İnsan-Robot İş Birliği ile Montaj Hattı Yeniden Dengeleme Problemi ve Bir Hiper-Matsezgisel Çözüm Yaklaşımı

Aslıhan Karaş Çelik

DOKTORA TEZİ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs 2025

Assembly Line Rebalancing Problem with Human-Robot Collaboration and a Hyper-Matheuristic Solution Approach

Aslıhan Karaş Çelik

DOCTORAL DISSERTATION

Department of Industrial Engineering

May 2025

İnsan-Robot İş Birliği ile Montaj Hattı Yeniden Dengeleme Problemi ve Bir Hiper-Matsezgisel Çözüm Yaklaşımı

Aslıhan Karaş Çelik

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı
Üretim ve Servis Sistemleri Bilim Dalında
DOKTORA TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

Danışman: Prof. Dr. Feriştah Özçelik

Mayıs 2025

ONAY

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora öğrencisi Aslıhan KARAŞ ÇELİK'in DOKTORA tezi olarak hazırladığı "İnsan-Robot İş Birliği ile Montaj Hattı Yeniden Dengeleme Problemi ve Bir Hiper-Matsezgisel Çözüm Yaklaşımı" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Feriştah ÖZÇELİK

İkinci Danışman: -

Doktora Tez Savunma Jürisi:

Üye: Prof. Dr. Feriştah ÖZÇELİK

Üye: Prof. Dr. Muzaffer KAPANOĞLU

Üye: Prof. Dr. Şerafettin ALPAY

Üye: Prof. Dr. Gürkan ÖZTÜRK

Üye: Doç. Dr. Özcan MUTLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ……..…….. tarih ve ……..……. sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma TÜMSEK

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Feriştah ÖZÇELİK danışmanlığında hazırlamış olduğum "İnsan-Robot İş Birliği ile Montaj Hattı Yeniden Dengeleme Problemi ve Bir Hiper-Matsezgisel Çözüm Yaklaşımı" başlıklı Doktora tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 06/05/2025

Aslıhan KARAŞ ÇELİK

İmza

ÖZET

Tekrarlı görevlerin gerçekleştirildiği ve standart ürünlerin imal edildiği montaj sistemlerinde, Endüstri 4.0'ın etkisiyle robotların kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu eğilim, tehlikeli ortamlarda robotların görev almasına ve insan kaynaklı hataların azaltılmasına olanak tanımaktadır. Öte yandan, robotlar, insanların sahip olduğu esneklik ve içgörüden yoksundur. Robotların sınırlılıklarının fark edilmesiyle birlikte, insan merkezli endüstrilerin önemini vurgulayan Endüstri 5.0 vizyonu çerçevesinde, insanların ve robotların iş birliği yaptığı montaj hatları, bu işgörenlerin güçlü yönlerinin bütünleştirilmesini sağlayan yenilikçi sistemler olarak ortaya çıkmıştır. Bu etkileşim, sistem verimliliğini artırmakta ve ergonomik riskleri azaltmaktadır. Literatürdeki iş birliğine dayalı montaj hatlarına ilişkin çalışmalarda, yalnızca ilk kez dengeleme durumu dikkate alınsa da emek yoğun kuruluşlar için mevcut sistemlerin tamamen ortadan kaldırılarak, iş birliğine dayalı bir yapının kurulması maliyetli ve zaman alıcı bir süreçtir. Bu bağlamda, bir hattı sıfırdan kurmak yerine mevcut yapıyı temel alarak yeni koşullara uygun şekilde yeniden yapılandırmak, operasyonel açıdan daha sürdürülebilir bir yaklaşımdır.

Bu çalışmada, yalnızca işçilerin bulunduğu montaj hatlarından iş birlikçi sistemlere geçiş ele alınmaktadır. Bu doğrultuda, manuel hatlara geleneksel ve iş birlikçi robotların (kobotların) entegre edilmesi amacıyla işgörenler bazında yeniden yapılandırma sürecine odaklanılarak İnsan-Robot İş Birliği ile Montaj Hattı Yeniden Dengeleme (İR-MHYD) Problemi önerilmektedir. İR-MHYD probleminin çözümü için bir matematiksel model ve yapay arı kolonisi (YAK) algoritması tabanlı bir hiper-matsezgisel çözüm yöntemi geliştirilmiştir. Karşılaştırma problemleri üzerinde yapılan testlere ilişkin sonuçlar, hiper-matsezgisel yaklaşımın, matematiksel modele ve YAK algoritmasının temel versiyonuna kıyasla daha üstün performans gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Montaj Hattı Yeniden Dengeleme, İnsan-Robot İş Birliği, İşgören Ataması, Matematiksel Model, Hiper-Matsezgisel.

SUMMARY

In assembly systems where repetitive tasks are performed and standardized products are manufactured, robot utilisation has become widespread due to the influence of Industry 4.0. This trend enables robots to operate in hazardous environments and reduces human-induced errors. However, robots lack the flexibility and insight of humans. Recognising the limitations of robots, within the framework of the Industry 5.0 vision, which emphasises the importance of human-centred industries, assembly lines where humans and robots collaborate have emerged as innovative systems that allow the integration of their strengths. This interaction increases system efficiency and reduces ergonomic risks. Although only the first-time balancing is considered in studies on collaborative assembly lines, it is a costly and time-consuming process for labour-intensive organisations to completely eliminate existing systems and build a collaborative structure. In this context, it is a more operationally sustainable approach to reconfigure a line in accordance with new conditions based on the existing structure rather than building it from scratch.

This study addresses the transition from assembly lines with only workers to collaborative systems. Accordingly, the Assembly Line Rebalancing Problem with Human-Robot Collaboration (ALRB-HRC) is proposed, focusing on the reconfiguration process on the basis of operators to integrate traditional and collaborative robots (cobots) in manual lines. To solve the ALRB-HRC problem, a mathematical model and a hyper-matheuristic solution method based on the artificial bee colony (ABC) algorithm are developed. The test results on benchmark problems demonstrate that the hyper-matheuristic approach outperforms the mathematical model and the basic version of the ABC algorithm.

Keywords: Assembly Line Rebalancing, Human-Robot Collaboration, Operator Assignment, Mathematical Model, Hyper-Matheuristic.

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitim-öğretim sürecimin her evresinde akademik birikimi ve tecrübesiyle bana rehberlik eden, yol göstericiliği ve özverili desteğiyle üzerimde büyük emeği olan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Feriştah ÖZÇELİK'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitesi üyesi olarak yapıcı değerlendirmeleri ve değerli görüşleriyle çalışmanın gelişimine önemli katkılar sağlayan Sayın Prof. Dr. Muzaffer KAPANOĞLU ve Sayın Doç. Dr. Özcan MUTLU hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Yaşamım boyunca desteklerini esirgemeyen, her daim yanımda olduklarını hissettiren sevgili annem Zehra KARAŞ'a ve babam Ertuğrul KARAŞ'a varlıkları için minnettarım.

Yüksek akademik çabalarla geçen bu süreçte en büyük dayanaklarımdan biri olan kıymetli eşim Mehmet ÇELİK'e gönülden teşekkür ederim.

