şekil 4.41 ve Şekil 4.42'ye bakıldığında B değeri arttıkça mevcut durumun hat etkinliğinin arttığı görülmüştür. Örneğin $B = 10$ değeri için istasyon sayısı 10 iken çevrim zamanı 58 olup hat etkinliği %92.24'tür. $B = 24$ değeri için istasyon sayısı 8 iken çevrim zamanı 69 hat etkinliği %96.92'dir. Aynı zamanda, bu sonuçlar Tablo 4.11'de raporlanmıştır ve Tablo 4.11'de görüldüğü üzere açılan istasyon sayısı ve çevrim zamanı çarpımı minimize edilmiştir.

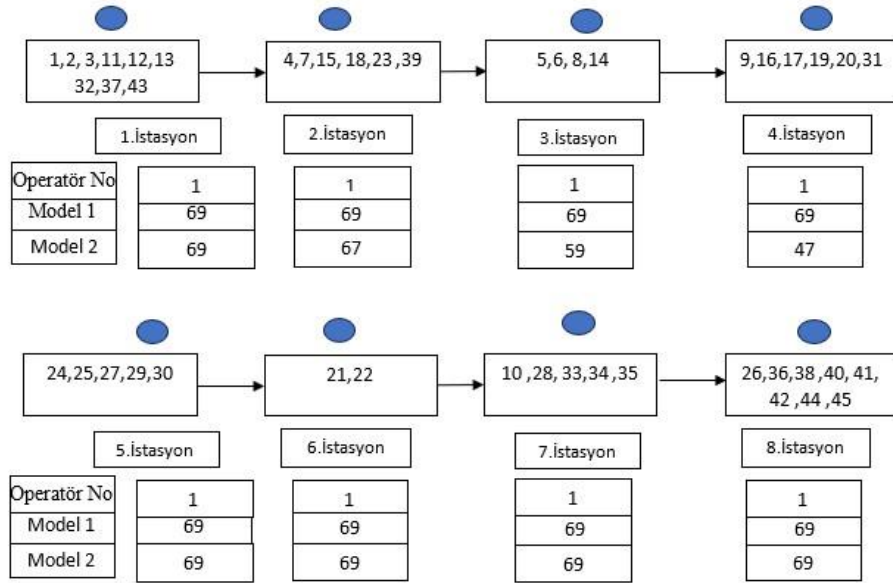
Tablo 4.11: P-45 kilbrid veri seti $RP=1$ için model sonuçları.

B	Çevrim Zamanı	OP	İstasyon Sayısı	$OP * C$	LE (%)
0	55	11	11	605	88.42
10	58	10	10	580	92.24
11	57	10	10	570	93.85
14	56	10	10	560	95.53
24	69	8	8	552	96.92*
45	69	8	8	552	96.92*

Şekil 4.43 ve Şekil 4.44'te $RP = 1$ için mevcut durum ve optimal durum verilmiştir.

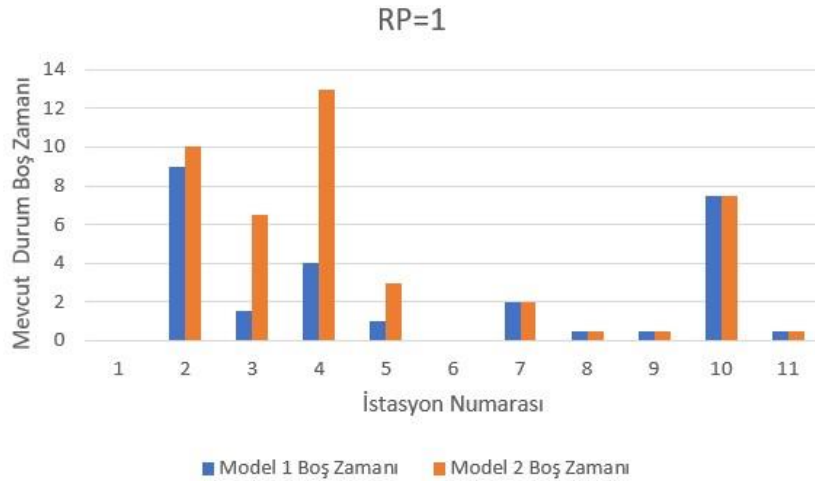


Şekil 4.43: P-45 kilbrid veri seti $RP=I$ için mevcut montaj hattı.

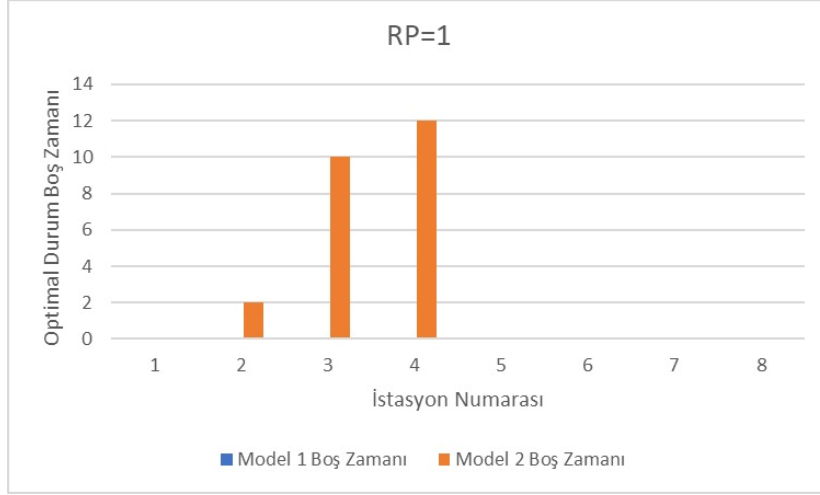


Şekil 4.44: P-45 kilbrid veri seti $RP=I$ için yeniden dengelenmiş montaj hattı.

Optimal durumda açık olan istasyonlardan üçünün kapandığını ve toplamda 8 istasyon olduğunu görmekteyiz. Şekil 4.43 ve Şekil 4.44'e baktığımızda toplam değişiklik sayısının 24 olduğu görülmektedir. Yapılan değişimlerin, çevrim süresini ve izin verilen maksimum değişiklik sayısını aşmadığı ve öncelik ilişkilerine uygun olarak değiştiği görülmektedir. İstasyon iş yükleri incelendiği zaman ise istasyonların boş zamanlarının minimize edilip hat etkinliğinin maksimize edildiği görülmektedir. Mevcut durumdaki hat etkinliği %88.42 iken optimal durumda hat etkinliği %96.92'ye çıkarılmıştır. Mevcut durumda toplam istasyonların model bazında boş zamanlarına baktığımızda, model 1 için 26.5sn ve model 2 için 44.5sn'tir. Optimal durumda toplam istasyonların model bazında boş zamanlarına baktığımızda ise model 1 için 0sn ve model 2 için 12sn'dir. Bu durumda, istasyonların iş yüklerinin daha dengeli olup boş zamanlarının minimize edildiği görülmektedir. Aynı zamanda, Şekil 4.45 ve Şekil 4.56'ya bakıp mevcut durumun boş zamanının optimize edildiğini gözlemleyebiliriz.



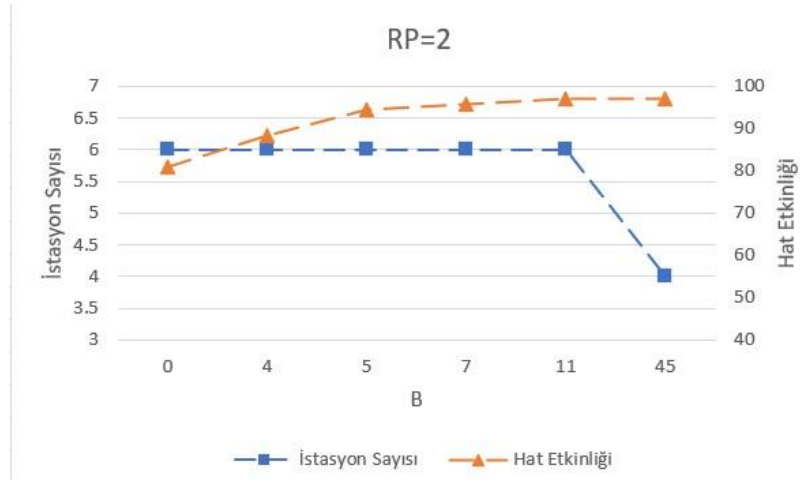
Şekil 4.45: P-45 kilbrid veri seti $RP=1$ için mevcut durumda istasyonların boş zamanı.



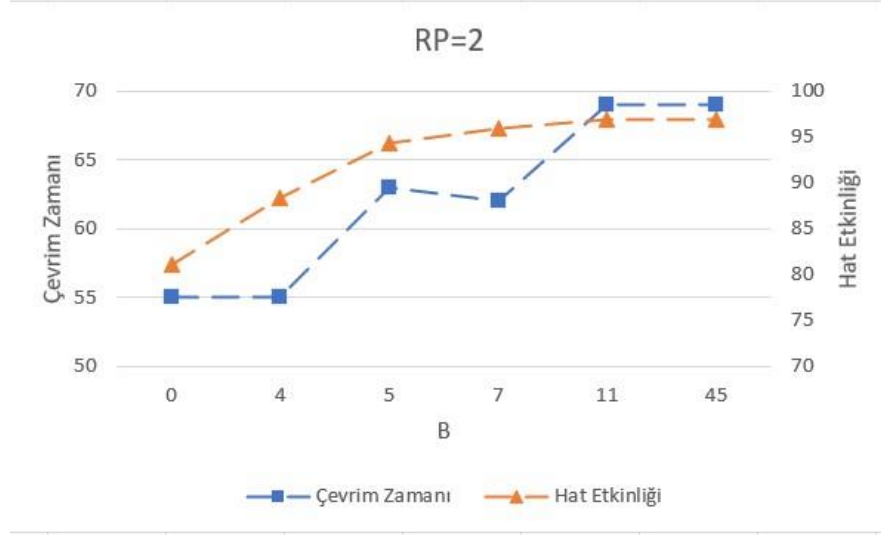
Şekil 4.46: P-45 kilbrid veri seti $RP=1$ için optimal durumda istasyonların boş zamanı.

4.4.2 P-45 Veri Seti/ 2 Operatör

P-45 kilbrid veri seti için Tablo 4.12’de verilen parametreler kullanılarak istasyonlara atanabilecek operatör sayısı ikiye çıkartılıp modelimiz çalıştırılmıştır. Şekil 4.47, $RP = 2$ durumunda her bir B değeri için istasyon sayısını ve hat etkinliğini göstermektedir. Şekil 4.48, $RP = 2$ durumunda her bir B değeri için çevrim zamanı ve hat etkinliğini göstermektedir.



Şekil 4.47: P-45 kilbrid veri seti $RP=2$ için B 'ye göre istasyon sayısı ve hat etkinliği değişimi.



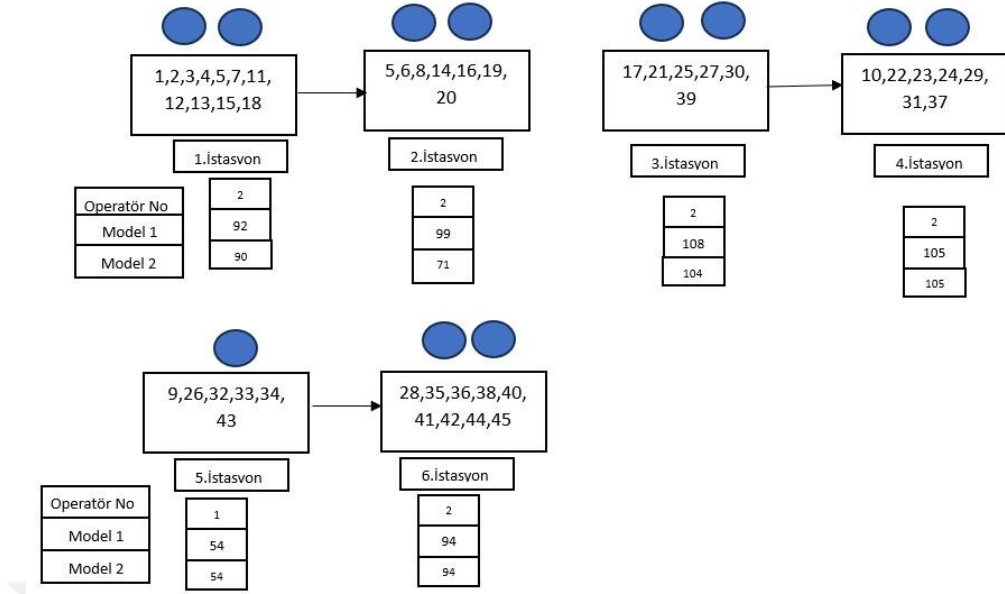
Şekil 4.48: P-45 kilbrid veri seti $RP=2$ için B 'ye göre çevrim zamanı ve hat etkinliği değişimi.

Şekil 4.47, $RP = 2$ durumunda B değerlerine bağlı olarak istasyon sayısının ve hat etkinliğinin değişimini göstermektedir. $B = 0$ değeri için mevcut durumda istasyon sayısı 6 iken çevrim zamanı 55 olup hat etkinliği değeri %81.06'dır. Şekil 4.47' bakıldığında B değeri arttıkça mevcut durumun hat etkinliğinin arttığı görülmüştür. Örneğin $B = 4$ değeri için istasyon sayısı 6 iken çevrim zamanı 55 olup hat etkinliği %88.42'dir. $B = 11$ anında istasyon sayısı 6 iken çevrim zamanı 69 hat etkinliği %96.92'dir. Aynı zamanda, bu sonuçlar Tablo 4.12'de raporlanmıştır ve Tablo 4.12'de görüldüğü üzere açılan istasyon sayısı ve çevrim zamanı çarpımı minimize edilmiştir.

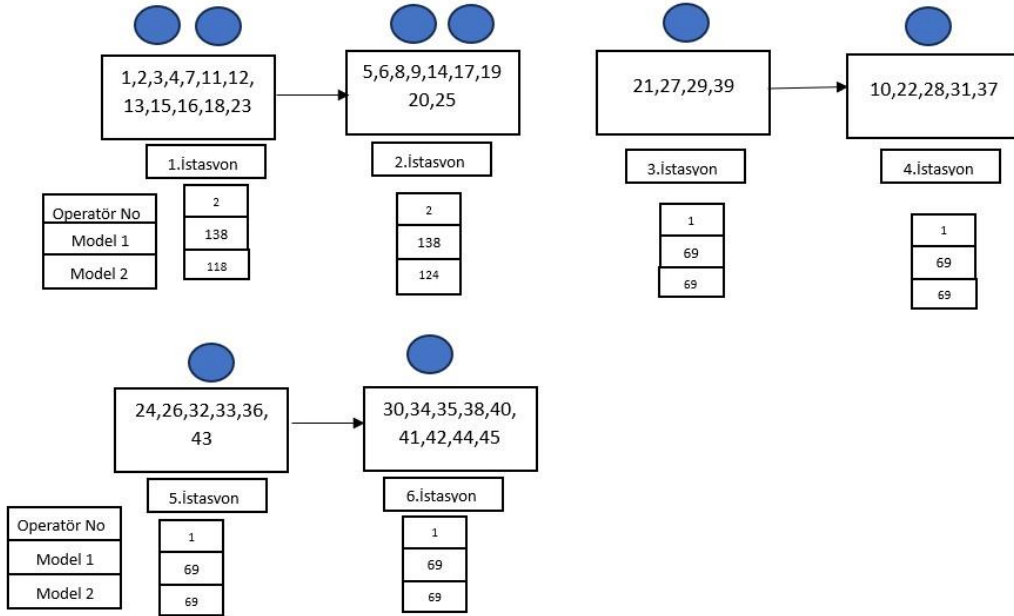
Tablo 4.12: P-45 kilbrid veri seti $RP=2$ için model sonuçları.