Bu çalışmayı, hayatımda derin izler bırakmış ve daima kalbimde yaşayacak olan sevgili anneannem Muazzez ARPACIOĞLU'nun ve babaannem Münevver KARAŞ'ın kıymetli hatıralarına ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET vi

SUMMARY vii

TEŞEKKÜR viii

İÇİNDEKİLER ix

ŞEKİLLER DİZİNİ xii

ÇİZELGELER DİZİNİ xiv

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xv

1. GİRİŞ VE AMAÇ 1

2. TEORİK ÇERÇEVE VE KAVRAMSAL TEMELLER 4

2.1. Endüstri 1.0'dan Endüstri 5.0'a Sanayi Devrimleri 4

2.2. Montaj Hatlarında İnsan ve Robot Etkileşimi 12

2.2.1. Montaj hatlarının tarihçesi 12

2.2.2. Montaj hattı dengeleme 15

2.2.2.1. Montaj hattı dengelemede temel kavramlar 16

2.2.2.2. Montaj hattı dengelemede temel atama kararları 17

2.2.2.3. Montaj hattı dengelemede temel kısıtlar 18

2.2.2.4. Montaj hattı dengelemede temel amaçlar 19

2.2.3. Montaj hattı dengeleme problemlerinin sınıflandırılması 19

2.2.3.1. Varsayım özelliklerine göre sınıflandırma 20

2.2.3.2. Amaç sayısına göre sınıflandırma 20

2.2.3.3. Model sayısına göre sınıflandırma 21

2.2.3.4. İşlem sürelerinin doğasına göre sınıflandırma 22

2.2.3.5. Hat yerleşimine göre sınıflandırma 22

2.2.3.6. Hattın kontrol yapısına göre sınıflandırma 25

2.2.3.7. Otomasyon seviyesine göre sınıflandırma 25

2.2.3.8. Kurulum sıklığına göre sınıflandırma 26

İÇİNDEKİLER

Sayfa

2.2.4. İş birlikçi montaj hatları 27
2.2.4.1. İş birlikçi robotların temel özellikleri 29
2.2.4.2. Manuel montaj hatlarından iş birlikçi sistemlere geçiş 31
2.3. Hiper-Matsezgisel Yaklaşım 35
2.3.1. Hiper-sezgisel algoritmalar 35
2.3.2. Matsezgisel algoritmalar 39
2.3.3. Hiper-sezgiselleri ve matsezgiselleri melezlemenin sağladığı avantajlar 42
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 43
3.1. İnsan-Robot İş Birliği ile Montaj Hattı Dengeleme Literatürü 43
3.2. Montaj Hattı Yeniden Dengeleme Literatürü 52
3.3. Önerilen Problemin Literatürdeki Yeri 55
4. MATERYAL VE YÖNTEM 56
4.1. İnsan-Robot İş Birliği ile Montaj Hattı Yeniden Dengeleme Problemi 56
4.2. Başlangıç Hat Atamalarının Elde Edilmesi 57
4.3. İR-MHYD Problemi için Önerilen Matematiksel Modelleme Yaklaşımı 60
4.4. Örnek Problem 62
4.5. Önerilen Algoritma 66
4.5.1. Yapay arı kolonisi algoritmasının temel özellikleri 66
4.5.2. Hiper-matsezgisel yapay arı kolonisi algoritması 68
4.5.2.1. Temel kontrol parametreleri 70
4.5.2.2. Çözümlerin gösterimi 70
4.5.2.3. Başlangıç çözümlerin oluşturulması 71
4.5.2.4. Görevli arı safhası 73
4.5.2.5. Gözcü arı safhası 76
4.5.2.6. Kaşif arı safhası 77
4.5.2.7. İşgören Güncelleme Safhası 78

İÇİNDEKİLER

Sayfa

5. BULGULAR VE TARTIŞMA 81

5.1. Test Problemleri 81

5.2. Parametre Kalibrasyonu 85

5.3. Elde Edilen Sonuçlar 87

5.3.1. Matematiksel model ve HM-YAK algoritmasının karşılaştırılması 89

5.3.2. T-YAK ve HM-YAK algoritmalarının karşılaştırılması 94

5.3.3. Sonuçların değerlendirilmesi 98

6. SONUÇ VE ÖNERİLER 104

KAYNAKLAR DİZİNİ 107

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

2.1. Teknolojik öncelik diyagramı ... 16
2.2. Model sayısına göre montaj hatları: a) tek modelli montaj hattı, b) karma modelli montaj hattı, c) çok modelli montaj hattı ... 22
2.3. Düz bir montaj hattı ... 23
2.4. U-tipi bir montaj hattı ... 23
2.5. Paralel montaj hatları ... 24
2.6. Çift taraflı bir montaj hattı ... 24
2.7. Montaj hatlarında farklı işgören türleri ... 26
2.8. Çalışma ortamında insanın ve kobotun etkileşim türleri ... 30
2.9. Esneklik ve otomasyon seviyesi açısından montaj hatları ... 32
2.10. Hiper-sezgisellerin çalışma mekanizması ... 37
2.11. Hiper-sezgisellerin sınıflandırılması ... 38
2.12. Matsezgisellerin sınıflandırılması ... 40
4.1. Örnek çözüm vektörü ... 70
4.2. Başlangıç çözüm oluşturma safhasının sözde-kodu ... 73
4.3. S3 istasyonunda işgören değişimi ... 75
4.4. T3 ve T4 görevlerinin karşılıklı istasyonlarının değişimi ... 75
4.5. Görevli arı safhasının sözde-kodu ... 76
4.6. Gözcü arı safhasının sözde-kodu ... 77
4.7. Kaşif arı safhasının sözde-kodu ... 78
4.8. İşgören güncelleme safhasının sözde-kodu ... 79
4.9. Durma koşulu için kontrol adımının sözde-kodu ... 79
4.10. Önerilen HM-YAK algoritmasının akış şeması ... 80
5.1. Ortalamalar için ana etkiler grafiği ... 86
5.2. S/N oranları için ana etkiler grafiği ... 86
5.3. T-YAK ve HM-YAK algoritmalarının birer tekrar bazında karşılaştırılması ... 94
5.4. T-YAK ve HM-YAK algoritmalarından elde edilen sonuçların karşılaştırılması ... 95

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

5.5. Farklı bütçe değerleri bazında B1 veri seti için işgören atamalarının oranları 99
5.6. Farklı bütçe değerleri bazında B1 veri seti için elde edilen sonuçlar 100
5.7. B1, B2 ve B3 için elde edilen sonuçların karşılaştırılması 102
5.8. B1, B4 ve B5 için elde edilen sonuçların karşılaştırılması 102
5.9. B1, B6, B7 ve B8 için elde edilen sonuçların karşılaştırılması 103

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

2.1. Sanayi devrimlerinin özellikleri 8
2.2. Önerilen problemin farklı özellikler bakımından sınıflandırılması 34
3.1. MHD ve türlerinin içerdiği özellikler 55
4.1. Örnek problem için öncelik ilişkileri ve işlem süreleri 63
4.2. Örnek problem için ergonomik risk değerleri 64
4.3. Örnek probleme ait işgören maliyetleri 65
4.4. Başlangıç atamalar 65
4.5. Örnek problem için elde edilen sonuçlar 66
4.6. Algoritmada kullanılan komşuluk yapıları 74
5.1. Test problemlerine ait özellikler 81
5.2. Veri setlerine ait özellikler 84
5.3. Temel kontrol parametreleri 85
5.4. Taguchi deney tasarımı 85
5.5. İlk hat dengesi sonuçları 87
5.6. Roszieg problem ailesi için elde edilen sonuçlar 90
5.7. Buxey problem ailesi için elde edilen sonuçlar 91
5.8. Wee-Mag problem ailesi için elde edilen sonuçlar 92
5.9. Mukherje problem ailesi için elde edilen sonuçlar 93
5.10. T-YAK ve HM-YAK algoritmalarının elde ettiği sonuçların karşılaştırılması 96
5.11. Wilcoxon işaretli sıralar testine ait sonuçlar 97