B	Çevrim Zamanı	OP	İstasyon Sayısı	$OP*C$	LE (%)
0	55	11	6	660	81.06
4	55	11	6	605	88.42
5	63	9	6	567	94.35
7	62	9	6	558	95.87
11	69	8	6	552	96.92*
45	69	8	4	552	96.92*

Şekil 4.49 ve Şekil 4.50'ye $RP = 2$ için mevcut durum ve optimal durum verilmiştir.



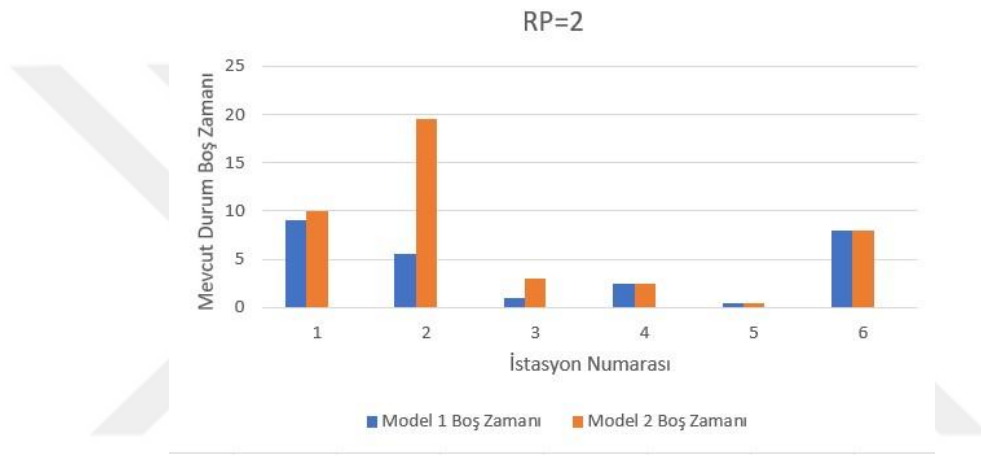
Şekil 4.49: P-45 kilbrid veri seti $RP=2$ için mevcut montaj hattı.



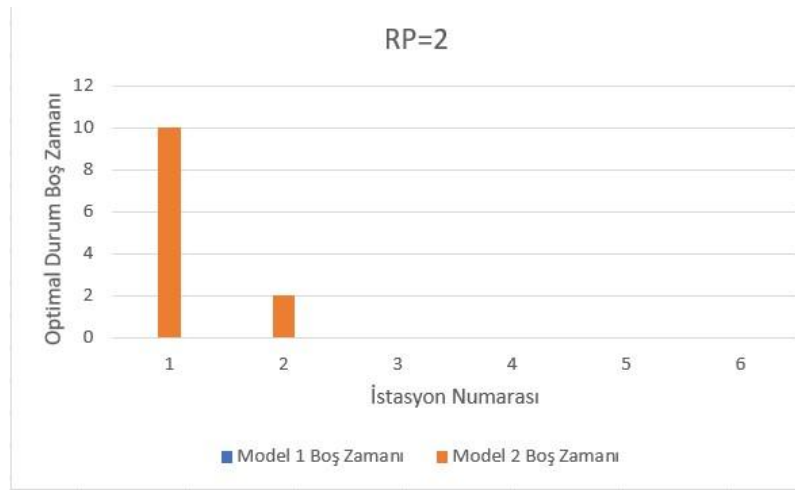
Şekil 4.50: P-45 kilbrid veri seti $RP=2$ için yeniden dengelenmiş montaj hattı.

Şekil 4.49 ve Şekil 4.50'ye baktığımızda toplam değişiklik sayısının 11 olduğu görülmektedir. Yapılan değişimlerin, çevrim süresini ve izin verilen maksimum değişiklik

sayısını aşmadığı ve öncelik ilişkilerine uygun olarak değiştiği görülmektedir. İstasyon iş yükleri incelendiği zaman ise istasyonların boş zamanlarının minimize edilip hat etkinliğinin maksimize edildiği görülmektedir. Mevcut durumdaki hat etkinliği %81.06 iken optimal durumda hat etkinliği %96.92'ye çıkarılmıştır. Mevcut durumda toplam istasyonların model bazında boş zamanlarına baktığımızda, model 1 için 26.5sn ve model 2 için 43.5sn'dir. Optimal durumda toplam istasyonların model bazında boş zamanlarına baktığımızda ise model 1 için 0sn ve model 2 için 12sn'dir. Bu durumda, istasyonların iş yüklerinin daha dengeli olup boş zamanlarının minimize edildiği görülmektedir. Aynı zamanda, Şekil 4.51 ve Şekil 4.52'e bakıp mevcut durumun boş zamanının optimize edildiğini gözlemleyebiliriz.



Şekil 4.51: P-45 kilbrid veri seti $RP=2$ için mevcut durumda istasyonların boş zamanı.



Şekil 4.52: P-45 kilbrid veri seti $RP=2$ için optimal durumda istasyonların boş zamanı.

4.5 Bölüm Sonu Değerlendirmesi

Deneysel testler bölümünde önerilen modelin uygulamaları verilmiştir. Model küçük boyutlu ve orta boyutlu veri setleri ile test edilmiştir. Yapılan bütün uygulamaların detayları her bir uygulama özelinde adım adım açıklanmıştır. rMILP modeli ile montaj hattının hat maksimizasyonu sağlandığı görülmüştür. P-19 veri seti dışındaki diğer veri setleri için, adım büyüklüğü, $C_{artış}$, bir olmasından dolayı çevrim süresinin C_{min} ve C_{max} arasındaki her bir değeri için rMILP modeli çalıştırılmaktadır dolayısıyla çözüm uzayındaki her bir nokta kontrol edildiği için modelin optimal sonucu verdiği gözlemlenmiştir.



5. PERFORMANS ANALİZİ VE VAKA ÇALIŞMASI

Bu bölüme kadar önerilen iki model küçük ve orta boyutlu veri setleri ile test edilmiştir ve sonuçları Bölüm 4’te raporlanmıştır. Bu bölümde ise önerilen iki modelin MINLP ve rMILP büyük veri setleri ile karşılaştırılması ve performans analizi verilecektir. Daha sonrasında ise, Lego parçaları kullanılarak bir vaka çalışması yapılmıştır.

5.1 Büyük Boyutlu Veri Setleri Kullanılarak Modellerin Performans Analizi

MINLP ve rMILP modelleri 6 farklı veri seti kullanılarak çalıştırılmıştır [85]. Kullanılan veri setlerinin boyutları birbirinden farklı olup dolayısıyla öncelik ilişkileri diyagramları, görev ve model sayıları birbirinden farklıdır. Bu yapılan analiz, rMILP’in performansının ne ölçüde iyi olduğunu kanıtlar niteliktedir ve büyük veri setlerinde kısa sürede optimal sonucu bulmasıyla MINLP modelinden farklılaştığını göstermektedir. Tablo 5.1’de $RP=1$ için bütün veri setleri özelinde kullanılan parametreler verilmiştir. Minimum çevrim süresi, maksimum çevrim süresi, maksimum istasyon sayısı ve adım büyüklüğü, $C_{artış}$, her bir problem özelinde verilmiştir. P-70 veri setine ait görev süreleri ve talep oranları ekte Tablo A.11 ve Tablo A.12’de, P-83 veri setine ait görev süreleri ve talep oranları ekte Tablo A.13 ve Tablo A.14’te, P-89 veri setine ait görev süreleri ve talep oranları Tablo A.15 ve Tablo A.16’da, P-94 veri setine ait görev süreleri ve talep oranları ekte Tablo A.17 ve Tablo A.18’de, P-111 veri setine ait görev süreleri ve talep oranları ekte Tablo A.19 ve Tablo A.20’de, P-148 veri setine ait görev süreleri ve talep oranları ekte Tablo A.21 ve Tablo A.22’de verilmiştir.

Tablo 5.1: $RP=1$ için veri setlerinde kullanılan parametreler.

Veri Setleri/ Parametreler	C_{min}	C_{max}	K_{max}	$C_{artış}$
P-70 tongue	156	234	18	5
P-83 arcus	3691	5537	14	111
P-89 lutz-2	20	35	17	-
P-94 mukherje	171	257	20	6
P-111 arcus	6615	9923	16	198
P-148 bartholdi-1	383	575	12	-

Tablo 5.1’deki parametreler kullanılarak 6 farklı veri seti için MINLP ve rMILP modelleri 30dk boyunca çalıştırılmıştır. Modellerin sonuçları Tablo 5.2’de verilmiştir. Tablo 5.2 her bir veri setinin $RP=1$ için yeniden dengelenmiş urumdaki çevrim zamanını, istasyon sayısını ve hat etkinliğini göstermektedir.

Tablo 5.2: $RP=1$ için MINLP ve rMILP modellerinin karşılaştırılması.

Veri Setleri/ Performans Kriterleri	Bir İstasyona Atanabilecek Max Operatör Sayısı (RP) = 1										
	MINLP					rMILP					
	C	K	OP	LE (%)	Çalışma Süresi (sn)	C	K	OP	LE (%)	Fark (%)	Çalışma süresi (sn)
P-70 tongue	220	16	16	98.83	1200	176	20	20	98.83	0.00	202.00
P-83 arcus	5467	14	14	98.51	272.20	5451	14	14	98.80	0.29	269.39
P-89 lutz-3	35	14	14	98.46	65.52	35	14	14	98.46	0.00	58.67
P-94 mukherje	214	20	20	98.21	811.32	213	20	20	98.67	0.46	694.27
P-111 arcus	924	16	16	96.59	1800	8397	18	18	96.36	-0.23	914.00
P-148 bartholdi-1	470	12	12	99.57	406.03	470	12	12	99.57	0.00	388.69

LE: Hat Etkinliği (%), OP: Toplam Operatör Sayısı, K: İstasyon Sayısı, C: Çevrim Süresi

$$Fark(\%) = \frac{LE_{rMILP} - LE_{MINLP}}{LE_{rMILP}} \quad (5.1)$$

Tablo 5.2'ye baktığımızda rMILP ve MINLP modellerinin veri setleri özelinde bulmuş oldukları hat etkinliklerini görmekteyiz. Bazı veri setleri için, örneğin P-70 Tongue ve P-148 Bartholdi-1, iki modelde 30dk boyunca çalıştırıldığında aynı sonucu vermektedir. Fakat P-70 Tongue için rMILP modeli optimal sonucu 202sn gibi kısa bir sürede elde etmekten MINLP modeli ancak 1200sn çalıştırıldığında optimal sonucu bulmaktadır. P-94 Mukherje için rMILP modeli iyi çözüme 694.27sn gibi kısa bir sürede ulaşırken MINLP modeli 811.32sn çalıştırıldığında iyi bir çözüm bulabilmektedir. P-111 Arcus veri seti için rMILP algoritmasının MINLP algoritmasından daha düşük bir hat etkinliği bulunduğunu görmekteyiz. Yine de rMILP algoritmasının bulmuş olduğu hat etkinliğinin %97'nin üzerinde olduğunu ve bu hat etkinliğinin MINLP algoritmasına göre çok daha hızlı bulunduğu görülmektedir. Dolayısıyla, rMILP algoritması daha düşük hat etkinliği verdiği durumda çalışma süresi MINLP algoritmasına göre daha kısadır ve rMILP algoritması MINLP algoritmasının bulmuş olduğu hat etkinliklerinden maksimum %0.2 oranda düşük hat etkinliği bulmuştur. Bunun da çözüm süresindeki iyileşmeden dolayı kabul edilebilir minimal bir fark olduğu söylenebilir.

Genel olarak bütün büyük veri setlerinin çözüm sürelerine baktığımızda, rMILP algoritması MINLP algoritmasına göre daha kısa bir sürede iyi bir sonuç bularak hat etkinliğinin maksimize edilmesini sağlamaktadır. Aynı zamanda, MINLP algoritması olurlu çözüm verdiği veri setleri için 60dk boyunca da çalıştırılmıştır fakat çözümde herhangi bir iyileşme sağlanamamıştır. Dolayısıyla, algoritmanın sonucunun belirli bir noktadan sonra iyileşmediğini söyleyebiliriz. Hem süre açısından hem de daha iyi bir çözüm bulabilmesi açısından rMILP algoritması firmalara avantaj sağlayabileceği düşünülmektedir. rMILP algoritması, makul ve kısa bir sürede ele alınan veri setleri için %95'in üzerinde hat etkinliğini garantilemektedir.

Tablo 5.4, RP=2 için MINLP ve rMILP algoritmalarının sonuçlarını göstermektedir. Her bir veri seti istasyona iki operatör atanabilecek şekilde tekrar çalıştırılmıştır. Tablo 5.3'te verilen parametreler kullanılarak MINLP ve rMILP algoritmaları RP=2 için 30dk boyunca çalıştırılmıştır. Tablo 5.4, her bir veri setinin RP=2 için çevrim zamanını, istasyon sayısını, toplam operatör sayısını ve hat etkinliğini göstermektedir. Adım büyüklüğü, C_{artis} için Tablo 5.1'de verilen değerler kullanılmıştır.

Tablo 5.3: RP=2 için veri setlerinde kullanılan parametreler.

Veri Setleri/ Parametreler	C_{min}	C_{max}	K_{max}
P-70 tongue	156	234	21
P-83 arcus	3691	5537	20
P-89 lutz-3	20	35	18
P-94 mukherje	171	257	24
P-111 arcus	6615	9923	21
P-148 bartholdi-1	383	575	12

Tablo 5.4: $RP=2$ için farklı veri setleri için MINLP ve rMILP modellerinin karşılaştırılması.

Veri Setleri/ Performans Kriterleri	Bir İstasyona Atanabilecek Max Operatör Sayısı (RP) = 2										
	MINLP					rMILP					
	C	K	OP	LE (%)	Çalışma Süresi (sn)	C	K	OP	LE (%)	Fark (%)	Çalışma süresi (sn)
P-70 tongue	167	11	21	99.20	1800	206	9	17	99.34	0.14	59.55
P-83 arcus	5414.5	8	14	99.46	1800	3802	10	20	99.15	-0.31	220.13
P-89 lutz-3	27	9	18	99.27	1800	27	9	18	99.27	0.00	66.04
P-94 mukherje	176	13	24	99.51	1800	176	13	24	99.51	0.00	199.17
P-111 arcus	7145	15	21	97.07	1800	9373	9	17	97.44	0.37	892.39
P-148 bartholdi-1	470	6	12	99.57	1800	470	6	12	99.57	0.00	514.95

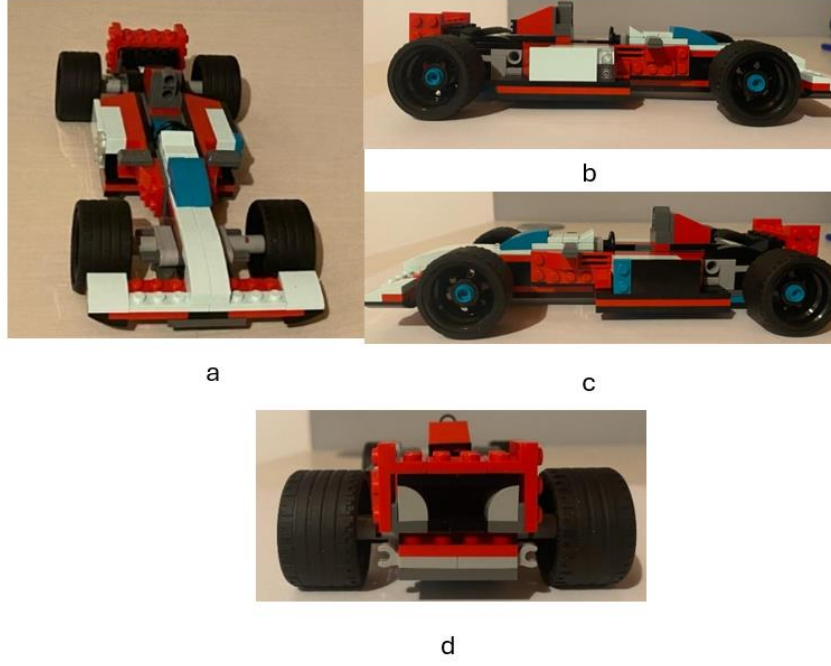
LE: Hat Etkinliği (%), OP: Toplam Operatör Sayısı, K: İstasyon Sayısı, C: Çevrim Süresi

Tablo 5.4'teki sonuçlara baktığımızda Tablo 5.2'deki sonuçlara benzer sonuçlar görmekteyiz. $RP=2$ için hat etkinlikleri rMILP ve MINLP algoritmalarında, $RP=1$ olduğu duruma göre daha fazladır. Tablo 5.4'teki hat etkinliği değerlerine baktığımızda rMILP algoritması MINLP algoritmasına göre ya aynı sonucu bulmuştur ya da daha iyi bir sonuç vermiştir. Sadece P-83 Arcus veri seti için iki algoritma arasında ufak bir farklılık oluşmaktadır. Bu durum diğer veri setleri için $RP=1$ probleminde de gözlemlenmiştir. P-83 Arcus veri seti için rMILP algoritmasının bulmuş olduğu hat etkinliği MINLP algoritmasının bulmuş olduğu hat etkinliğinden %0.3 daha azdır ve çözüm hızı %87.77 daha iyidir. Bu durumda yine hat etkinlikleri arasındaki fark, çözümü bulma süresindeki iyileşme çok fazla olduğu için kabul edilebilir gözükmemektedir. Dolayısıyla, problem karmaşıklaştıkça algoritmamızın avantajları daha da göz önüne çıkmaktadır. $RP=1$ için MINLP ve rMILP algoritmaları makul sürede çözüme ulaşabilmektedir. $RP=1$ için az bir farkta olsa rMILP algoritmasının daha hızlı sonuç verdiği gözlemlenmiştir. $RP=2$ için ise MINLP algoritmasının rMILP ile aynı çözümü bulabilmesi dakikalarını alabilmektedir. $RP=2$ için istasyonlara atanabilecek operatör sayısı ikiye çıkartıldığında atama yapılabilecek opsiyonların artması sebebiyle çözüm uzayı genişlemektedir. Bundan dolayı MINLP ve rMILP algoritmalarının çözümü bulma zamanı arasındaki fark açılmaktadır. Dolayısıyla, rMILP algoritmasının firmalara sağlayacağı en büyük avantaj çok kısa bir sürede hat etkinliğini maksimize edecek olan görev ve operatör ataması kombinasyonunu bulabilmesidir. Ayrıca, farklı çevrim zamanı/istasyon sayısı kombinasyonlarına sahip

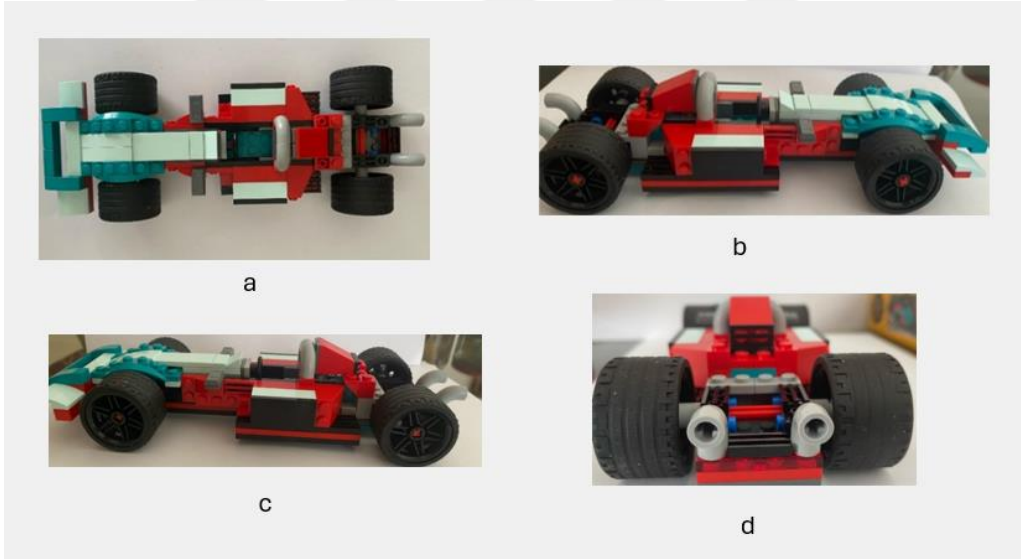
çözümler sunarak, hat üzerinde yapılacak olan planlamalara esneklik kazandırabilme kabiliyetine sahiptir.

5.2 Vaka Çalışması

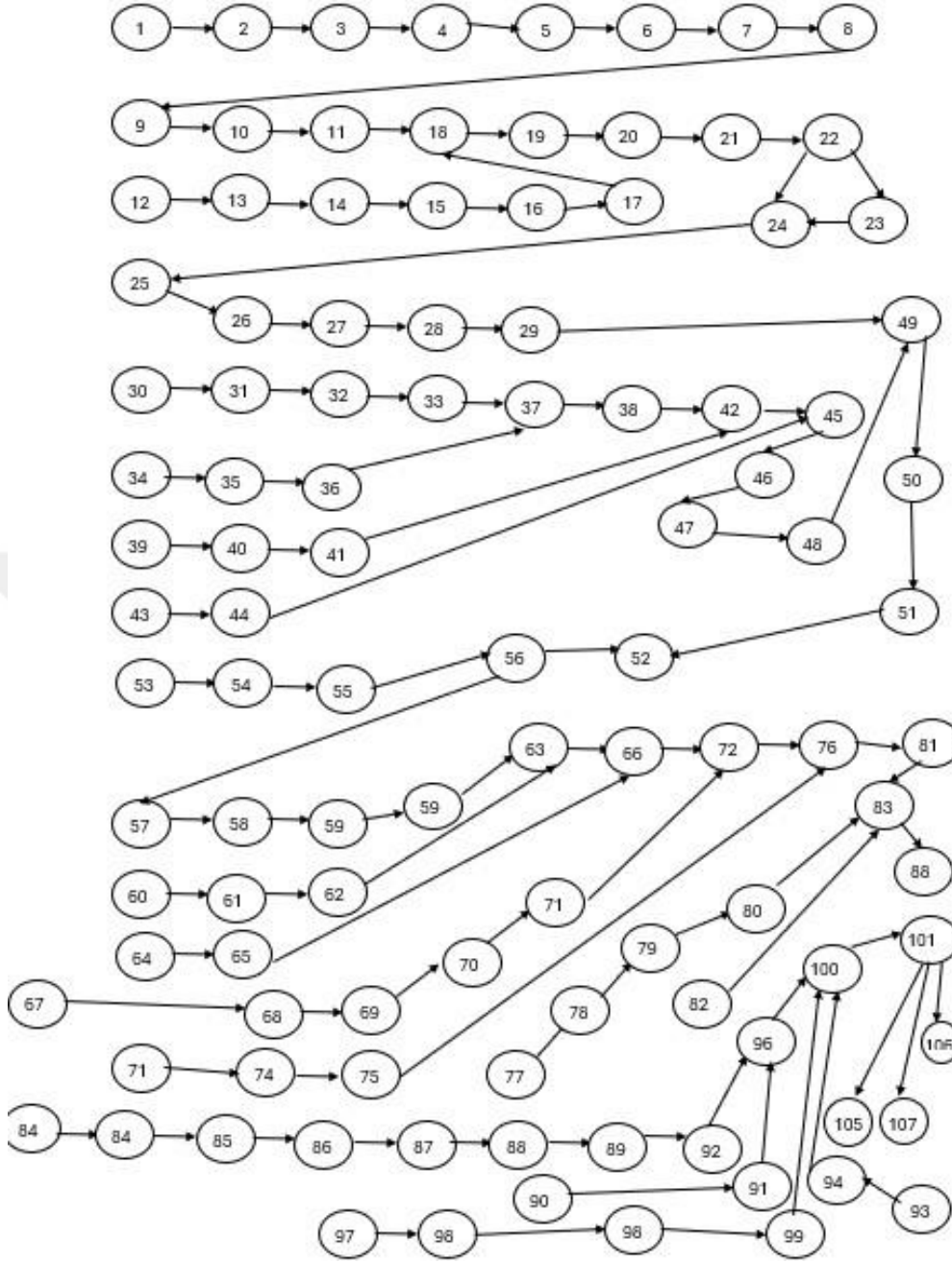
Bu bölümde, rMILP algoritmasının performansı vaka çalışması ile de test edilmiştir. Bu vaka çalışmasında 258 parçalık Lego kullanılmıştır. Lego parçalarının görev sürelerini belirleyebilmek adına zaman etüdü çalışması yapılmıştır. İstasyonlara operatörler atanarak hat etkinliği maksimize etme çalışması yapılmıştır. Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’te 2 farklı araç modelinin son montaj görüntüsü verilmiştir. Yapılan vaka çalışmasında iki farklı model olmasından dolayı her iki modelin de son montaj görünüşleri Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’te verilmiştir. Lego araç model birin Şekil 5.1’de, üstten görünüm, sağ yandan görünüm , sol yandan görünümü ve arkadan görünümü gösterilmiştir. Lego araç model ikinin Şekil 5.2’te, üstten görünümü, sağ yandan görünümü , sol yandan görünümü ve arkadan görünümü gösterilmiştir. Montaj hattında bazı parçalar monte edilmiş şekilde sisteme eklenmiştir bundan dolayı vaka çalışması 110 görevden oluşmaktadır. Veri setine ait öncelik ilişkileri diyagramı Şekil 5.3’te verilmiştir. P-110 veri setine ait görev süreleri ve talep oranları ekte Tablo A.23 ve Tablo A.24’de verilmiştir. Lego araçlar model 1 ve model 2 için elde edilen çözümün zaman etüdü süresi olan 593sn olarak ele alınmıştır.



Şekil 5.1: Lego araç model 1 son montaj halinin a) üstten b) soldan c) sağdan d)arkadan görünümü.



Şekil 5.2: Lego araç model 2 son montaj halinin a) üstten b) soldan c) sağdan d) arkadan görünümü.



Şekil 5.3: P-110 veri seti öncelik ilişkileri diyagramı.

5.3 P-110 Lego Test Problemi

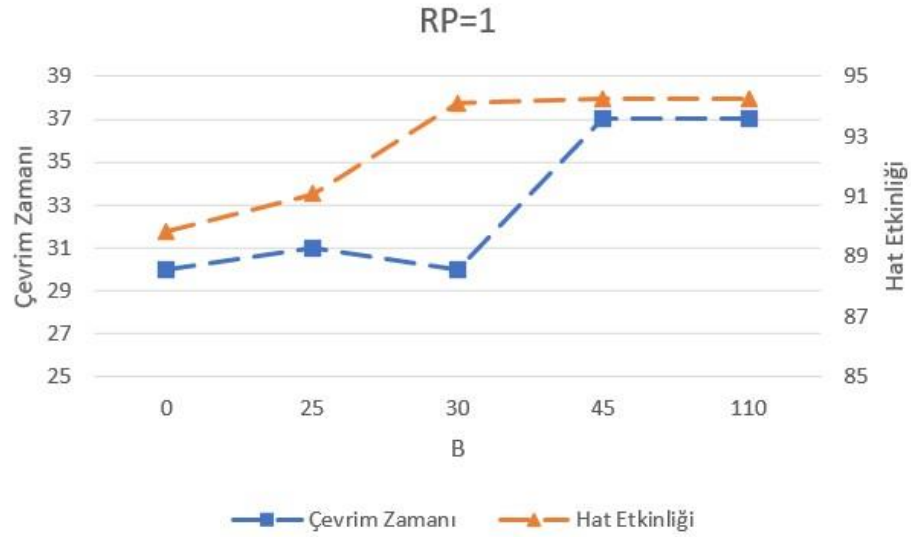
Geliştirilen model, P-110 Lego test problemi veri seti kullanılarak çalıştırılmıştır. P-110 lego test problemi veri seti için kullanılan parametreler Tablo 5.5'te verilmiştir. İzin verilen maksimum değişiklik sayısı, B değeri, 0'dan yani mevcut durumdan başlatılıp $\{1, 2, \dots, I\}$ 'ye kadar artırılarak model farklı B değerleri için test edilmiştir. Program bu veri seti için 110 defa çalıştırılmıştır ve çıktılar alınmıştır. Program, $RP = 1$ için optimum sonucu 85.38 sn'de ve $RP=2$ için 359.87sn gibi kısa bir sürede elde etmiştir.

Tablo 5.5: P-110 lego test problemi veri seti için $RP=1$ ve $RP=2$ kullanılan parametreler.

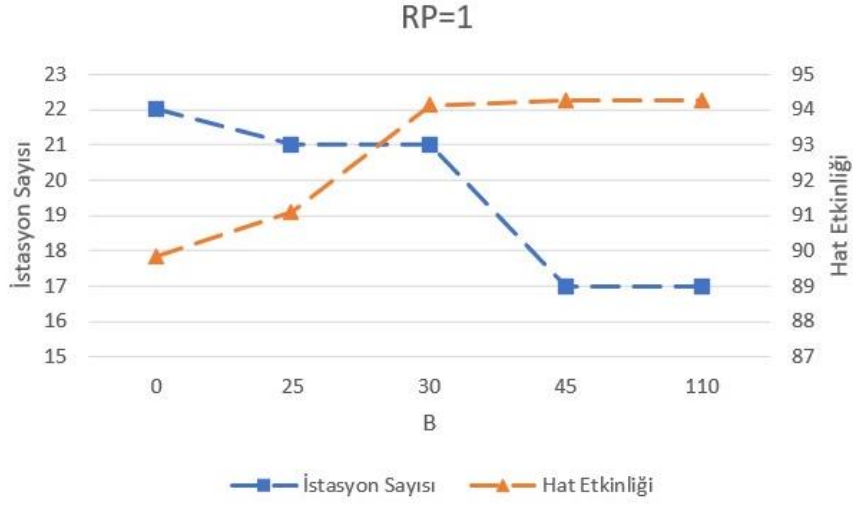
Parametreler	Değerler
C_{min}	30
C_{max}	45
K_{max}	22
OP	22

5.3.1 P-110 Veri Seti/ 1 Operatör

Şekil 5.4, her bir B değeri için istasyon sayısını ve hat etkinliğini göstermektedir. Şekil 5.5, her bir B değeri için çevrim süresi ve hat etkinliğini göstermektedir.



Şekil 5.4: $RP=1$ için B 'ye göre çevrim zamanı ve hat etkinliği değişimi.