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklama
ABC	Artificial Bee Colony
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ALRB-HRC	Assembly Line Rebalancing with Human-Robot Collaboration
BMHD	Basit Montaj Hattı Dengeleme
C1	1. Seviye İşçi ile Kobotun İş Birliği
C2	2. Seviye İşçi ile Kobotun İş Birliği
C3	3. Seviye İşçi ile Kobotun İş Birliği
CNC	Bilgisayarlı Sayısal Kontrollü
Cobot	Collaborative Robot
CS	Çevrim Süresi
ER	Ergonomik Risk
GAMS	General Algebraic Modeling System
GMHD	Genel Montaj Hattı Dengeleme
H1	1. Seviye İşçi
H2	2. Seviye İşçi
H3	3. Seviye İşçi
HİAMHD	Hiyerarşik İşçi Ataması ile Montaj Hattı Dengeleme
HM-YAK	Hiper-Matsezgisel Yapay Arı Kolonisi
IM	Toplam İşçi Maliyeti
İR-MHD	İnsan-Robot İş Birliği ile Montaj Hattı Dengeleme
İR-MHYD	İnsan-Robot İş Birliği ile Montaj Hattı Yeniden Dengeleme
Kobot	Kollaboratif (İş Birlikçi) Robot
MATLAB	Matrix Laboratory
MHD	Montaj Hattı Dengeleme
MHYD	Montaj Hattı Yeniden Dengeleme
MHİAYD	Montaj Hattı İşçi Atama ve Yeniden Dengeleme
NP	Nondeterministic Polynomial Time
R	Robot

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklama
RMHD	Robotik Montaj Hattı Dengeleme
S/N	Sinyal-Gürültü Oranı
TM	Toplam İşgören Maliyeti
T-YAK	Temel Yapay Arı Kolonisi
TZÜ	Tam Zamanında Üretim
YAK	Yapay Arı Kolonisi

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Montaj hattı, malzeme listesinde yer alan parçaların ve bileşenlerin nihai bir ürün meydana getirmek üzere iş istasyonları arasında konveyör veya benzeri bir taşıma aracı vasıtasıyla transfer edilerek birleştirildiği ve birimlerin seri olarak üretildiği bir üretim sürecini ifade eder. Bu üretim yaklaşımının, her bir ürünün zanaatkarlar tarafından ayrı ayrı imal edilmesine kıyasla kayda değer oranda daha verimli olduğu kanıtlanmıştır. Montaj için hat üretim sisteminin öncü uygulaması, 1901 yılında Olds Motorlu Araç Şirketi tarafından gerçekleştirilmiş ve bu konseptin patenti şirket sahibi Ransom Olds tarafından "montaj hattı" olarak alınmıştır. Olds, araçların konveyör kullanılmadan tekerlekler üzerinde bir iş istasyonundan diğerine hareket ettirildiği bir sistem kurmuştur. 1913 yılında Henry Ford, Model T otomobilinin üretimi amacıyla ilk konveyörlü otomotiv montaj hattını tasarlamış ve günlük üretim sayısının belirgin ölçüde artmasını sağlamıştır (Thomopoulos, 2014).

Montaj hatları, otomobil üretiminde devrim yaratmış ve üretim maliyetlerindeki önemli düşüş nedeniyle dünya çapında benzer sistemlerin benimsenmesine yol açmıştır. Bu hatlar, şirketlerin yüksek hacimlerde standartlaştırılmış ürünler üretmesine olanak tanımıştır. Bu üretim sistemi, Salveson (1955) tarafından önerilen ve montaj hattı dengeleme (MHD) olarak bilinen bir optimizasyon problemini ortaya çıkarmıştır. MHD problemi, önceden belirlenmiş performans ölçütlerini optimize etmek için belirli kısıtlar altında görevlerin iş istasyonlarına en uygun şekilde tahsis edilmesiyle ilgilenmektedir (Akpınar, 2017).

Montaj süreçlerinde otomasyondan yararlanmak; işletmeler için sürekli değişen tüketici beklentilerini karşılamak, pazarda varlığını sürdürebilmek ve rekabet gücünü koruyabilmek açısından önem arz etmektedir. Bu doğrultuda, endüstriyel uygulayıcılar; artan esneklik ve çeviklik, düşük maliyet, tavizsiz kalite ile birlikte yüksek üretkenlik ve verimlilik sağlayan üretim stratejilerine yönelmektedir. Endüstri 4.0 çağında robotik montaj hatları, yeni nesil dijital endüstriyel teknolojilerin başarılı uygulamalarına örnek teşkil etmektedir (Chutima, 2020). Bununla birlikte, robotların insan emeğinin yerini tamamen alabileceği yönündeki düşünce, yanlış bir kanıdır. Robotlar, insan iş gücünün yerine geçecek araçlar olarak değil, onun verimliliğini artırmaya yönelik destekleyici unsurlar olarak değerlendirilmelidir. Bu bağlamda, robotlar ya yalnızca varlığıyla üretimi mümkün kılan bir

araç ya da diğer görevleri üstlenerek insan kaynağının daha esnek şekilde kullanılmasını sağlayan bir unsur haline gelmektedir (ABB Robotics UK (2016): Karaulova vd.'den (2019)).

Günümüzde, Endüstri 5.0 paradigmaları endüstri yöneticilerini daha insan merkezli ve sürdürülebilir üretim ortamları tasarlamayı amaçlayan bir yaklaşıma doğru itmektedir (Katiraeea vd., 2023). Endüstri 4.0'ın ayırt edici özelliklerini tamamlayan ve gelişmekte olan Endüstri 5.0 vizyonu tarafından önerilen insan merkezli ve dirençli endüstrilere doğru ilerlemenin sağlanabilmesi için MHD alanında iş birlikçi sistemleri ele alan problem türü, insan-robot iş birliği ile montaj hattı dengeleme (İR-MHD) problemi olarak bilinmektedir (Nourmohammadi vd., 2022a).

İş birliğine dayalı montaj hatlarında insanın ve makinenin yakın etkileşimi, her iki tarafın da güçlü yönlerini ön plana çıkarmaktadır. Tipik olarak otomatik bir montaj sistemi, ara vermeden ve yorulmadan çalışabilme ve basit montaj görevleri için yüksek verimlilik sağlama gibi avantajlar sunmaktadır. Bununla birlikte, robotlar gibi otomatik sistemlerin esnekliği kısıtlıdır. Bu sistemler, yüksek programlama çabası gerektirir ve karmaşık parçaların işlenmesi için sınırlı yeteneklere sahiptir. Buna ek olarak, bir robot çoğu zaman yalnızca bir takımla veya belirli bir parçayı tutmak için kullanılabilecek belirli bir tutucu ile donatılabilir. Öte yandan, insanlar karmaşık taşıma görevleri için olağanüstü duyusal yeteneklere sahiptir, yeni süreçlere hızla uyum sağlayabilir; ancak hassasiyet sınırlaması vardır. İşçilerin ve robotların birlikte çalıştığı iş birlikçi iş istasyonları, insanların ve otomatik sistemlerin avantajlarını bir araya getirmektedir (Krüger vd. 2009; Karaulova vd.'den (2019)).

İnsan-robot iş birliğinin sunduğu avantajları elde edebilmek amacıyla mevcut kaynakları en iyi şekilde kullanabilmek ve değişkenliklere ayak uydurabilmek gerekmektedir. İş birlikçi sistemlerin kullanımı son yıllarda önem kazanmış olsa da endüstriyel uygulayıcıların işletmelerini yeni sistemlere uyarlama konusunda çeşitli zorluklarla karşı karşıya kaldığı görülmektedir. Mevcut durumda var olan bir sistemin tüm bileşenlerini ortadan kaldırarak sıfırdan kurmak oldukça maliyetli ve zaman alan bir süreçtir. Sistemde görülen çeşitli değişimler sebebiyle mevcut duruma belirli bir oranda bağlı kalacak şekilde yeniden yapılandırma işlemi, hattın yeniden dengelenmesine karşılık gelmektedir.