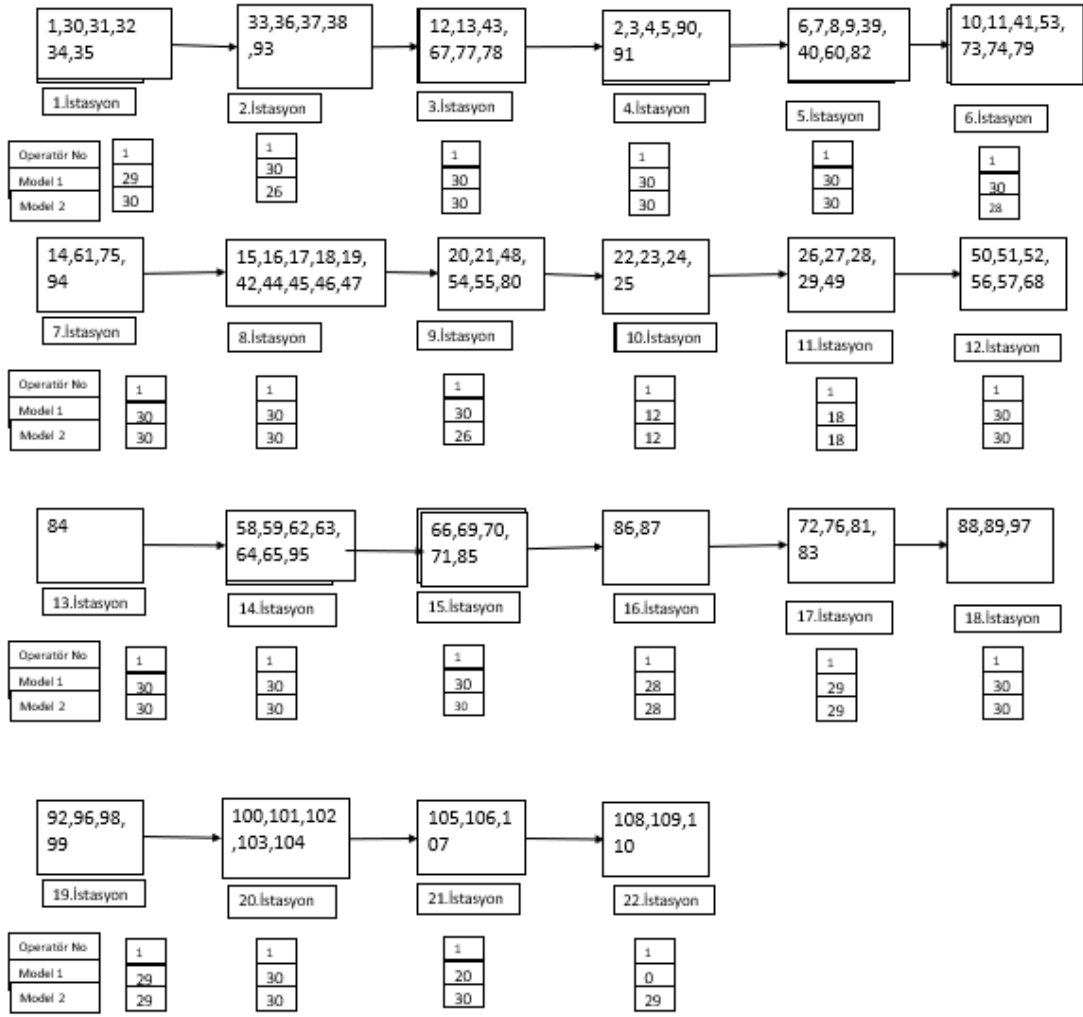
Şekil 5.5: RP=1 için B'ye göre istasyon sayısı ve hat etkinliği değişimi

Şekil 5.4 ve Şekil 5.5, $RP = 1$ durumundayken B değerlerine bağlı olarak istasyon sayısı ve hat etkinliği değişimini göstermektedir. $B = 0$ değeri için mevcut durumda istasyon sayısı 22 iken çevrim zamanı 30 olup hat etkinliği değeri %89.94'tür. Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'ye bakıldığında B değeri arttıkça mevcut durumun hat etkinliğinin arttığı görülmüştür. Örneğin $B = 25$ değeri için istasyon sayısı 21 iken çevrim zamanı 31 olup hat etkinliği %91.09'tur. $B = 45$ değeri için istasyon sayısı 17 iken çevrim zamanı 37 hat etkinliği %94.27'dir. Aynı zamanda, bu sonuçlar Tablo 5.6'da raporlanmıştır ve Tablo 5.6'da görüldüğü üzere açılan istasyon sayısı ve çevrim zamanı çarpımı minimize edilmiştir.

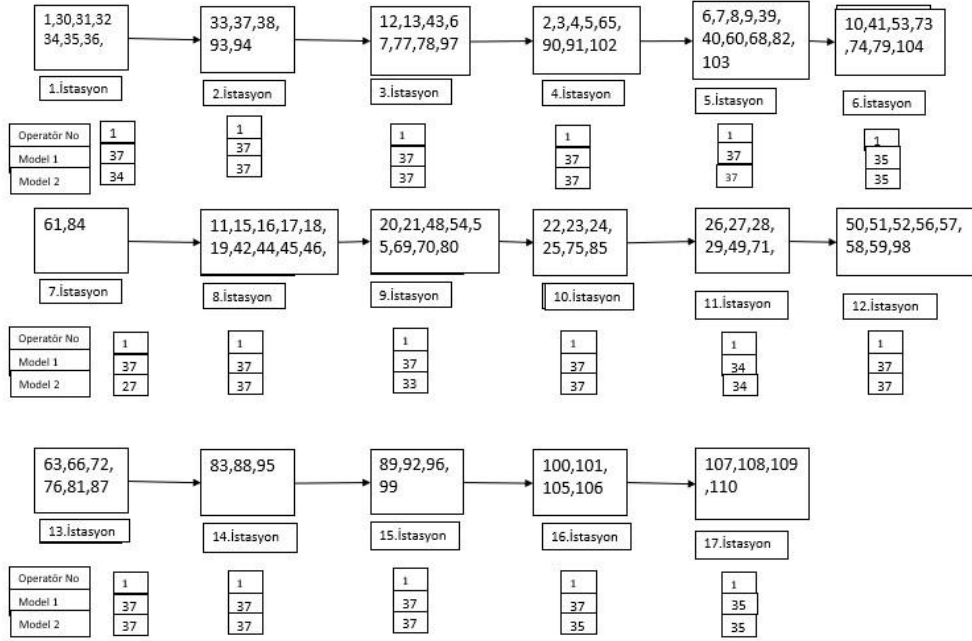
Tablo 5.6: P-110 lego vaka çalışması veri seti $RP=1$ için model sonuçları.

B	Çevrim Zamanı	İstasyon Sayısı	OP	OP*C	LE (%)
0	30	22	22	660	89.94
25	31	21	21	651	91.09
30	30	21	21	630	94.12
45	37	17	17	629	94.27*
110	37	17	17	629	94.27*

Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'ye $RP = 1$ için rMILP algoritması mevcut durum ve yeniden dengelenmiş durumundaki çözümü verilmiştir.

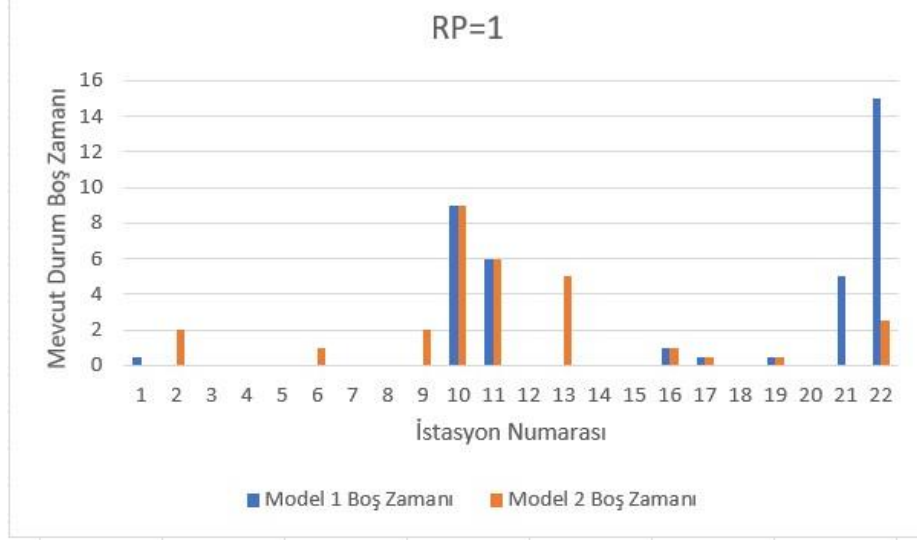


Şekil 5.6: P-110 lego veri seti $RP=1$ için mevcut durum.

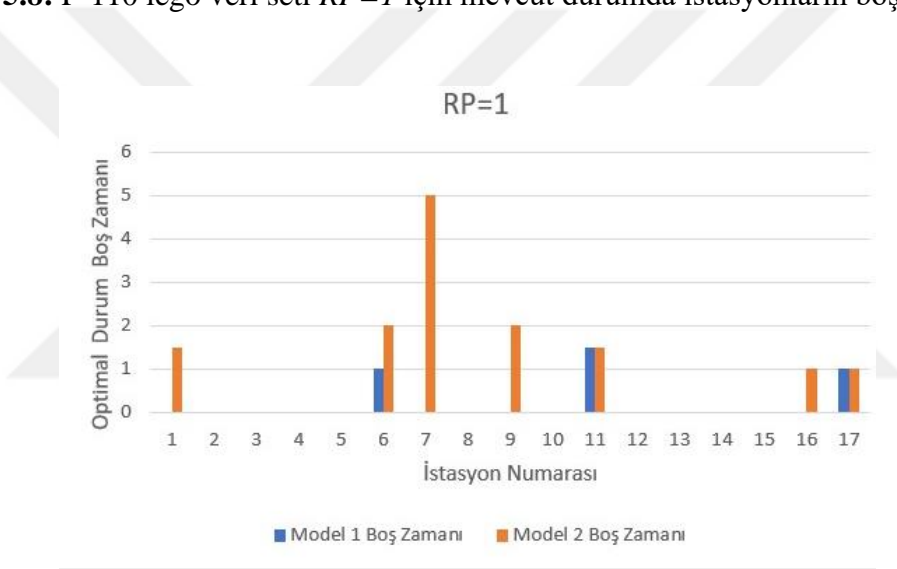


Şekil 5.7: P-110 lego veri seti $RP=1$ için rMILP optimal durumu.

Yeniden dengelenmiş durum için optimal çözümde açık olan istasyonlardan beşinin kapandığını ve toplamda 17 istasyon olduğunu görmekteyiz. Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'ye baktığımızda toplam değişiklik sayısının 45 olduğu görülmektedir. Yapılan değişimlerin, çevrim süresini ve izin verilen maksimum değişiklik sayısını aşmadığı ve öncelik ilişkilerine uygun olarak değiştiği görülmektedir. İstasyon iş yükleri incelendiği zaman ise istasyonların boş zamanlarının minimize edilip hat etkinliğinin maksimize edildiği görülmektedir. Mevcut durumdaki hat etkinliği %88.94 iken optimal durumda hat etkinliği %94.27'ye çıkarılmıştır. Mevcut durumda toplam istasyonların model bazında boş zamanlarına baktığımızda, model 1 için 37.5sn ve model 2 için 29.5sn'dir. rMILP algoritması için en iyi çözümde toplam istasyonların model bazında boş zamanlarına baktığımızda ise model 1 için 3.5sn ve model 2 için 14sn'dir. Bu durumda, istasyonların iş yüklerinin daha dengeli olup boş zamanlarının minimize edildiği görülmektedir. Aynı zamanda, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'ya bakıp mevcut durumun boş zamanının azaldığını gözlemleyebiliriz.



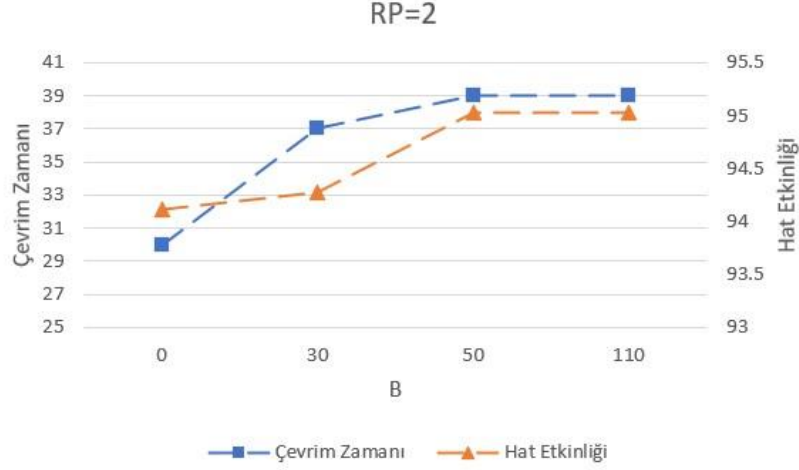
Şekil 5.8: P-110 lego veri seti $RP=1$ için mevcut durumda istasyonların boş zamanı.



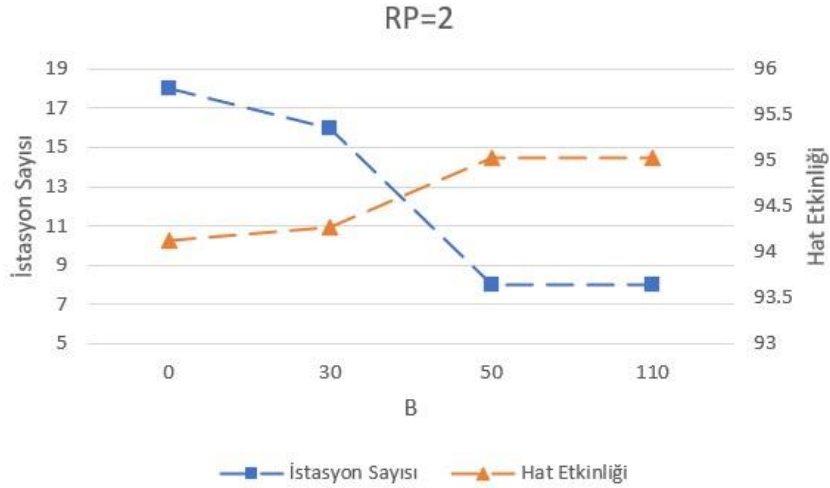
Şekil 5.9: P-110 lego veri seti $RP=1$ için yeniden dengelenmiş durumda istasyonların boş zamanı.

5.3.2 P-110 Veri Seti/ 2 Operatör

P-110 Lego test problemi veri seti için Tablo 5.5'te verilen parametreler kullanılarak istasyonlara atanabilecek operatör sayısı ikiye çıkartılıp modelimiz çalıştırılmıştır. Şekil 5.10 da, $RP = 2$ durumunda her bir B değeri için istasyon sayısını ve hat etkinliğini göstermektedir. Şekil 5.11, $RP = 2$ durumunda her bir B değeri için çevrim zamanı ve hat etkinliğini göstermektedir.



Şekil 5.10: $RP=2$ için B'ye göre çevrim zamanı ve hat etkinliği değişimi.