MHD literatüründe yeniden dengeleme sürecinin ele alındığı problem, montaj hattı yeniden dengeleme (MHYD) olarak bilinmektedir. Bir montaj hattının yeniden dengelenmesi, belirli kısıtların sağlanması koşuluyla görevlerin mevcut iş istasyonları arasında yeniden atanmasını kapsamaktadır. Hatların değişen koşullara yanıt verebilme amacıyla yeniden dengelenebilme yetenekleri, bu sistemlere yeniden yapılandırılabilirlik özelliği kazandırmaktadır (Yelles-Chaouche vd., 2021).

Bu çalışmada, başlangıçta manuel bir şekilde çalışan montaj hatları ele alınarak, robotların ve kobotların da işgören olarak mevcut sisteme entegre edilmesi amacıyla hattın yeniden dengelenme ihtiyacına odaklanılmaktadır. Bu doğrultuda, işçilerin çalıştığı montaj hatlarının iş gücü yapısı değişimi sebebiyle yeniden dengelendiği İR-MHYD problemi önerilmektedir. Bu problem, İR-MHD ve MHYD problemlerinin bütünleştirilmesinden meydana gelmektedir. Bütçe, ergonomik risk ve ilk hat benzerliği kısıtları altında ele alınan bu problem, insan-robot iş birliği çerçevesinde verimliliğin sürdürülebilmesi açısından önem teşkil etmektedir.

Hesaplama açısından yüksek çözüm karmaşıklığına sahip İR-MHYD problemi için bir matematiksel modelleme yaklaşımı ile yapay arı kolonisi (YAK) tabanlı hiper-matsezgisel bir algoritma geliştirilmiştir. Literatürde yer alan test problemlerinin uyarlanmasıyla oluşturulan karşılaştırma örnekleri kullanılarak, önerilen çözüm yöntemlerinin performansı değerlendirilmiştir. Algoritmanın etkinliği, YAK algoritmasının temel versiyonuyla da karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Bu tez çalışması, altı bölümden oluşmaktadır. Sonraki bölümde, teorik çerçeve ve kavramsal temellere ilişkin bilgilere yer verilmiştir. Üçüncü bölümde, literatürde İR-MHD ve MHYD problemlerini ele alan çalışmalarının özeti ve önerilen İR-MHYD probleminin literatürdeki yeri ile ilgili açıklamalar sunulmuştur. Dördüncü bölümde, İR-MHYD problemi ile ilgili ayrıntılar, problemin matematiksel ifadesi, örnek problem ve önerilen hiper-matsezgisel algoritmanın detayları bulunmaktadır. Beşinci bölümde, literatürden uyarlanan test problemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar yer alırken, son bölümde çalışmanın genel değerlendirmesi yapılmış ve gelecek çalışma önerilerine değinilmiştir.

2. TEORİK ÇERÇEVE VE KAVRAMSAL TEMELLER

Bu bölümde, sanayi devrimlerinin evrimi ve Endüstri 5.0'ın temelleri hakkında bilgi verilmiştir. Ardından, MHD probleminin temel özellikleri ve türleri ile ilgili hususlar açıklanmış, insan ve robot iş birliğinin montaj hatlarında uygulanmasına değinilmiştir. Son olarak, tez kapsamında önerilen hiper-matsezgisel çözüm yaklaşımına dair temel bilgiler sunulmuştur.

2.1. Endüstri 1.0'dan Endüstri 5.0'a Sanayi Devrimleri

Üretim, insanlığın varoluşundan bu yana yaşamın sürdürülebilmesi için zorunlu bir faaliyet olarak ortaya çıkmıştır. İlk üretim faaliyetleri bireysel ihtiyaçları karşılamaya yönelik iken zamanla gelişen yaşam koşulları başkaları için üretimi de gerekli kılmıştır. En temel tanımıyla üretim, bir değer yaratma sürecidir. Ekonomik açıdan ise herhangi bir şeyi ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilen faaliyetler bütünü olarak tanımlanabilir. Bir diğer ifadeyle, üretim; doğada bulunan kaynakların, hammaddelerin ve malzemelerin insan ihtiyaçlarına uygun biçimde mal ve hizmete dönüştürülmesidir. Günümüzde, müşteri beklenti ve ihtiyaçlarının sürekli değişim göstermesi, üretim biçimlerinde ve üretilen ürünlerde de çeşitli dönüşümlere yol açmaktadır (Kağnıcıoğlu, 2012).

Dünya tarihindeki tüm gelişmelerin, insanlığın değişen ihtiyaçlarına yanıt verme gerekliliğinden doğduğu bilinmektedir. Toplumların temel amacı, tarihsel süreç boyunca evrilen gereksinimlerin sınırlı kaynaklar ile etkin bir şekilde karşılanmasıdır. Bu bağlamda, insanlık tarihindeki en köklü dönüşümler sanayi devrimleri ile gerçekleşmiştir (Leventer ve Altun Ada, 2023).

Tüm dünyayı etkisi altına alan sanayi devrimleri, teknolojik yeniliklerle birlikte toplumsal, ekonomik ve kültürel değişimlere öncülük etmiştir. Bu devrimler, el emeği yerine mekanik üretime geçilmesinden akıllı üretim ortamlarının ortaya çıkışına kadar uzanan oldukça geniş bir süreci kapsamaktadır. Sanayi devrimleri, insanlığın teknolojik yolculuğunu Endüstri 1.0'dan Endüstri 5.0'a kadar beş temel çağa ayırmıştır (Kılıç, 2023).

Endüstri 1.0 olarak bilinen birinci sanayi devrimi, 1780'lerde İngiltere'de ortaya çıkmış ve kısa süre içinde Batı Avrupa ülkelerini ve Amerika Birleşik Devletleri'ni (ABD) de etkilemiştir. Thomas Newcomen'ın icat ettiği buhar makinesini James Watt'ın geliştirmesiyle başlayan bu devrim, su buharı ve fosil yakıtların üretimde kullanılmasını sağlamıştır. Mekanik tezgahlar, el zanaatları ve atölye tarzı işletmeciliğin yerini almaya başlamıştır. Bu dönemde; tekstil, kömür madenciliği, gemi ve demiryolu endüstrilerinde önemli atılımlar gerçekleştirilmiştir. Endüstriyel üretimler artarken, tarım toplumundan sanayi toplumuna geçiş hızlanmıştır. Endüstri 1.0 ile ülkelerin gelişmişlik göstergesi sanayileşme düzeylerine bağlı olarak değerlendirilmeye başlanmıştır (Aksoy, 2017; Derya, 2018; Güdek, 2023).

İkinci sanayi devrimi, elektriğin fabrikalarda kullanılması ve enerji kaynağı olarak kömürün yerini ham petrolün almaya başlaması sayesinde gerçekleşmiştir (Leventer ve Altun Ada, 2023). İngiltere, Almanya, ABD ve Japonya'nın önderlik ettiği Endüstri 2.0, montaj bandı ve elektrik enerjisi yardımıyla iş bölümüne dayalı seri üretime geçişi temsil etmektedir. Henry Ford, 1913 yılında otomobil üretimi için seri üretim bandını geliştirmiş ve üretim miktarını artırırken maliyetleri düşürmeyi başarmıştır (Derya, 2018). Bu dönemin dikkat çeken özelliklerden bir diğeri, üretimde içten yanmalı motorların kullanılmaya başlanmasıdır. Birinci sanayi devriminde ön plana çıkan demirin yerini çeliğin alması, taşımacılıkta önemli gelişmelere yol açmış ve ticarete ivme kazandırmıştır. Bu dönemde; radyo, gazete ve telefon gibi yeni haberleşme araçlarında görülen gelişmeler sayesinde iletişim alanında da dönüşümler yaşanmıştır. Endüstri 2.0, sanayileşme sürecini desteklemiş ve toplumun belirli bir kesiminin alım gücünde iyileşmeye ve lüks tüketim mallarına olan talepte artışa sebep olmuştur (Çavdar, 2019: Şentürk ve Büber'den (2023)).

Bir sonraki sanayi devriminin temelleri, İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra 1950'li yıllarda atılmıştır (Derya, 2018). Endüstri 3.0, 1970'lerde yarı iletken maddelerin ve bilgi teknolojilerinin yükselişe geçmesiyle ortaya çıkmıştır (Güdek, 2023). Telekomünikasyon, lazer teknolojileri ve mikro elektronik gibi alanlardaki gelişmeler üretim anlayışını önemli ölçüde etkilemiştir. Dönemin koşullarında dijital teknolojilerin yaygınlaşması ve bilgisayarlar kullanımının artmasıyla birlikte endüstrilerde benzeri görülmemiş bir değişim yaşanmıştır. Elektronik ve iletişim teknolojilerinde ortaya çıkan yenilikler sayesinde üretim süreçlerinde otomasyon sağlanmaya başlanmıştır. Bilgisayarlar ve otomasyon sistemleri,

üretim süreçlerinin verimini ve ürün kalitesini artırmış, maliyetlerini düşürmüştür. Bu süreç, sanayi toplumundan bilgi toplumuna geçişi beraberinde getirerek dijital bir devrime yol açmıştır (Leventer ve Altun Ada, 2023). Bu dönemde, basit hesaplamalar yapan makinelerin yerini daha karmaşık hesaplar için kullanılabilen mikro bilgisayarlar almıştır. Bilgisayarların işlem gücünün artması akıllı makinelerin ortaya çıkmasına yol açarken, robot teknolojisi de hızlı bir gelişim göstererek üretimde insan gücüne olan ihtiyacı azaltmış ve otomatik robotlar insanların yerini almaya başlanmıştır. 1960'larda internetin kullanılmaya başlanması ve 1995 yılı itibariyle internet kullanımının yaygınlaşması sayesinde bilgi üretimi ve bilgiye erişim kolaylaşmıştır. Endüstri 3.0'ın önemli sonuçlarından biri, doğal kaynakların hızla tükenmeye başlaması ve sürdürülebilirlik kavramının giderek önem kazanmasıdır (Yıldız Tonga ve Tonga, 2022).

Dördüncü sanayi devrimini ifade eden Endüstri 4.0; otonom robotlar, benzetim, sistem entegrasyonu, nesnelerin interneti, siber güvenlik, bulut bilişim, eklemeli imalat, artırılmış gerçeklik ve büyük veri gibi bileşenlerden oluşan ve aynı zamanda iş gücünün üretimle ağ kurduğu bir düzeni ifade eder (Çavdar, 2019; Şentürk ve Büber'den (2023)). Endüstri 4.0 kavramı, 2011 yılında Almanya'daki Hannover Ticaret Fuarı'nda ortaya çıkmıştır. Bu devrim, iletişim ve internet teknolojilerindeki ilerlemelerle birlikte üretim süreçlerinin dijital dönüşümünü sağlamıştır. Bu dönemin temelinde, üretim sürecindeki tüm bileşenlerin eşzamanlı olarak birbirleriyle etkileşim halinde olması ve gerekli verilere kolayca erişilerek üretimde en yüksek katma değerin elde edilmesi bulunmaktadır. Endüstri 4.0 çağında, insansız makinelerin birbirleriyle iletişim kurarak çalıştığı akıllı fabrikalar bu dönüşümün en önemli unsurlarındandır. Bu sistemlerde, otomasyon merkezi bir rol oynamaktadır. Anlık izlenebilirlik ve raporlara kolay erişim sayesinde üretim süreçleri şeffaflaşmaktadır. Üretimin makineler ve sistemler arasında insan müdahalesi olmadan gerçekleşebilmesi, veri akışının sensörler aracılığıyla sağlanması ve farklı coğrafyalardaki üretim hatlarında hızlı iyileştirmeler yapılabilmesi mümkün hale gelmiştir. Endüstri 4.0'ın temel amacı; düşük maliyet, düşük enerji tüketimi, daha az alan gereksinimi, düşük ısı üretimi, yüksek hız, yüksek verimlilik ve kaliteli ürün elde etmektedir. Dördüncü sanayi devrimi, teknolojik gelişmeler sayesinde üretim süreçlerinde köklü bir değişime sebep olmuş ve toplumların ekonomik ve sosyal yapılarını büyük ölçüde etkilemiştir (Yıldız Tonga ve Tonga, 2022; Leventer ve Altun Ada, 2023).

Sanayi odaklı bakış açısına göre ilk dört sanayi devrimini özetlemek gerekirse; Endüstri 1.0, tekstil ve sanayi malları üretimi ile demiryolu rayları ve kazanlar gibi endüstriyel cihazların üretimine odaklanmıştır. Bu dönemde, sınırlı bir şekilde son tüketici ürünleri de imal edilmiştir. Endüstri 2.0, sanayi ve tüketici mallarının üretimini genişletmiş ve finansal hizmetler, tarım ve gıda işleme gibi alanlarda da sanayileşme süreci başlamıştır. Endüstri 3.0, bilgisayarların kullanımıyla birlikte hesaplama ve veri yönetimini sanayileştirmiş ve uluslararasılaşmayı artırmıştır. Endüstri 4.0 ise hizmetlerin ve bilginin sanayileşmesini sağlamıştır. Bu süreçte, özellikle yirminci yüzyılın ortalarından itibaren ve özellikle bilgisayarların yaygınlaşmasıyla birlikte akademik, bilimsel ve sanatsal çıktılar geniş bir şekilde ticarileştirilmiş ve sanayileştirilmiştir. Bu yaklaşım, sadece paydaş çıkarlarını ön planda tutarak toplumun sağlığını ve refahını, şirketlerin sürdürülebilirliğini ve diğer önemli unsurları ihmal etmiştir. Bu durum, genellikle çalışanlar ve toplum üzerinde olumsuz etkiler yaratmış ve çevresel zararlarla sonuçlanmıştır (Nousala vd., 2024).

Endüstri 4.0'ın, insan iş gücünü ve potansiyelini üretim süreçlerinden dışlama etkisi üzerine yapılan tartışmaların ardından, Avrupa Komisyonu (2021) Endüstri 5.0 kavramını duyurmuştur. Bu yeni yaklaşım, ileri teknolojilerin yalnızca ekonomik çıkarlar doğrultusunda değil, insanın ve toplumun ihtiyaçları ile refahını gözeterek geliştirilmesini, tasarlanmasını ve uyarlanmasını savunmaktadır (Teoman, 2024).