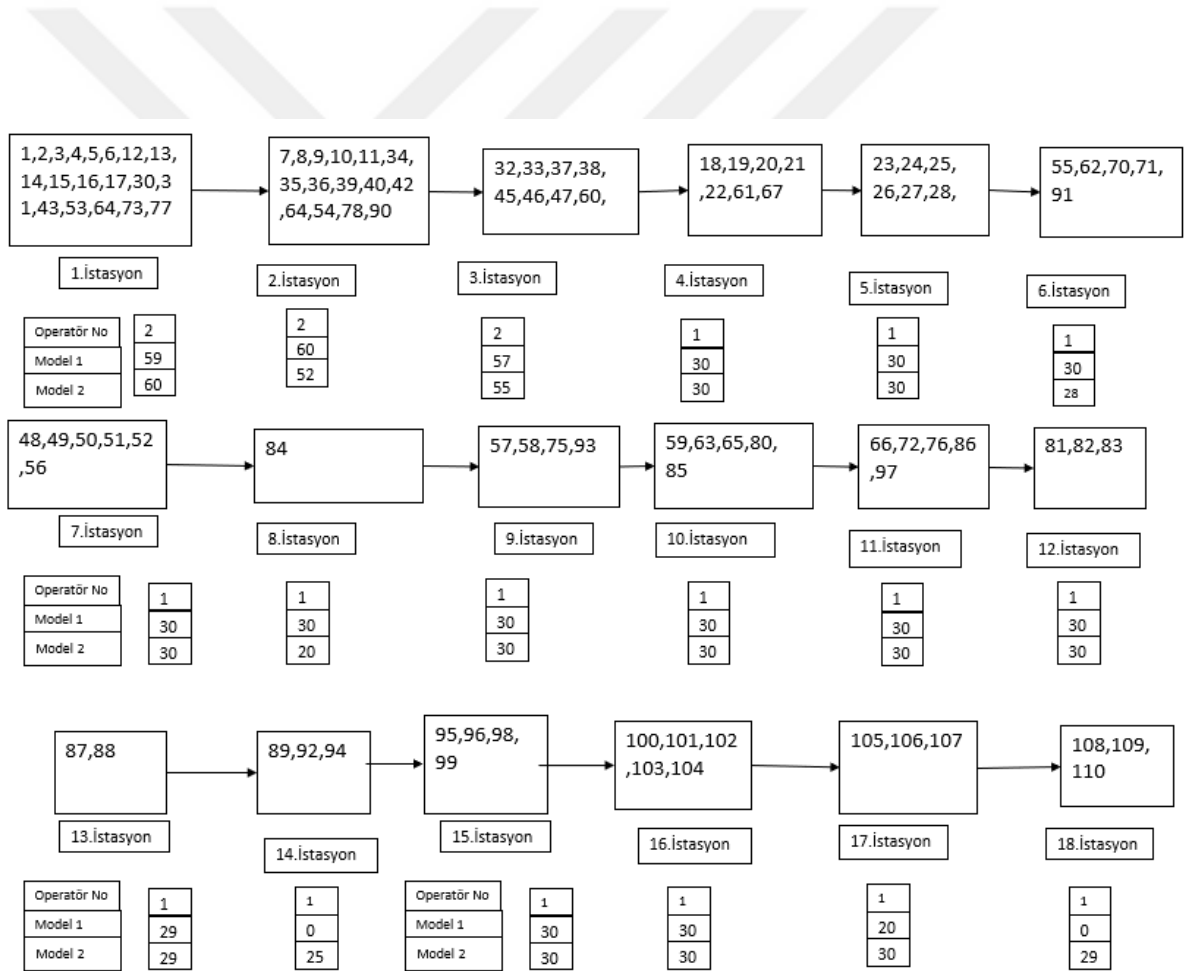
Şekil 5.11: $RP=2$ için B'ye göre istasyon sayısı ve hat etkinliği değişimi.

Şekil 5.10 ve Şekil 5.11, $RP = 2$ durumundayken B değerlerine bağlı olarak istasyon sayısı ve hat etkinliği değişimini göstermektedir. $B = 0$ değeri için mevcut durumda istasyon sayısı 18 iken çevrim zamanı 30 olup hat etkinliği değeri %94.12'dir. Şekil 5.10 ve Şekil 5.11'ye bakıldığında B değeri arttıkça mevcut durumun hat etkinliğinin arttığı görülmüştür. Örneğin $B = 30$ değeri için istasyon sayısı 16 iken çevrim zamanı 37 olup hat etkinliği %91.27'dir. $B = 50$ değeri için istasyon sayısı 8 iken çevrim zamanı 39 hat etkinliği %95.03'tür. Aynı zamanda, bu sonuçlar Tablo 5.7'de raporlanmıştır.

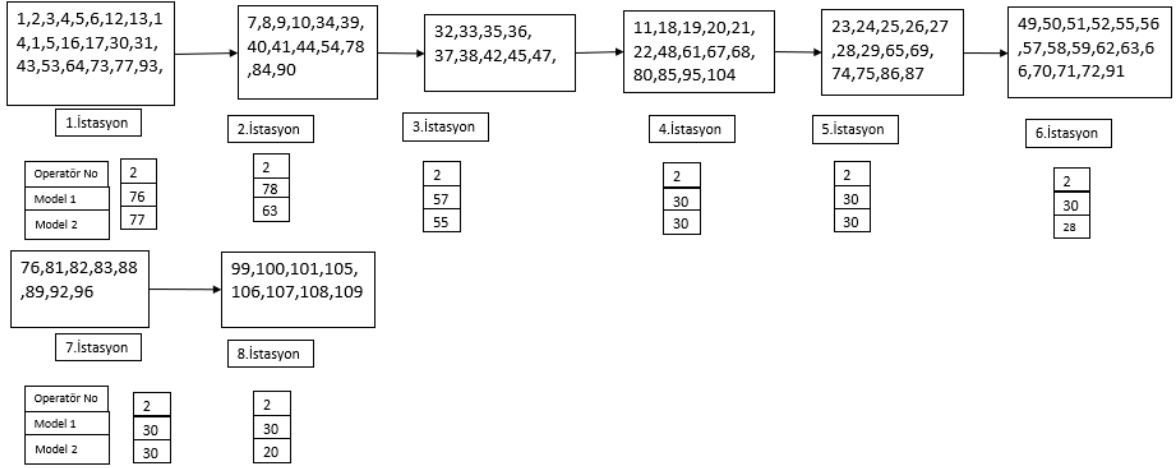
Tablo 5.7: P-110 lego vaka çalışması veri seti $RP=2$ için model sonuçları.

B	Çevrim	İstasyon	OP	OP*C	LE (%)
	Zamanı	Sayısı			
0	30	18	21	630	94.12
30	37	16	17	629	94.27
50	39	8	16	624	95.03*
110	39	8	16	624	95.03*

Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'ya $RP = 2$ için mevcut durum ve yeniden dengelenmiş durum verilmiştir.

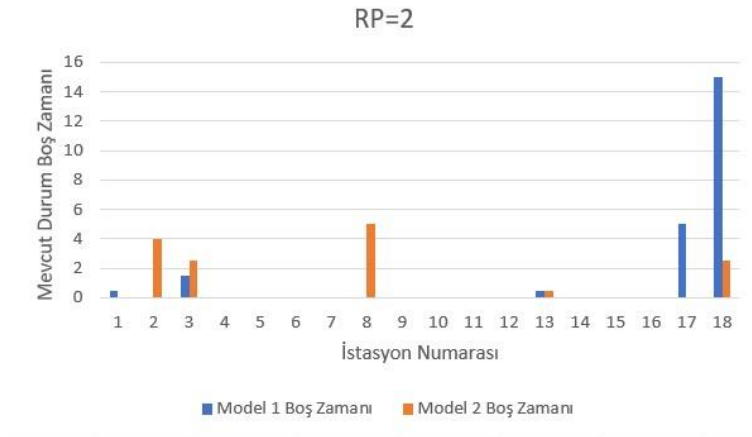


Şekil 5.12: P-110 lego veri seti $RP=2$ için mevcut durum.

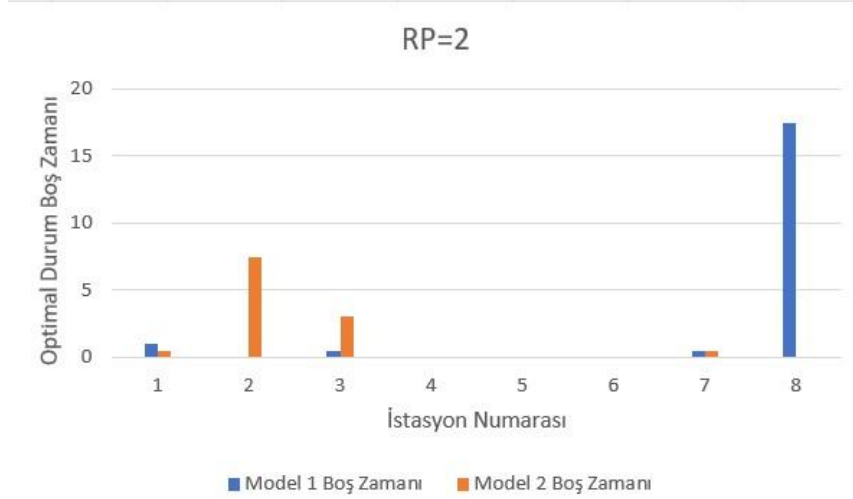


Şekil 5.13: P-110 lego veri seti $RP=2$ için rMILP algoritması en iyi çözüm.

Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'ye baktığımızda toplam değişiklik sayısının 50 olduğu görülmektedir. Yapılan değişimlerin, çevrim süresini ve izin verilen maksimum değişiklik sayısını aşmadığı ve öncelik ilişkilerine uygun olarak değiştiği görülmektedir. İstasyon iş yükleri incelendiği zaman ise istasyonların boş zamanlarının minimize edilip hat etkinliğinin maksimize edildiği görülmektedir. Mevcut durumdaki hat etkinliği %94.12 iken rMILP algoritması için en iyi çözümde hat etkinliği %95.03'ye çıkarılmıştır. Mevcut durumda toplam istasyonların model bazında boş zamanlarına baktığımızda, model 1 için 22.5sn ve model 2 için 13.5sn'dir. rMILP algoritması için en iyi çözümde toplam istasyonların model bazında boş zamanlarına baktığımızda ise model 1 için 19.5sn ve model 2 için 11.5sn'dir. Bu durumda, istasyonların iş yüklerinin daha dengeli olup boş zamanlarının minimize edildiği görülmektedir. Aynı zamanda, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'ye bakıp mevcut durumun boş zamanının azaldığını gözlemleyebiliriz.



Şekil 5.14: P-110 lego veri seti $RP=2$ için mevcut durumda istasyonların boş zamanı.



Şekil 5.15: P-110 lego veri seti $RP=2$ için rMILP algoritması en iyi çözüm istasyonların boş zamanı.

Lego vaka çalışmasının rMILP algoritması ile çözümü detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Ancak, Lego vaka çalışması MINLP algoritması ile çözülecek olsaydı, büyük boyutlu veri setlerindeki gibi program 1800 saniye ile sınırlandığında $RP=1$ için 96.38 saniyede %94.27 hat etkinliğine ulaşılacağı görülür. $RP=2$ durumunda ise, 1800 saniye sonrasında algoritma sonlandırıldığında elde edilen hat etkinliği %95.03'tür. Bu sonuçlara bakıldığında, rMILP algoritmasının MINLP algoritmasına göre çözüm zamanı açısından avantaj sağladığı vaka çalışmasında da ortaya çıkmaktadır.

5.4 Bölüm Sonu Değerlendirmesi

Bu bölümde, büyük boyutlu veri setlerinin rMILP ve MINLP algoritmaları ile çözülüp performansları karşılaştırılmıştır. Vaka çalışmasında 258 parçadan oluşan bir lego seti ile vaka çalışması yapılmıştır. 110 görevden oluşan 2 farklı model oluşturulup rMILP algoritması ile detaylı çözümü verilmiştir.

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışması karışık modellenli tip-E montaj hattı dengeleme problemlerinin hat etkinliğini maksimize etme amacıyla yeniden dengelenmesini ele almaktadır. Bunun için ilk olarak karışık tam sayılı doğrusal olmayan programlama modellenli geliştirilmiştir. Karışık modellenli tip-E montaj hattı dengeleme problemi literatürde tip-1, tip-2 problemlerine göre daha az çalışılmış bir konudur. Gerçek hayatta firmaların sürekli olarak karşılaştığı bir problem olmasına karşın literatürde az işlenen bir konu olmuştur. Problemin karmaşık yapısından ve çözümü zor olmasından dolayı geliştirilen matematiksel modellenli makul bir zamanda büyük boyutlu veri setlerinde iyi çözüm elde edememektedir. Bundan dolayı ikinci olarak geliştirilen modellenli iteratif sezgisel bir algoritma entegre edilmiştir. Tip-E probleminde amaç istasyon sayısını ve çevrim zamanını birlikte minimize etmektir, bundan dolayı tip-E probleminin amaç fonksiyonu doğrusal değildir. Önerilen algoritma ile çevrim zamanına minimum ve maksimum olmak üzere sınırlar verilerek tip-E probleminin amaç fonksiyonu doğrusallaştırılmıştır. Geliştirilen modellenli, verilen minimum ve maksimum çevrim süresi aralığındaki değerler için iteratif bir şekilde çalıştırılmıştır. C_{min} ve C_{max} olmak üzere alt ve üst sınır değerleri kullanarak modellenli çalıştırmak karar vericiye esneklik sağlama açısından oldukça avantaj sağlamaktadır. Verilen minimum çevrim süresinden başlayarak, $C_{artış}$, adım büyüklüğü olmak üzere maksimum çevrim süresine ulaşana kadar modellenli iteratif bir şekilde çalıştırılmıştır. Aynı zamanda, yapılan çalışmada işlerin istasyonlara atanma problemine, çok operatörlü istasyon kullanımı da dahil edilmiştir. Önerdiğimiz yöntem ile mevcut montaj hattının yeniden dengelenmesi sağlanmıştır. Önerilen modellenli, farklı boyutlardaki veri setleri ile test edilmiştir ve büyük boyutlu problemler için de makul bir sürede iyi bir çözümü etkin bir şekilde sağlamaktadır. Dolayısıyla bu çalışma, karar vericilere, gelişen pazarlara ve özel taleplere hızlı ve esnek bir şekilde cevap verebilme, montaj hatlarının verimli kullanılması, üretim sürecinin optimizasyonu ve maliyetleri kontrol edebilme gibi avantajlar sağlayarak müşteri memnuniyetini artırmaktadır.

Yapılan testlerin sonuçlarına baktığımızda, küçük boyutlu problemlerde, P-10 veri seti, P-19 thomopulos, P-28 heskia, P-32 lutz-1 ve P-45 kilbrid için, MINLP ve rMILP algoritmaları benzer sürelerde optimum sonuca ulaşmaktadır. Dolayısıyla, problemin boyutu küçük veya orta olduğunda iki algoritmanın iyi çözüme ulaşması için geçen sürede farklılık gözlemlenmemiştir. Fakat büyük boyutlu problemleri çözmeye başladığımızda önerilen sezgisel algoritmanın avantajları net bir şekilde gözlemlenebilmektedir. İki algoritma

arasındaki farkı gözlemleyebilmek için iki algoritma da aynı test setlerinde aynı sürede çalıştırılmıştır RP=1 durumunda izin verilen süre içerisinde sezgisel algoritma iyi çözüme kısa sürede ulaşırken, MINLP programında izin verilen sürede ulaştığı veya yaklaştığı görülmüştür. Fakat RP=2 durumunda izin verilen süre içerisinde sezgisel algoritma iyi çözüme kısa sürede ulaşırken rMILP algoritmasının iyi çözüme ulaştığı veya yaklaştığı gözlemlenmiştir. RP=2 durumunda, RP=1 durumuna göre hat etkinliği eşit ve ya hat etkinliğinin daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni çoklu operatörlerde istasyonlara atama yaparken daha fazla kombinasyon olacağı için boş zamanların minimize edilmesidir. Örneğin, 2 operatörlü problemde P-70 Thomopulos veri seti için algoritmaların çalışma süresi 30dk ile kısıtlandırılmıştır. MINLP 30dk içerisinde optimum sonuca ulaşamazken, rMILP algoritması 202sn gibi kısa bir sürede MINLP'ten daha iyi bir sonuca ulaşmaktadır. Bu sebeple, önerilen sezgisel algoritmanın zaman açısından çok büyük bir avantaj sağladığını söylenebilir. Büyük boyutlu problemler için ele alınan veri setlerinde en fazla 15dk içerisinde iyi bir sonuç bulmuştur.

Ayrıca, yapılan vaka çalışmasında gözlemlendiği üzere, rMILP algoritması etkin bir şekilde çalışmakta ve hattı makul sürelerde optimize edebilmektedir. MINLP algoritması ile kıyaslandığında, rMILP algoritmasının çok daha makul ve kısa sürede çözüm ürettiği ön plana çıkmaktadır.