Endüstri 5.0'ın odak noktası, insanların yeteneklerini ve yaratıcılığını ön planda tutarak insan destekli teknolojik eğilimlerin geliştirilmesidir. Endüstri 5.0 felsefesinde, yüksek düzeyde otomatikleşmiş süreçlerin yanı sıra kişiselleştirilmiş ve özelleştirilmiş ürün taleplerinin karşılanması önemli bir yer tutmaktadır. Bu yaklaşım, endüstriyel üretimi daha dayanıklı, verimli ve sürdürülebilir bir hale getirmeyi amaçlamaktadır. Henüz erken aşamalarında olmasına rağmen çeşitli sektörlerde Endüstri 5.0'a yönelik çalışmalar hızlanmaya başlamıştır (Güdek, 2023). Endüstri 1.0'dan Endüstri 5.0'a kadar sanayi devrimlerinin özellikleri Çizelge 2.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. Sanayi devrimlerinin özellikleri (Chander vd.'den, 2022)

Aşama	Açıklama	Temel unsurlar	Temel nokta
1.0	Buhar ve su makinelerine dayalı endüstriyel üretim	Mekanizasyon, su ve buhar enerjisi	İlk mekanik dokuma tezgahı
2.0	Elektrik enerjisi ile seri üretim	Elektrifikasyon, iş bölümü, seri üretim	İlk montaj hattı
3.0	Elektronik ve bilişim teknolojileri sistemleri ile otomasyon	Otomasyon, elektronik, bilişim teknolojileri	İlk programlanabilir mantıksal denetleyici
4.0	Bağlantılı cihazlar, veri analitiği, bilgisayarlı makine programları ile üretimde otomasyon	Küreselleşme, dijitalleşme, nesnelerin interneti, robotik, büyük veri, bulut bilişim	Siber-fiziksel sistemler
5.0	İnsan zekası ve makineler arası iş birliği ile üretim	Kişiselleştirme, robotik ve yapay zeka, sürdürülebilirlik	İnsan-robot iş birliği, biyoekonomi

Endüstri 5.0'ın merkezinde insan merkezli yaklaşım, sürdürülebilirlik ve dayanıklılık olmak üzere üç temel yapı taşı bulunmaktadır. İnsan merkezli yaklaşım, insan ihtiyaçlarını üretim sürecinin merkezine yerleştirir. Sürdürülebilirlik, doğal kaynakların yeniden kullanımına, geri dönüşümüne ve atıkların ve çevresel etkilerin azaltılmasına odaklanır. Dayanıklılık ise endüstriyel üretimde sağlamlığın ortaya konmasını ifade eder. Dayanıklı bir sistemde, kriz anları süreç esnekliği sayesinde atlatılır ve üretim kapasiteleri uyarlanabilir hale gelir (Zizic vd., 2022: Kılıç'tan 2023).

Endüstri 5.0 için iki vizyon öne çıkmaktadır. Bunlardan ilki, insan-robot iş birliği vizyonudur. Bu vizyonda, insanların ve robotların mümkün olan her zaman ve her yerde birlikte çalışabilmesi esas alınmakta; insanların yaratıcılık gerektiren görevlere odaklanması, geri kalan işlerin ise robotlar tarafından üstlenilmesi önerilmektedir. Endüstri 5.0 için bir diğer vizyon ise biyoekonomidir (Demir ve Cicibaş, 2019: Demir vd.'den (2019)). Biyoekonomi, yenilenebilir biyolojik kaynakların üretilmesini ve bu kaynakların ya

da atıkların; gıda, yem, biyoteknoloji temelli ürünlere ve biyoenerji gibi katma değerli çıktılara dönüştürülmesini ifade etmektedir. Bu kapsamda biyoekonomi; tarım, ormancılık, balıkçılık, gıda ve kağıt hamuru üretimi gibi sektörlerin yanı sıra kimya, biyoteknoloji ve enerji sektörlerinin belirli alanlarını da içermektedir. Söz konusu sektörler yaşam bilimleri, tarım bilimi, ekoloji, gıda bilimi ve sosyal bilimler gibi çok disiplinli bilimsel temellere dayanmaktadır ve biyoteknoloji, nanoteknoloji, bilgi ve iletişim teknolojileri ve mühendislik gibi endüstriyel ve destekleyici teknolojilerle etkileşim halindedir (Avrupa Komisyonu, 2012: Demir vd.'den (2019)).

Endüstri 5.0, henüz gelişim evresinde olan bir kavramdır. Teknolojik ilerlemelere bağlı olarak bu aşamanın belirgin özellikleri ve endüstriyel yansımaları farklılık gösterebilmektedir. Ayrıca, sanayi devrimleri arasındaki geçişler her zaman doğrusal bir süreç izlememekte; önceki sanayi devrimlerine ait unsurlar, modern endüstrilerde yeni teknolojiler ve uygulamalar ile varlığını sürdürebilmektedir (Verma, 2024).

Endüstri 5.0'ın başarılı bir biçimde hayata geçirilmesi, Endüstri 4.0'a işlerlik kazandıran büyük veri, nesnelerin interneti, yapay zeka ve makine öğrenmesi gibi teknolojilerin güncellenmesini ve Endüstri 5.0'ı destekleyen ve gelişmekte olan yeni teknolojilerin benimsenmesini ve uyarlanmasını gerektirmektedir (Teoman, 2024). Bu teknolojiler aşağıda açıklanmıştır (Maddikunta vd., 2022):

- İnsan ve robot iş birliği teknolojileri, Endüstri 5.0'da verimliliği artırmak ve insanlarla makineler arasındaki ilişkiyi güçlendirmek için kullanılmaktadır. Bu sayede, Endüstri 5.0 uygulamalarında güvenliği ve performansı artırırken, insan çalışanlar için daha ilgi çekici sorumluluklar yaratılır ve üretkenlik artışı sağlanmaktadır.
- Uç bilişim; Endüstri 5.0'ın gecikmeyi en aza indirmesini, ağ bant genişliğini azaltmasını, genel veri güvenliği ve gizliliğini iyileştirmesini ve bağlantı sorunları nedeniyle aksayan işlemleri kolaylaştırmasını sağlamaktadır. Bu teknoloji, Endüstri 5.0'ın endüstriyel sektörler hakkında bilgi alışverişinde bulunmak için standart donanım ve yazılım kaynaklarını kullanmasına yardımcı olmaktadır.
- Dijital ikiz teknolojisi, Endüstri 5.0'ın teknik sorunları daha hızlı tanımasını, üretkenliğe dayalı olarak yeniden yapılandırılabilecek veya yenilenebilecek öğeleri

belirlemesini, daha doğru tahminler yapmasını, gelecekteki hataları öngörmesini ve büyük mali kayıplardan kaçınmasını sağlamaktadır.

- Her şeyin interneti; iletişim kanallarındaki darboğazları ortadan kaldırarak, gecikmeyi azaltarak ve tedarik zinciri israfını önleyerek ve üretim süreçlerini optimize ederek işletme maliyetlerini düşürme fırsatı sunmaktadır.
- Büyük veri analitiği, Endüstri 5.0'daki kitlesel özelleştirme süreçlerine yardımcı olarak mevcut kaynaklarla sıfır hata entegrasyonu sağlamaktadır. Akıllı sistemler ve veri merkezleri ile paylaşılan gerçek zamanlı analitik veriler, üreticilerin büyük miktarda veriyi yönetmesine ve işlemesine yardımcı olmaktadır.
- Blok zincirleri ve akıllı sözleşmeler, farklı paydaşlar arasındaki anlaşma süreçlerini otomatikleştirmek ve bu süreçlere dinamizm katmak amacıyla kullanılmaktadır. Endüstri 5.0 uygulamalarında, kimlik doğrulama ve otomatik hizmet odaklı eylemler gibi güvenlik uygulamalarında akıllı sözleşmelerden faydalanılmaktadır.
- 6G ağları, Endüstri 5.0 uygulamaları için ultra yüksek veri hızları, ultra düşük gecikme süresi, ultra yüksek güvenilirlik, yüksek enerji verimliliği ve trafik kapasitesi gibi akıllı bilgi toplumunun gereksinimlerini karşılamak üzere tasarlanmaktadır.
- Ağ dilimleme, endüstriyel nesnelerin interneti ağlarında ağ izleme için düşük maliyetli ve optimum ağ kaynağı kullanımına sahip farklı sanallaştırılmış ağlar sağlamaktadır.
- Genişletilmiş gerçeklik teknolojileri; Endüstri 5.0 uygulamalarında uzaktan yardım, montaj hattı izleme, sağlık eğitimi, uzaktan sağlık hizmetleri, kapalı alan ve yerelleştirilmiş açık hava navigasyonu, sürücü/pilot eğitimi, bakım ve pilot eğitimi gibi birçok alanda kullanılmaktadır.
- Özel mobil ağlarından, Endüstri 5.0 uygulamalarında yerelleştirilmiş ve kullanım senaryosuna özgü ağ hizmetleri sunmak için faydalanılmaktadır. Fabrikalar, hastaneler, okullar ve üniversiteler gibi yerlerde konuma özel bağlantı çözümleri sağlamak amacıyla bu teknolojilerden yararlanılmaktadır.

Endüstri 5.0, yalnızca üretim süreçlerinde verimliliği artırmayı değil, sürdürülebilirlik odaklı yaklaşımlarda köklü bir dönüşüm sağlamayı da amaçlamaktadır. İnsan-makine etkileşiminin kritik rolünü vurgulayan bu endüstriyel paradigma, teknoloji ile insan zekası arasındaki ilişkiyi güçlendirerek otomasyon ile insan yargısı arasında dengeli

bir uyum oluşturmayı hedeflemektedir. Özellikle, karmaşık ve etik karar alma süreçlerinde sürdürülebilir ilerlemenin yalnızca teknolojik yeniliklere değil; insan faktörüne de bağlı olduğu kabul edilmektedir. Endüstri 5.0, Endüstri 4.0 ile ortaya çıkan iş gücü kaybı ve çevresel etkiler gibi endişelere çözüm sunmayı amaçlamakta ve iş dünyasının yalnızca karlılık odaklı olmaması gerektiğini, çevresel ve toplumsal refahın da iş süreçlerine entegre edilmesinin önemini vurgulamaktadır. Bu dönüşümün başarılı bir şekilde hayata geçirilebilmesi için hükümetler, işletmeler ve toplumun tüm paydaşlarının bütüncül ve kararlı bir çaba göstermesi gerekmektedir. Aynı zamanda; şeffaflık, hesap verebilirlik ve sürekli iyileştirme ilkelerine bağlı kalınması büyük önem taşımaktadır. Endüstri 5.0'ın, insanlar ve makineler arasındaki sürdürülebilir iş birliğine dayalı vizyonunun benimsenmesinin; daha adil, çevre dostu ve refah seviyesi yüksek bir geleceğin inşa edilmesine katkı sağlaması beklenmektedir (Verma, 2024).

Endüstri 5.0, üretim süreçlerinden insan iş gücünün tamamen çıkarılmasına yönelik ortaya çıkan pek çok sorunu ele alarak çözüm sunmaktadır. Ancak, insan faktörünün üretim süreçlerine yenilikçi katkılar sağlama potansiyeli göz önüne alındığında, ileriye dönük yeni becerilerin de bu sistemlere entegre edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, odaklanılması gereken bazı temel yetkinlikler aşağıda sıralanmıştır (Chander vd., 2022):

- Otonom sistemlerin etik ilkeleri, gelişmiş becerilerin endüstriyel yönetime entegre edilmesinden önce detaylı bir şekilde değerlendirilmelidir.
- Otonom sistemlerde, etik davranışların doğrulanması ve geçerliliğinin sağlanması büyük önem taşımaktadır.
- Üretim süreçlerinin şeffaf bir şekilde yürütülmesi, hızlı ve verimli üretim mekanizmalarının oluşturulması ve aşırı üretim riskine karşı dikkatli olunması göz önünde bulundurulması gereken önemli unsurlardır.
- Otonom sistemlerde geliştirilen etik davranış çözümlerinin anlaşılır ve uygulanabilir olması gerekmektedir. Ancak, endüstri uzmanları bu çözümleri benimseme ve hayata geçirme konusunda çeşitli zorluklarla karşılaşmaktadır.
- Teknoloji, uzmanlar, paydaşlar, toplum ve işletmeler arasında ortaya çıkabilecek olası sorunları önlemek için sistemlerin sürekli olarak doğrulanması ve gerekli ayarlamaların yapılması önem arz etmektedir.

2.2. Montaj Hatlarında İnsan ve Robot Etkileşimi

Endüstri 2.0'a geçişin temelini oluşturan montaj hatları, standartlaştırılmış ürünlerin büyük miktarlarda ve yüksek verimlilikle montajını gerçekleştirmek üzere tasarlanmıştır. Dördüncü sanayi devriminin ortaya çıkmasıyla, otomasyona dayalı robotik montaj hatları endüstriyel uygulayıcıların ve akademik araştırmacıların odak noktası haline gelmiştir. Bununla birlikte, Endüstri 5.0'ın insan-robot iş birliği vizyonu doğrultusunda iş birlikçi montaj hatları giderek daha fazla önem kazanmaya başlamıştır. Bu vizyon, insan ve robot işgörenlerin birbirini tamamlayıcı yetkinliklerinden yararlanarak üretim süreçlerinde esnekliği, verimliliği ve uyarlanabilirliği artırmayı amaçlamaktadır.

Bu bölümde, montaj hatlarının tarihçesi hakkında bilgiler sunulmuştur. Ardından, MHD ile ilgili temel kavramlara ve MHD problemlerinin sınıflandırılmasına değinilmiş ve iş birlikçi montaj hatları ile ilgili hususlar açıklanmıştır. Son olarak, bu tez çalışmasının konusu olan montaj hatlarının insan-robot iş birliğine geçiş için yeniden dengelenmesine ilişkin açıklamalara yer verilmiştir.

2.2.1. Montaj hatlarının tarihçesi

Montaj, bileşenlerin ardışık olarak birleştirilmesi suretiyle karmaşık bir ürünün imal edildiği üretim aşamasıdır (Montini vd., 2024). Malzeme listesindeki parçaların ve bileşenlerin bitmiş bir ürün oluşturmak üzere iş istasyonlarında sıralı bir şekilde birbirine eklenerek montaj faaliyetinin gerçekleştirildiği seri üretim sistemi bileşenleri ise montaj hattı olarak tanımlanmaktadır. Montaj tipi üretim ve montaj hatları, tarihsel süreçte önemli bir evrim geçirmiş ve köklü bir geçmişe sahip olmuştur (Thomopoulos, 2014):

Montaj uygulamasının en eski örneklerinden biri Çin'de ortaya çıkmıştır. 1974 yılında, bir grup çiftçi tarafından Çin'in ilk imparatorunun ordularını betimleyen heykellerden oluşan bir koleksiyon keşfedilmiştir. Bu keşif, Milattan Önce 210 yılında imparator ile birlikte gömülen 8.000 savaşçı ve savaş arabası figürünü içermektedir. Tarihçiler, bu figürlerin devletin yönlendirmesiyle işçiler ve zanaatkarlar tarafından atölyelerde üretildiğini belirtmiştir. Figürlerin baş, kol, bacak ve gövde gibi parçaları ayrı olarak üretilmiş ve daha sonra birleştirilmiştir. Farklı yüz ifadeleri oluşturmak amacıyla son

rötuşlar eklenmiş, ayrıca her atölye ürettiği birimlerin üzerine kendi ismini işleyerek kalite kontrolünü sağlamıştır. Bu süreç, bireysel parçaların önce üretilmesi, ardından pişirilmesi ve son olarak monte edilmesi açısından montaj hattı üretimine benzemektedir.

On altıncı yüzyılda, Venedik Tersanesi'nde 16.000 işçi, montaj hattı yöntemine benzer bir şekilde gemiler için yelkenler, kürekler, tekerlek mekanizmaları, toplar, direkler, halatlar ve mühimmat gibi standart parçalar üretmiştir. Bu parçalar, neredeyse her gün bir gemi üretmek amacıyla kullanılmıştır.

1785 yılında, Delaware eyaletinde Oliver Evans tarafından ilk otomatik un değirmeni inşa edilmiştir. Bu değirmende, un üretim sürecini tamamen otomatik hale getirmek için çeşitli mekanik cihazlar kullanmıştır.