Test sonuçlarına baktığımızda, önerilen sezgisel algoritmanın bazı sınırlamaları olduğu görülmüştür. Öncelikle, önerilen algoritmanın kısıtlaması görev sürelerinin büyümesine bağlı olarak C_{min} ve C_{max} arasındaki farkın açılmasından kaynaklanmaktadır. Bundan dolayı algoritma C_{min} ve C_{max} arasındaki her değer için çalıştırılmamaktadır. Bu yüzden rMILP algoritmasının adım büyüklüğü, $C_{artış}$, C_{min} değeri (%3) arttırılarak hesaplanmıştır. $C_{artış}$ değeri hesaplanırken test veri setlerinde ön çalışma yapılmış ve en iyi sonuçlar %3 artış ile sağlanmıştır. Normalde, Bölüm 3.2.1'de anlatıldığı gibi, algoritma çevrim süresi C_{min} 'den başlayarak C_{max} 'a kadar birer birer arttırılarak her değer için çalıştırılmaktadır. Fakat, görev süresi çok büyük olduğunda C_{min} ve C_{max} arasındaki her bir değer taranamamaktadır. Bundan kaynaklı olarak çözüm alanındaki bazı değerler gözden kaçmaktadır. Bazı veri setleri için rMILP algoritmasının MINLP algoritmasından daha düşük bir hat etkinliği elde etmesi bu durum ile açıklanabilir.

Diğer bir kısıtlaması ise, algoritmanın çalışma hızı görev sayısının büyüklüğünden ziyade görev sürelerinin ağırlıklı ortalamalarına bağlıdır. Dolayısıyla, algoritma P-111 Arcus veri seti için daha yavaş çalışırken P-148 Bartholdi-1 veri seti için daha hızlı çalışmaktadır. Yine de önerilen algoritma büyük boyutlu problemlerde de makul bir sürede MINLP modele göre daha iyi sonuçlar elde etmektedir. Algoritmanın en uzun çalışma süresinin 15dk olduğunu görmekteyiz. Bu da algoritmamızın büyük veri setlerine uygulanabilme açısından kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

Gelecek çalışmalarda modelimiz, U tipi, iki taraflı paralel hatlar ve robotik hatlar dahil olmak üzere çeşitli hat yerleşimleri için geliştirilebilir. Ayrıca model, yüzlerce işin yer aldığı daha karmaşık senaryoları ele alarak gerçek hayattaki veri kümeleriyle test edilebilir. Programımızın farklı veri setlerinde kullanımını daha etkin ve verimli hale getirebilmek adına, veri setinin boyutuna ve veri setindeki çevrim sürelerini dikkate alarak veri seti özelinde hangi adım sayısının, $C_{artış}$, daha iyi sonuç verdiğini öğrenebilecek makine öğrenmesi algoritmaları entegre edilebilir. Program bölgeleme kısıtı gibi farklı kısıtlar eklenerek geliştirilebilir ve kıyaslama yapılabilir. Aynı zamanda, yüzlerce görevi içeren daha büyük ölçekli problemleri daha kısa zamanda daha etkin çözmek için meta-sezgisel yöntemler geliştirilebilir.

7. KAYNAKLAR

- [1] Nesime Acar, Kesikli Seri Üretim Sistemlerinde Planlama Ve Kontrol Çalışmaları 309. Cilt/Millî Prodüktivite Merkezi Yayınları. 1991.
- [2] R. Wild, “Mass-Production Management: The Design and Operation of Production Flow-Line Systems.” 1972.
- [3] İ. Baybars and I. Baybars, “A Survey of Exact Algorithms for the Simple Assembly Line Balancing Problem A Survey of Exact Algorithms for the Simple Assembly Line Balancing Problem*,” 1986.
- [4] Kucukkoc Ibrahim, “Modelling and Solving Mixed-Model Parallel Two-Sided Assembly Line Problems”, University of Exeter (United Kingdom), 2015.
- [5] Scholl, A., & Becker, C., “State-Of-The-Art Exact and Heuristic Solution Procedures for Simple Assembly Line Balancing,” Eur J Oper Res, Vol. 168, No. 3, Pp. 666–693, 2006.
- [6] J. C. Chen, C. C. Chen, L. H. Su, H. Bin Wu, and C. J. Sun, “Assembly Line Balancing in Garment Industry,” Expert Syst Appl, Vol. 39, No. 11, Pp. 10073–10081, Sep. 2012, Doi: 10.1016/J.Eswa.2012.02.055.
- [7] P. Sadeghi, R. D. Rebelo, and J. S. Ferreira, “Balancing Mixed-Model Assembly Systems in the Footwear Industry with a Variable Neighborhood Descent Method,” Comput Ind Eng, Vol. 121, Pp. 161–176, Jul. 2018, Doi: 10.1016/J.Cie.2018.05.020.
- [8] H. Gökçen, Karışık Modelli Deterministik Montaj Hattı Dengeleme Problemleri İçin Yeni Modeller, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, 1994.
- [9] I. Kucukkoc, *Montaj Hattı Planlama*, 1. Baskı. Ankara: Modelleme Ve Optimizasyon Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık, 2020.
- [10] J. L. C. Macaskill, “Production-Line Balances for Mixed-Model Lines.,” Manage Sci, Vol. 19, No. 4 Part 1, Pp. 423–434, 1972, Doi: 10.1287/Mnsc.19.4.423.
- [11] R. and W. Ray Wild Holt, Production and Operations Management, Holt, Rinehart and Winston, 1979.
- [12] A. Legesse, E. Tesfaye, and E. Berhan, “Multi-Objective Optimization of Mixed Model Assembly Line Balancing In An Assemble-To-Order Industry with Stochastic Environment,” International Journal of Engineering, Science And Technology, Vol. 12, No. 3, Pp. 90–107, Sep. 2020, Doi: 10.4314/İjest.V12i3.9.
- [13] M. F. F. Ab Rashid, A. Tiwari, and W. Hutabarat, “Integrated Optimization of Mixed-Model Assembly Sequence Planning and Line Balancing Using Multi-Objective Discrete Particle Swarm Optimization,” Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and

- Manufacturing: *AIEDAM*, Vol. 33, No. 3, Pp. 332–345, Aug. 2019, Doi: 10.1017/S0890060419000131.
- [14] S. Ghosh and R. J. Gagnon, “A Comprehensive Literature Review and Analysis of The Design, Balancing and Scheduling of Assembly Systems,” *Int J Prod Res*, Vol. 27, No. 4, Pp. 637–670, 1989, Doi: 10.1080/00207548908942574.
- [15] Y. Kara, H. Gökçen, and Y. Atasagun, “Balancing Parallel Assembly Lines with Precise and Fuzzy Goals,” *Int J Prod Res*, Vol. 48, No. 6, Pp. 1685–1703, Jan. 2010, Doi: 10.1080/00207540802534715.
- [16] Y. Atasagun and Y. Kara, “Bacterial Foraging Optimization Algorithm for Assembly Line Balancing,” *Neural Comput Appl*, Vol. 25, No. 1, Pp. 237–250, 2014, Doi: 10.1007/S00521-013-1477-9.
- [17] G. R. Aase, J. R. Olson, and M. J. Schniederjans, “U-Shaped Assembly Line Layouts and Their Impact On Labor Productivity: An Experimental Study,” *Eur J Oper Res*, Vol. 156, No. 3, Pp. 698–711, Aug. 2004, Doi: 10.1016/S0377-2217(03)00148-6.
- [18] I. Kucukkoc and D. Z. Zhang, “Simultaneous Balancing and Sequencing of Mixed-Model Parallel Two-Sided Assembly Lines,” *Int J Prod Res*, Vol. 52, No. 12, Pp. 3665–3687, 2014, Doi: 10.1080/00207543.2013.879618.
- [19] P. Su, N. Wu, And Z. Yu, “A Petri Net-Based Heuristic for Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem of Type-E,” *Int J Prod Res*, Vol. 52, No. 5, Pp. 1542–1556, Mar. 2014, Doi: 10.1080/00207543.2013.849010.
- [20] B. Bryton, “Balancing of a Continuous Production Line,” Doctoral dissertation, Northwestern University, 1954.
- [21] M. E. Salveson, “The Assembly-Line Balancing Problem,” *Transactions of The American Society of Mechanical Engineers*, Vol. 77, No. 6, Pp. 939–947, 1955.
- [22] A. L. Gutjahr and G. L. Nemhauser, “An Algorithm for The Line Balancing Problem,” 1964. [Online]. Available: <https://www.jstor.org/stable/2627603>
- [23] Helgeson, W. B., & Birnie, D. P., “Assembly Line Balancing Using the Ranked Positional Weight Technique,” *Journal of Industrial Engineering*, Vol. 12, No. 6, Pp. 394–398, 1961.
- [24] F. M. Tongue, *A Heuristic Program for Assembly Line Balancing*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1961.
- [25] M. Kilbridge and L. Wester, “The Balance Delay Problem,” 1961. [Online]. Available: <https://about.jstor.org/terms>
- [26] A.L. Arcus, “COMSOAL: A Computer Method of Sequencing Operations for Assembly Lines,” *Int J Prod Res*, Vol. 4, Pp. 259–277, 1966.

- [27] E. M. Dar-El, "MALB—A Heuristic Technique for Balancing Large Single-Model Assembly Lines.," *AIIE Transactions*, Vol. 5, No. 4, Pp. 343–356, 1973.
- [28] N. T. Thomopoulos, "Line Balancing-Sequencing for Mixed-Model Assembly," 1967. [Online]. Available: <https://www.jstor.org/stable/2628205>
- [29] N. T. Thomopoulos, "Mixed Model Line Balancing with Smoothed Station Assignments," 1970. [Online]. Available: <https://www.jstor.org/stable/2628704>
- [30] Gokcen Hadi, "Karişik Modelli Deterministik Montaj Hattı Dengeleme Problemleri için Yeni Modeller," 1994.
- [31] S. Emde, N. Boysen, and A. Scholl, "Balancing Mixed-Model Assembly Lines: A Computational Evaluation of Objectives to Smoothen Workload," *Int J Prod Res*, Vol. 48, No. 11, Pp. 3173–3191, Jan. 2010, Doi: 10.1080/00207540902810577.
- [32] T. C. Lopes, A. S. Michels, C. G. S. Sikora, and L. Magatão, "Balancing and Cyclical Scheduling of Asynchronous Mixed-Model Assembly Lines with Parallel Stations," *J Manuf Syst*, Vol. 50, Pp. 193–200, Jan. 2019, Doi: 10.1016/J.Jmsy.2019.01.001.
- [33] L. Belkharroubi and K. Yahyaoui, "A Hybrid Approach for The Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem Type-II," In *Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACS 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, Pp. 329–332. Doi: 10.1109/IDAACS53288.2021.9661039.
- [34] L. Belkharroubi and K. Yahyaoui, "Solving the Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem Type-I Using a Hybrid Reactive GRASP," *Prod Manuf Res*, Vol. 10, No. 1, Pp. 108–131, 2022, Doi: 10.1080/21693277.2022.2065380.
- [35] T. C. Lopes, A. S. Michels, R. Lüders, and L. Magatão, "A Simheuristic Approach for Throughput Maximization of Asynchronous Buffered Stochastic Mixed-Model Assembly Lines," *Comput Oper Res*, Vol. 115, Mar. 2020, Doi: 10.1016/J.Cor.2019.104863.
- [36] T. Mönch, A. Huchzermeier, and P. Bebersdorf, "Variable Takt Times in Mixed-Model Assembly Line Balancing with Random Customisation," *Int J Prod Res*, Vol. 59, No. 15, Pp. 4670–4689, 2021, Doi: 10.1080/00207543.2020.1769874.
- [37] K. Meng, Q. Tang, L. Cheng, and Z. Zhang, "Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem Considering Preventive Maintenance Scenarios: MILP Model and Cooperative Co-Evolutionary Algorithm," *Appl Soft Comput*, Vol. 127, Sep. 2022, Doi: 10.1016/J.Asoc.2022.109341.

- [38] P. Samouei and J. Ashayeri, "Developing Optimization & Robust Models for a Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem with Semi-Automated Operations," *Appl Math Model*, Vol. 72, Pp. 259–275, Aug. 2019, Doi: 10.1016/J.Apm.2019.02.019.
- [39] Z. Zhang, M. Chica, Q. Tang, Z. Li, and L. Zhang, "A Multi-Objective Co-Evolutionary Algorithm for Energy and Cost-Oriented Mixed-Model Assembly Line Balancing with Multi-Skilled Workers," *Expert Syst Appl*, Vol. 236, Feb. 2024, Doi: 10.1016/J.Eswa.2023.121221.
- [40] A. Nourmohammadi, A. H. C. Ng, M. Fathi, J. Vollebregt, and L. Hanson, "Multi-Objective Optimization of Mixed-Model Assembly Lines Incorporating Musculoskeletal Risks Assessment Using Digital Human Modeling," *CIRP J Manuf Sci Technol*, Vol. 47, Pp. 71–85, Dec. 2023, Doi: 10.1016/J.Cirpj.2023.09.002.
- [41] Y. Li, D. Liu, and I. Kucukkoc, "Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem Considering Learning Effect and Uncertain Demand," *J Comput Appl Math*, Vol. 422, Apr. 2023, Doi: 10.1016/J. Cam.2022.114823.
- [42] Y. Delice, E. K. Aydoğan, S. Himmetoğlu, and U. Özcan, "Integrated Mixed-Model Assembly Line Balancing and Parts Feeding with Supermarkets," *CIRP J Manuf Sci Technol*, Vol. 41, Pp. 1–18, Apr. 2023, Doi: 10.1016/J.Cirpj.2022.12.002.
- [43] M. D. Mura and G. Dini, "Improving Ergonomics in Mixed-Model Assembly Lines Balancing Noise Exposure and Energy Expenditure," *CIRP J Manuf Sci Technol*, Vol. 40, Pp. 44–52, Feb. 2023, Doi: 10.1016/J.Cirpj.2022.11.005.
- [44] J. I. Anel, P. Català, M. Serra, and B. Domenech, "New Matrix Methodology for Algorithmic Transparency in Assembly Line Balancing Using a Genetic Algorithm," *Operations Research Perspectives*, Vol. 9, Jan. 2022, Doi: 10.1016/J. Orp.2022.100223.
- [45] Z. A. Çil, Z. Li, S. Mete, and E. Özceylan, "Mathematical Model and Bee Algorithms for Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem with Physical Human–Robot Collaboration," *Applied Soft Computing Journal*, Vol. 93, Aug. 2020, Doi: 10.1016/J.Asoc.2020.106394.
- [46] H. M. Alakaş and B. Toklu, "Problem Specific Variable Selection Rules for Constraint Programming: A Type II Mixed Model Assembly Line Balancing Problem Case," *Applied Artificial Intelligence*, Vol. 34, No. 7, Pp. 564–584, Jun. 2020, Doi: 10.1080/08839514.2020.1731782.
- [47] C. J. Z. F. Z. S. Luo Yuwei, "A Research of Multi-Constrained Two-Sided Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem Based on Genetic Algorithm," Bangkok, Thailand.: IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications, Apr. 2020.

- [48] S., N. C., & M. A. Yaphiar, “Mixed Model Assembly Line Balancing for Human-Robot Shared Tasks,” in In IMEC-APCOMS 2019: Proceedings Of The 4th International Manufacturing Engineering Conference and The 5th Asia Pacific Conference On Manufacturing Systems, Singapore, 2020, Pp. 245–252.
- [49] M. Lalaoui and A. El Afia, “A Versatile Generalized Simulated Annealing Using Type-2 Fuzzy Controller for The Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem,” in *IFAC-Papersonline*, Elsevier B.V., Sep. 2019, Pp. 2804–2809. Doi: 10.1016/J.Ifacol.2019.11.633.
- [50] P. Sadeghi, R. D. Rebelo, and J. S. Ferreira, “Balancing Mixed-Model Assembly Systems In The Footwear Industry with a Variable Neighborhood Descent Method,” *Comput Ind Eng*, Vol. 121, Pp. 161–176, Jul. 2018, Doi: 10.1016/J.Cie.2018.05.020.
- [51] B. Naderi, A. Azab, and K. Borooshan, “A Realistic Multi-Manned Five-Sided Mixed-Model Assembly Line Balancing and Scheduling Problem with Moving Workers and Limited Workspace,” *Int J Prod Res*, Vol. 57, No. 3, Pp. 643–661, Feb. 2019, Doi: 10.1080/00207543.2018.1476786.
- [52] X. Liu, M. Lei, Q. Zeng, and A. Li, “Integrated Optimization of Mixed-Model Assembly Line Balancing and Buffer Allocation Based on Operation Time Complexity,” In *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2019, Pp. 1040–1045. Doi: 10.1016/J.Procir.2019.03.248.
- [53] F. Tanhaie, M. Rabbani, and N. Manavizadeh, “Simultaneous Balancing and Worker Assignment Problem for Mixed-Model Assembly Lines in a Make-To-Order Environment Considering Control Points and Assignment Restrictions,” *Journal of Modelling in Management*, Vol. 15, No. 1, Pp. 1–34, Jan. 2020, Doi: 10.1108/JM2-04-2018-0052.
- [54] N. Manavizadeh, M. Rabbani, D. Moshtaghi, and F. Jolai, “Mixed-Model Assembly Line Balancing in The Make-To-Order and Stochastic Environment Using Multi-Objective Evolutionary Algorithms,” *Expert Syst Appl*, Vol. 39, No. 15, Pp. 12026–12031, Nov. 2012, Doi: 10.1016/J.Eswa.2012.03.044.
- [55] N. Boysen, M. Fliedner, And A. Scholl, “A Classification of Assembly Line Balancing Problems,” *Eur J Oper Res*, Vol. 183, No. 2, Pp. 674–693, Dec. 2007, Doi: 10.1016/J.Ejor.2006.10.010.
- [56] C. Becker and A. Scholl, “A Survey on Problems and Methods in Generalized Assembly Line Balancing,” in *European Journal of Operational Research*, Feb. 2006, Pp. 694–715. Doi: 10.1016/J.Ejor.2004.07.023.
- [57] Armin Scholl, *Data of Assembly Line Balancing Problems*, Techn. Hochsch. Inst. Für Betriebswirtschaftslehre., 1995.

- [58] J., & C. A. Plans, “Modelling and Solving The SALB-E Problem,” In IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP’99) (Cat. No. 99TH8470)., IEEE, 1999, Pp. 356–360.
- [59] C. Dillenberger, L. F. Escudero, A. Wollensak, And W. Zhang, “On Practical Resource Allocation for Production Planning and Scheduling with Period Overlapping Setups,” 1994.
- [60] N. C. Wei and I. M. Chao, “A Solution Procedure for Type E Simple Assembly Line Balancing Problem,” *Comput Ind Eng*, Vol. 61, No. 3, Pp. 824–830, Oct. 2011, Doi: 10.1016/J.Cie.2011.05.015.
- [61] P. T. Zacharia and A. C. Nearchou, “A Meta-Heuristic Algorithm for The Fuzzy Assembly Line Balancing Type-E Problem,” *Comput Oper Res*, Vol. 40, No. 12, Pp. 3033–3044, 2013, Doi: 10.1016/J.Cor.2013.07.012.
- [62] I. Kucukkoc, Z. Li, A. D. Karaoglan, and D. Z. Zhang, “Balancing of Mixed-Model Two-Sided Assembly Lines with Underground Workstations: A Mathematical Model and Ant Colony Optimization Algorithm,” *Int J Prod Econ*, Vol. 205, Pp. 228–243, Nov. 2018, Doi: 10.1016/J.Ijpe.2018.08.009.
- [63] R. Esmailbeigi, B. Naderi, and P. Charkhgard, “The Type E Simple Assembly Line Balancing Problem: A Mixed Integer Linear Programming Formulation,” *Comput Oper Res*, Vol. 64, Pp. 168–177, Jun. 2015, Doi: 10.1016/J.Cor.2015.05.017.
- [64] M. Jusop and M. F. F. Ab Rashid, “A Review on Simple Assembly Line Balancing Type-E Problem,” in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Institute of Physics Publishing, Dec. 2015. Doi: 10.1088/1757-899X/100/1/012005.
- [65] M. Jusop and M. F. F. A. Rashid, “Optimization of Assembly Line Balancing Type-E With Resource Constraints Using NSGA-II,” in Key Engineering Materials, Trans Tech Publications Ltd, 2016, Pp. 195–199. Doi: 10.4028/Www.Scientific.Net/KEM.701.195.
- [66] J. Zhang, P. Wang, and B. Xin, “Study on Aircraft Assembly Line Balancing Problem Based on Mobile Workers,” 2016. [Online]. Available: [Http://Proceedings.Asmedigitalcollection.Asme.Org/Pdfaccess.Ashx?Url=/Data/Conferences/Asmep/90691/](http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/pdfaccess.ashx?url=/data/conferences/asmep/90691/)
- [67] A. Corominas, A. García-Villoria, and R. Pastor, “Improving the Resolution of the Simple Assembly Line Balancing Problem Type E,” *Statistics & Operations Research Transactions SORT*, Vol. 40, No. 2, [Online]. Available: [Www.Ídescat.Cat/Sort/](http://www.idescat.cat/sort/)
- [68] I., M. M., E. F. S., & E. M. Z. Belassiria, An Efficient Approach for Workload Balancing of Assembly Line Systems with Assignment Restrictions. IEEE, 2017.

- [69] M. K. Oksuz, K. Buyukozkan, and S. I. Satoglu, “U-Shaped Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem: A Mathematical Model and Two Meta-Heuristics,” *Comput Ind Eng*, Vol. 112, Pp. 246–263, Oct. 2017, Doi: 10.1016/J.Cie.2017.08.030.
- [70] M. Fathi, A. Nourmohammadi, and A. H. C. Ng, “Assembly Line Balancing Type-E With Technological Requirement: A Mathematical Model,” In *Advances in Transdisciplinary Engineering*, IOS Press BV, 2018, Pp. 183–188. Doi: 10.3233/978-1-61499-902-7-183.
- [71] M. N. A., Y. U. K., & I. H. Khalid, *An Artificial Immune System Approach for Solving Type-E Assembly Line Balancing Problem with Problem-Specific Information*. 2020.
- [72] M. N. A. Khalid and U. K. Yusof, “Leveraging Bio-Inspired Knowledge-Intensive Optimization Algorithm in The Assembly Line Balancing Problem,” *IEEE Access*, Vol. 9, Pp. 117832–117844, 2021, Doi: 10.1109/ACCESS.2021.3106321.
- [73] Y. Jiao, N. Cao, J. Li, L. Li, and X. Deng, “Balancing A U-Shaped Assembly Line with A Heuristic Algorithm Based on a Comprehensive Rank Value,” *Sustainability (Switzerland)*, Vol. 14, No. 2, Jan. 2022, Doi: 10.3390/Su14020775.
- [74] L. Belkharroubi and K. Yahyaoui, “Maximization of The Assembly Line Efficiency Using an Approach Based on Genetic Algorithm,” in *2022 2nd International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology, IRASET 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. Doi: 10.1109/IRASET52964.2022.9737934.
- [75] A. S. Khan, R. Khan, W. Saleem, B. Salah, and S. Alkhatib, “Modeling and Optimization of Assembly Line Balancing Type 2 and E (SLBP-2E) For A Reconfigurable Manufacturing System,” *Processes*, Vol. 10, No. 8, Aug. 2022, Doi: 10.3390/Pr10081582.
- [76] S. E. A. El Ahmadi, L. El Abbadi, and S. Elrhanimi, “Efficiency Improvement of Automotive Assembly Lines Using Simple Assembly Line Balancing Problem Type-E,” *Logforum*, Vol. 19, No. 2, Pp. 183–193, 2023, Doi: 10.17270/J.LOG.2023.810.
- [77] M. F. F. Mohd Fadzil and A. N. Ramli, “A New Multiobjective Tiki-Taka Algorithm for Optimization of Assembly Line Balancing,” *Engineering Computations (Swansea, Wales)*, Vol. 40, No. 3, Pp. 564–593, Jun. 2023, Doi: 10.1108/EC-03-2022-0185.
- [78] E. Gurevsky, O. Battaïa, and A. Dolgui, “Balancing of Simple Assembly Lines Under Variations of Task Processing Times,” *Ann Oper Res*, Vol. 201, No. 1, Pp. 265–286, Dec. 2012, Doi: 10.1007/S10479-012-1203-5.
- [79] S. V. Ravelo, “Approximation Algorithms for Simple Assembly Line Balancing Problems,” *J Comb Optim*, Vol. 43, No. 2, Pp. 432–443, Mar. 2022, Doi: 10.1007/S10878-021-00778-2.

- [80] K. Ağpak, “An Approach to Find Task Sequence for Re-Balancing of Assembly Lines,” *Assembly Automation*, Vol. 30, No. 4, Pp. 378–387, 2010, Doi: 10.1108/01445151011075834.
- [81] C. Yang, J. Gao, and L. Sun, “A Multi-Objective Genetic Algorithm for Mixed-Model Assembly Line Rebalancing,” *Comput Ind Eng*, Vol. 65, No. 1, Pp. 109–116, 2013, Doi: 10.1016/J.Cie.2011.11.033.
- [82] F. Serin, S. Mete, and E. Çelik, “An Efficient Algorithm for U-Type Assembly Line Re-Balancing Problem with Stochastic Task Times,” *Assembly Automation*, Vol. 39, No. 4, Pp. 581–595, Oct. 2019, Doi: 10.1108/AA-07-2018-106.
- [83] F. S. Oliveira, K. Vittori, R. M. O. Russel, and X. L. Travassos, “Mixed Assembly Line Rebalancing: A Binary Integer Approach Applied to Real World Problems in The Automotive Industry,” *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 13, No. 0, Pp. 933–940, 2012, Doi: 10.1007/S12239–012–0094–4.
- [84] F. Makssoud, O. Battaïa, A. Dolgui, K. Mpofu, and O. Olabanji, “Re-Balancing Problem for Assembly Lines: New Mathematical Model and Exact Solution Method,” *Assembly Automation*, Vol. 35, No. 1, Pp. 16–21, Feb. 2015, Doi: 10.1108/AA-07-2014-061.
- [85] “Assembly Line Balancing Problem Benchmark Data Sets 1993.” Accessed: Dec. 16, 2023. [Online]. Available: <https://Assembly-Line-Balancing.De>



EKLER

EKLER

EK A: Kullanılan Veri Setleri

Tablo A.1: P-10 veri seti görev süreleri

Görev	M1	M2
1	5	5
2	3	3
3	5	5
4	6	6
5	9	9
6	4	4
7	1	1
8	6	6
9	2	2
10	6	6

Tablo A.2: P-10 veri seti talep oranları

Görev	Talep Oranı
1	0.5
2	0.5

Tablo A.3: P-19 veri seti görev süreleri

Görev	M1	M2	M3
1	0.5	0	1
2	0.4	0.8	1.2
3	0	0.2	0.4
4	0.4	0	0
5	0.2	0.2	0.2
6	0.2	0	0
7	0.4	0.5	0.6
8	0	0.5	0.5
9	0.4	0.3	0.2
10	0	0	0.2
11	0.3	0.3	0.3
12	0.1	0.3	0.5
13	0.1	0	0.1
14	0.2	0.2	0.2
15	0.7	1	1.5
16	0	0.1	0
17	0.5	0.5	0
18	0.3	0.5	0.3
19	0.4	0.3	0

Tablo A.4: P-19 veri seti talep oranları

Görev	Talep Oranı
1	0.25
2	0.25
3	0.5

Tablo A.5: P-28 veri seti görev süreleri

Görev	M1	M2
1	70	70
2	59	59
3	33	33
4	6	6
5	1	1
6	27	22
7	17	15
8	62	62
9	31	31
10	53	53
11	21	21
12	19	19
13	108	105
14	52	52
15	5	5
16	8	0
17	97	97
18	8	8
19	47	47
20	67	67
21	17	17
22	8	8
23	3	3
24	21	21
25	107	107
26	3	3
27	2	2
28	72	72

Tablo A.6: P-28 veri seti talep oranları

Görev	Talep Oranı
1	0.25
2	0.25
3	0.5

Tablo A.7: P-32 veri seti görev süreleri

Görev	M1	M2
1	458	458
2	276	276
3	520	500
4	1400	1300
5	352	352
6	196	196
7	214	200
8	456	344
9	646	646
10	512	512
11	408	408
12	262	262
13	544	544
14	202	202
15	458	458
16	694	694
17	616	616
18	678	678
19	328	328
20	324	324
21	100	100
22	352	352
23	544	544
24	500	500
25	382	382
26	858	858
27	388	388
28	352	352
29	428	428
30	238	238
31	258	258
32	196	196

Tablo A.8: P-32 veri seti talep oranları

Görev	Talep Oranı
1	0.5
2	0.5

Tablo A.9: P-45 veri seti görev süreleri

Görev	M1	M2	Görev	M1	M2
1	9	9	40	4	4
2	9	9	41	21	21
3	10	10	42	12	12
4	10	10	43	6	6
5	17	17	44	5	5
6	17	17	45	5	5
7	13	13			
8	13	13			
9	20	20			
10	20	20			
11	10	10			
12	11	11			
13	6	6			
14	22	12			
15	11	9			
16	19	1			
17	12	8			
18	3	3			
19	7	7			
20	4	4			
21	55	55			
22	14	14			
23	27	27			
24	29	29			
25	26	26			
26	6	6			
27	5	5			
28	24	24			
29	4	4			
30	5	5			
31	7	7			
32	4	4			
33	15	15			
34	3	3			
35	7	7			
36	9	9			
37	4	4			
38	7	7			
39	5	5			

Tablo A.10: P-45 veri seti talep oranları

Görev	Talep Oranı
1	0.5
2	0.5

Tablo A.11: P-70 veri seti görev süreleri

Görev	M1	M2	Görev	M1	M2
1	17	17	40	13	13
2	66	66	41	16	16
3	54	54	42	25	25
4	52	52	43	21	21
5	3	3	44	43	43
6	88	88	45	30	30
7	21	21	46	83	83
8	128	128	47	89	89
9	68	68	48	56	56
10	70	70	49	59	59
11	85	85	50	43	43
12	21	21	51	11	11
13	134	134	52	26	26
14	135	135	53	44	44
15	94	94	54	121	121
16	90	90	55	38	38
17	50	50	56	68	68
18	143	143	57	22	22
19	19	1	58	7	7
20	54	46	59	16	16
21	50	40	60	32	32
22	40	40	61	25	25
23	73	73	62	17	17
24	12	12	63	156	156
25	152	152	64	28	28
26	42	42	65	15	15
27	45	45	66	26	26
28	74	74	67	18	18
29	26	26	68	72	72
30	11	11	69	23	23
31	31	31	70	27	27
32	50	50			
33	102	102			
34	46	46			
35	35	35			
36	40	40			
37	2	2			
38	1	1			
39	3	3			

Tablo A.12: P-70 veri seti talep oranları

Görev	Talep Oranı
1	0.5
2	0.5

Tablo A.13: P-83 veri seti görev süreleri

Görev	M1	M2	Görev	M1	M2	Görev	M1	M2
1	1673	1670	38	1251	1251	75	764	764
2	985	980	39	1310	1310	76	357	357
3	1836	1830	40	663	63	77	701	701
4	973	973	41	494	494	78	1164	1164
5	1700	1700	42	1288	1288	79	286	286
6	2881	2881	43	792	792	80	2100	2100
7	2231	2231	44	578	578	81	450	450
8	1040	1040	45	594	594	82	1300	1300
9	1793	1793	46	578	578	83	3691	3691
10	1250	1250	47	622	622			
11	700	700	48	578	578			
12	464	464	49	564	564			
13	500	500	50	578	578			
14	1133	1133	51	578	578			
15	577	577	52	578	578			
16	483	483	53	578	578			
17	880	880	54	578	578			
18	667	667	55	578	578			
19	600	600	56	578	578			
20	233	233	57	578	578			
21	408	408	58	578	578			
22	847	847	59	578	578			
23	767	767	60	578	578			
24	850	850	61	578	578			
25	780	780	62	578	578			
26	912	912	63	578	578			
27	748	748	64	578	578			
28	1863	1863	65	578	578			
29	714	714	66	578	578			
30	1004	1004	67	578	578			
31	713	713	68	578	578			
32	642	642	69	467	467			
33	629	629	70	887	887			
34	1234	1234	71	396	396			
35	1143	1143	72	1296	1296			
36	1266	1266	73	1100	1100			
37	792	792	74	2543	2543			

Tablo A.14: P-83 veri seti talep oranları

Görev	Talep Oranı
1	0.5
2	0.5

Tablo A.15: P-89 veri seti görev süreleri

Görev	M1	M2	Görev	M1	M2
1	1	1	46	6	6
2	2	2	47	7	7
3	3	3	48	8	8
4	4	3	49	9	9
5	5	5	50	10	10
6	6	3	51	1	1
7	7	7	52	2	2
8	8	8	53	3	3
9	9	9	54	4	4
10	10	10	55	5	5
11	1	1	56	6	6
12	2	2	57	7	7
13	3	3	58	8	8
14	4	3	59	9	9
15	5	5	60	10	10
16	6	6	61	1	1
17	7	7	62	2	2
18	8	8	63	3	3
19	9	9	64	4	4
20	10	10	65	5	5
21	1	1	66	6	6
22	2	2	67	7	7
23	3	3	68	8	8
24	4	4	69	9	9
25	5	5	70	10	10
26	6	6	71	1	1
27	7	7	72	2	2
28	8	8	73	3	3
29	9	9	74	4	4
30	10	10	75	5	5
31	1	1	76	6	6
32	2	2	77	7	7
33	3	3	78	8	8
34	4	4	79	9	9
35	5	5	80	20	10
36	6	6	81	1	1
37	7	7	82	2	2
38	8	8	83	3	3
39	9	9	84	4	4
40	10	10	85	5	5
41	1	1	86	6	6
42	2	2	87	7	7
43	3	3	88	8	8
44	4	4	89	9	9
45	4	4			

Tablo A.16: P-89 veri seti talep oranları

Görev	Talep Oranı
1	0.5
2	0.5

Tablo A.17: P-94 veri seti görev süreleri

Görev	M1	M2	Görev	M1	M2	Görev	M1	M2
1	158	158	44	9	9	87	149	149
2	42	40	45	41	41	88	40	40
3	17	10	46	38	38	89	24	24
4	24	24	47	76	76	90	123	123
5	71	71	48	31	31	91	25	25
6	66	66	49	11	11	92	115	115
7	50	50	50	29	29	93	103	103
8	55	55	51	48	48	94	54	54
9	30	30	52	8	8			
10	28	28	53	171	171			
11	113	113	54	48	48			
12	114	114	55	43	43			
13	57	57	56	18	18			
14	65	65	57	94	94			
15	15	15	58	9	9			
16	11	11	59	19	19			
17	10	10	60	24	24			
18	19	19	61	8	8			
19	8	8	62	34	34			
20	17	17	63	62	62			
21	57	57	64	12	12			
22	40	40	65	8	8			
23	17	17	66	47	47			
24	11	11	67	27	27			
25	17	17	68	18	18			
26	27	27	69	52	52			
27	17	17	70	65	65			
28	18	18	71	72	72			
29	16	16	72	51	51			
30	18	18	73	58	58			
31	50	50	74	53	53			
32	18	18	75	76	76			
33	13	13	76	93	93			
34	21	21	77	86	86			
35	63	63	78	76	76			
36	8	8	79	9	9			
37	63	63	80	14	14			
38	9	9	81	55	55			
39	20	20	82	32	32			
40	72	72	83	22	22			
41	30	30	84	35	35			
42	69	69	85	63	63			
43	27	27	86	39	39			

Tablo A.18: P-94 veri seti talep oranları

Görev	Talep Oranı
1	0.5
2	0.5

Tablo A.19: P-111 veri seti görev süreleri

Görev	M1	M2	M3	M4	M5
1	1960	1960	1960	1960	1960
2	1715	1715	1715	1715	1715
3	735	735	735	735	735
4	1715	1715	1715	1715	1715
5	490	490	490	490	490
6	1225	1225	1225	1225	1225
7	169	169	169	169	169
8	2252	2252	2252	2252	2252
9	1225	1225	1225	1225	1225
10	0	2319	0	0	0
11	1715	1715	1715	1715	1715
12	980	980	980	980	980
13	735	735	735	735	735
14	2281	2281	2281	2281	2281
15	2750	2750	2750	2750	2750
16	0	0	77	0	0
17	0	0	0	89	0
18	0	0	0	0	51
19	0	364	0	0	0
20	405	0	0	0	0
21	3060	3060	3060	3060	3060
22	125	125	125	125	125
23	3429	3429	3429	3429	3429
24	0	0	0	43	0
25	3430	3430	3430	3430	3430
26	1960	1960	1960	1960	1960
27	0	0	0	29	0
28	0	0	0	27	0
29	0	0	0	0	15
30	121	0	0	0	0
31	1715	1715	1715	1715	1715
32	2127	2127	2127	2127	2127
33	1470	1470	1470	1470	1470
34	4037	4037	4037	4037	4037

Tablo A.19 (devam)

Görev	M1	M2	M3	M4	M5
35	0	0	0	68	0
36	0	0	0	62	0
37	0	0	0	0	42
38	0	364	0	0	0
39	4998	4998	4998	4998	4998
40	1470	1470	1470	1470	1470
41	2963	2963	2963	2963	2963
42	5689	5689	5689	5689	5689
43	0	0	0	68	0
44	0	0	0	18	0
45	0	0	0	0	10
46	0	0	81	0	0
47	5200	5200	5200	5200	5200
48	0	0	39	0	0
49	0	0	67	0	0
50	0	0	0	0	27
51	0	0	0	0	15
52	121	0	0	0	0
53	0	0	58	0	0
54	1715	1715	1715	1715	1715
55	125	125	125	125	125
56	4010	4010	4010	4010	4010
57	1470	1470	1470	1470	1470
58	1470	1470	1470	1470	1470
59	2303	2303	2303	2303	2303
60	1960	1960	1960	1960	1960
61	2205	2205	2205	2205	2205
62	4018	4018	4018	4018	4018
63	2744	2744	2744	2744	2744
64	2999	2999	2999	2999	2999
65	735	735	735	735	735
66	735	735	735	735	735
67	735	735	735	735	735
68	735	735	735	735	735
69	0	545	0	0	0
70	3386	3386	3386	3386	3386
71	3234	3234	3234	3234	3234
72	2205	2205	2205	2205	2205
73	2206	2206	2206	2206	2206
74	490	490	490	490	490
75	825	825	825	825	825
76	3528	3528	3528	3528	3528
77	3568	3568	3568	3568	3568
78	1200	1200	1200	1200	1200
79	618	618	618	618	618
80	1470	1470	1470	1470	1470
81	1715	1715	1715	1715	1715

Tablo A.19 (devam)

Görev	M1	M2	M3	M4	M5
82	735	735	735	735	735
83	1960	1960	1960	1960	1960
84	2989	2989	2989	2989	2989
85	618	618	618	618	618
86	490	490	490	490	490
87	735	735	735	735	735
88	490	490	490	490	490
89	921	921	921	921	921
90	326	326	326	326	326
91	5390	5390	5390	5390	5390
92	243	243	243	243	243
93	371	371	371	371	371
94	58	58	58	58	58
95	6615	6615	6615	6615	6615
96	1225	1225	1225	1225	1225
97	769	0	0	0	0
98	768	0	0	0	0
99	1670	1670	1670	1670	1670
100	1670	1670	1670	1670	1670
101	490	490	490	490	490
102	0	202	0	0	0
103	0	203	0	0	0
104	202	202	202	202	202
105	2744	2744	2744	2744	2744
106	162	0	0	0	0
107	324	0	0	0	0
108	162	0	0	0	0
109	0	121	0	0	0
110	0	162	0	0	0
111	91	91	91	91	91

Tablo A.20: P-111 veri seti talep oranları

Görev	Talep Oranı
1	0.2
2	0.2
3	0.2
4	0.2
5	0.2

Tablo A.21: P-148 veri seti görev süreleri

Görev	M1	M2	Görev	M1	M2	Görev	M1	M2	Görev	M1	M2
1	16	16	46	7	7	91	115	115	136	64	64
2	30	30	47	41	41	92	35	35	137	22	22
3	7	7	48	13	13	93	26	26	138	15	15
4	47	40	49	47	47	94	46	46	139	34	34
5	29	20	50	33	33	95	20	20	140	22	22
6	8	8	51	34	34	96	31	31	141	151	151
7	39	39	52	11	11	97	19	19	142	148	148
8	37	37	53	118	118	98	34	34	143	64	64
9	32	32	54	25	25	99	51	51	144	170	170
10	29	29	55	7	5	100	39	39	145	137	137
11	17	17	56	28	20	101	30	30	146	64	64
12	11	11	57	12	10	102	26	26	147	78	78
13	32	30	58	52	50	103	13	13	148	78	78
14	15	15	59	14	14	104	45	45			
15	53	53	60	3	3	105	58	58			
16	53	53	61	3	3	106	28	28			
17	8	8	62	8	8	107	8	8			
18	24	24	63	16	16	108	383	383			
19	24	20	64	33	33	109	40	40			
20	8	8	65	8	8	110	34	34			
21	7	7	66	18	18	111	23	23			
22	8	8	67	10	10	112	162	162			
23	14	14	68	14	14	113	11	11			
24	13	13	69	28	28	114	19	19			
25	10	10	70	11	11	115	14	14			
26	25	25	71	118	118	116	31	31			
27	11	11	72	25	25	117	32	32			
28	25	25	73	40	40	118	26	26			
29	11	11	74	40	40	119	55	55			
30	29	29	75	101	101	120	31	31			
31	25	25	76	5	5	121	32	32			
32	10	10	77	28	28	122	26	26			
33	14	14	78	8	8	123	19	19			
34	41	41	79	281	281	124	14	14			
35	42	42	80	7	7	125	19	19			
36	47	47	81	26	26	126	48	48			
37	7	7	82	10	10	127	55	55			
38	80	80	83	21	21	128	8	8			
39	7	7	84	26	26	129	11	11			
40	41	41	85	20	20	130	27	27			
41	47	47	86	21	21	131	18	18			
42	16	16	87	47	47	132	36	36			
43	32	32	88	23	23	133	23	23			
44	66	66	89	13	13	134	20	20			
45	80	80	90	19	19	135	46	46			

Tablo A.22: P-148 veri seti talep oranları

Görev	Talep Oranı
1	0.5
2	0.5

Tablo A.23: P-110 veri seti görev süreleri

Görev	Açıklama	M1	M2	Görev	Açıklama	M1	M2	Görev	Açıklama	M1	M2
1	Ön tampon parça 1	3	3	46	Sol kapı parça 1	3	3	91	Arka tampon parça 7	8	8
2	Ön tampon parça 2	3	3	47	Sol kapı parça 2	3	3	92	Arka tampon parça 8	7	7
3	Ön tampon parça 3	3	3	48	Sol kapı parça 3	7	7	93	Arka tampon parça 9	10	10
4	Ön tampon parça 4	5	5	49	Sol kapı parça 4	3	3	94	Arka tampon parça 10	11	11
5	Ön tampon parça 5	2	2	50	Sol kapı parça 5	8	8	95	Arka tampon parça 11	8	8
6	Ön tampon parça 6	3	3	51	Sol kapı parça 6	4	4	96	Arka tampon parça 12	10	10
7	Ön tampon parça 7	2	2	52	Sol kapı parça 7	4	4	97	Arka tampon parça 13	5	5
8	Ön tampon parça 8	2	2	53	Sol kapı parça 8	4	4	98	Arka tampon parça 14	4	4
9	Ön tampon parça 9	2	0	54	Sol kapı parça 9	4	0	99	Arka tampon parça 15	8	8
10	Ön tampon parça 10	2	0	55	Sol kapı montaj	10	10	100	Arka tampon parça 16	5	5
11	Ön tampon parça 11	3	3	56	Sağ kapı parça 1	4	4	101	Arka tampon parça 17	10	10
12	Ön tampon parça 12	3	3	57	Sağ kapı parça 2	7	7	102	Arka tampon parça 18	3	3
13	Ön tampon parça 13	3	3	58	Sağ kapı parça 3	3	3	103	Arka tampon parça 19	4	4
14	Ön tampon parça 14	2	2	59	Sağ kapı parça 4	3	3	104	Arka tampon parça 20	8	8
15	Ön tampon parça 15	2	2	60	Sağ kapı parça 5	4	4	105	Arka tampon parça 21	10	10
16	Ön tampon parça 16	2	2	61	Sağ kapı parça 6	7	7	106	Arka tampon montaj	10	10
17	Ön tampon parça 17	2	2	62	Sağ kapı parça 7	4	4	107	Egzoz parça 1	0	10

Tablo A 23 (devam)

Görev	Açıklama	M1	M2	Görev	Açıklama	M1	M2	Görev	Açıklama	M1	M2
18	Ön tampon parça 18	5	5	63	Sağ kapı parça 8	4	4	108	Egzoz parça 2	0	8
19	Ön tampon parça 19	2	2	64	Sağ kapı parça 9	4	4	109	Egzoz parça 3	0	12
20	Ön tampon parça 20	3	3	65	Sağ kapı parça 10	4	4	110	Egzoz parça montaj	0	5
21	Ön tampon parça 21	2	2	66	Sağ kapı parça 11	4	4				
22	Ön tampon parça 22	3	3	67	Sağ kapı montaj	8	8				
23	Gövde parça 1	3	3	68	Sol ön ve arka tekerlek parça 2	3	3				
24	Gövde parça 2	4	4	69	Sol ön ve arka tekerlek parça 3	3	3				
25	Gövde parça 3	2	2	70	Sol ön ve arka tekerlek parça 4	4	4				
26	Gövde parça 5	6	6	71	Sol ön ve arka tekerlek parça 5	4	4				
27	Gövde parça 6	3	3	72	Sol ön ve arka tekerlek parça 6	4	4				
28	Gövde parça 7	3	3	73	Sol ön ve arka tekerlek parça 7	4	4				
29	Gövde parça 8	3	3	74	Sol ön ve arka tekerlek parça 8	9	9				
30	Gövde parça 9	3	3	75	Sol ön ve arka tekerlek montajı	10	10				
31	Gövde parça 10	3	4	76	Sağ ön ve arka tekerlek parça 1	5	5				
32	Ön tampon montajı	10	8	77	Sağ ön ve arka tekerlek parça 2	5	5				
33	Gövde parça 11	9	11	78	Sağ ön ve arka tekerlek parça 3	8	8				

Tablo A 23 (devam)

Görev	Açıklama	M1	M2	Görev	Açıklama	M1	M2
34	Gövde parça 12	5	6	79	Sağ ön ve arka tekerlek 4	4	4
35	Gövde parça 13	5	6	80	Sağ ön ve arka tekerlek parça 5	4	4
36	Gövde parça 14	4	0	81	Sağ ön ve arka tekerlek parça 6	4	4
37	Gövde parça 15	4	0	82	Sağ ön ve arka tekerlek parça 7	10	10
38	Gövde parça 16	3	5	83	Sağ ön ve arka tekerlek parça montajı	16	16
39	Gövde parça 17	3	5	84	Gövde ve ön tampon montajı	30	20
40	Gövde parça 18	4	4	85	Arka tampon parça 1	15	15
41	Gövde parça 19	4	4	86	Arka tampon parça 2	12	12
42	Gövde parça 20	3	3	87	Arka tampon parça 3	16	16
43	Gövde parça 21	3	3	88	Arka tampon parça 4	13	13
44	Gövde parça 22	3	3	89	Arka tampon parça 5	12	12
45	Gövde parça 23	5	5	90	Arka tampon parça 6	9	9

Tablo A.24: P-110 lego veri seti talep oranları

Görev	Talep Oranı
1	0.5
2	0.5