1797 yılında, Eli Whitney, ABD'de hükümet için misket tüfeklerini üretmek amacıyla montaj hattı sistemini kullanmıştır. Tüfeğin tüm parçaları önceden üretilmiş ve aynı mühendislik toleranslarına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Böylece, her parça herhangi bir tüfeğe kolayca monte edilebilmiştir. Bu yöntem, hasar gören tüfek parçalarının değiştirilebilir olmasını sağlamıştır. 1797'den birkaç yıl sonra, ateşli silah üretiminde Whitney ve diğer üreticiler, makine takımları ve şablonlar kullanarak standart ve değiştirilebilir parçalar üretmeye başlamıştır. Bu yöntem, işçilerin beceri seviyesine olan bağımlılığı azaltmış ve daha az nitelikli işçilerin istihdam edilmesine olanak tanımıştır.

1800 yılında, Samuel Boulton ve James Watt, İngiltere'deki Portsmouth Blok Fabrikaları'nda ahşap işleme makineleri geliştirmiştir. Bu makineler, üç katlı bir ahşap işleme binasında konumlandırılmış ve ağır ürünler kasnaklar üzerindeki düz kayışlarla taşınmıştır. Daha önce el ile kesilen çeşitli gemi bileşenlerini üretmek amacıyla kullanılan bu makineler, üretim sürecinde önemli bir dönüşümü simgelemiştir. 1802 yılında, İngiliz Kraliyet Donanması, farklı boyutlarda 100.000 makaraya ihtiyaç duymuş ve el yapımı makaraların üretiminden memnun kalmamıştır. Portsmouth Blok Fabrikaları'nda Mac Isambard Bruner, Henry Maudslay ve diğer mühendisler, Kraliyet Donanması'nın ihtiyacını karşılamak amacıyla 22 farklı makine takımı tasarlamış ve bu sayede ilk doğrusal ve sürekli montaj hattı işleme sistemlerinden biri oluşturulmuştur.

1836 yılında, James Nasmyth ve Holbrook Faskell, İngiltere'de Bridgewater Dökümhanesi'ni kurmuştur. Nasmyth, özellikle lokomotif üretimi için büyük ölçekli standart makine takımları tasarlamış ve üretmiştir. Bu firma, üretim sürecinde malzeme taşıma yöntemlerini kullanarak montaj hattı sisteminin gelişimine öncülük etmiştir.

On dokuzuncu yüzyılda, ABD'de üretim yöntemlerinde önemli gelişmeler ortaya çıkmış ve özellikle hükümet için silah üretimi yapan fabrikalarda iş gücü verimliliği büyük ölçüde artmıştır. Bu süreçte değiştirilebilir parçaların kullanımı ile takım tezgahlarının, fikstürlerin ve şablonların üretim sürecine entegre edilmesi yaygınlaşmıştır. Amerikan sistemi, makinelerin iş gücü yerine kullanılmasını sağlayarak yarı vasıflı işçilerin verimli bir şekilde çalışmasına olanak tanımıştır.

1867 yılında, Chicago'daki et paketleme endüstrisi ABD'deki ilk endüstriyel montaj hatlarından birini oluşturmuştur. İşçiler, belirli istasyonlarda kasnak sistemi ile taşınan et parçalarını işleyerek kendilerine atanan görevleri tamamlamıştır. Bu sistem, esasen bir söküm hattı işlemi olarak çalışmıştır.

1900 yılından önce ürün parçaları zanaatkarlar tarafından çeşitli aletlerle teker teker şekillendirilirken, İngiltere'de ve Amerika'nın New England bölgesinde üretim biçiminin değişmesiyle, değiştirilebilir parçalar ve montaj hattı uygulamaları ortaya çıkmıştır.

1901 yılında, Ransom Olds, Detroit'teki motorlu araç fabrikasında ilk otomotiv montaj hattını geliştirmiştir. Bu yöntem, üretim kapasitesini yıllık 425 otomobilden 2.500 otomobile çıkarmıştır. Henry Ford, 1913'te bu fikri daha da ileri taşıyarak hareketli bant sistemlerini kullanmış ve seri üretim sürecini geliştirmiştir. Ford, Model T isimli otomobili piyasaya sürerek üretim maliyetlerini düşürmüş ve orta sınıfın erişimine açmıştır. Montaj hatları; üretim sürecinde verimliliği artırmış, maliyetleri düşürmüş ve küresel ekonominin gelişimine büyük katkılar sağlamıştır.

2.2.2. Montaj hattı dengeleme

Montaj hatları; bir yerleşim düzenine göre sıralanmış belirli sayıda iş istasyonundan oluşan, parçaların ve yarı mamullerin bir taşıma aracı aracılığıyla hat boyunca ilerlediği, iş istasyonlarında bulunan işgörenlerin kendilerine atanmış olan montaj görevlerini çevrim süresi içerisinde yerine getirdiği akış tipi üretim sistemleridir. Bu tür hatlarda, yüksek hacimli ve standart özelliklere sahip ürünlerin montajı gerçekleştirilmektedir. Montaj sistemleri ilk olarak otomotiv sektöründe uygulanmış olmakla birlikte, günümüzde çok çeşitli endüstriyel alanlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Hızla artan dünya nüfusu sebebiyle çok sayıda ürün üretme zorunluluğu, üretim süreçlerini giderek daha karmaşık bir yapıya dönüştürmektedir. Bu doğrultuda, talep edilen ürünlerin istenilen kalitede, düşük maliyetle ve en kısa sürede üretilebilmesini sağlamak için işletmelerin montaj hatlarını verimli bir biçimde kullanmaları önem arz etmektedir (Can ve Öner, 2021). Bir montaj hattının verimli çalışabilmesi için toplam iş yükünün iş istasyonlarına dengeli bir şekilde dağıtılması gerekmektedir. Bu faaliyet, literatürde MHD olarak bilinmektedir. MHD kavramı ilk kez Bryton'un (1954) yüksek lisans tezinde ele alınmış, problemin matematiksel formülasyonu ise Salveson (1955) tarafından geliştirilmiştir.

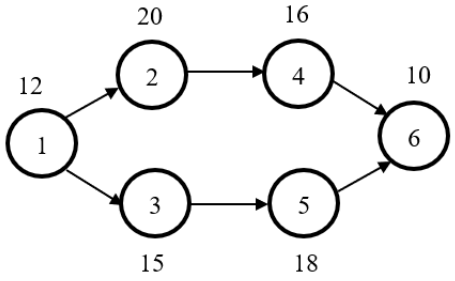
Rekabetçi piyasa koşullarında işletmelerin varlıklarını sürdürebilmeleri kaynaklarını etkin bir şekilde kullanmalarına bağlıdır. Montaj hatlarının dengesiz olması, iş istasyonları arasındaki iş yükü dağılımının bozulmasına ve dolayısıyla bekleme sürelerinin artmasına neden olmaktadır. Bu durum, üretim hızının azalmasına ve sistem performansının düşmesine yol açmaktadır. Bu nedenle, sistemin verimli çalışabilmesi ve belirlenen performans ölçütlerinin eniyilenebilmesi için montaj hatlarının dengelenmesi kritik bir gerekliliktir. Hatların dengede olması, günümüzde kitlesel özelleştirme gibi modern üretim stratejilerinin uygulanmasına da olanak tanımaktadır. Bu doğrultuda, montaj sistemlerinin dikkatli bir şekilde planlanmasının yakın gelecekte de yüksek öneme sahip olacağı beklenmektedir (Adeppa, 2015).

2.2.2.1. Montaj hattı dengelemede temel kavramlar

MHD problemi, belirli kısıtlar altında bir veya daha fazla performans ölçütünü eniyileyecek şekilde görevlerin iş istasyonlarına mümkün olduğunca dengeli biçimde atanmasına odaklanmaktadır (Karaş ve Özçelik, 2021). MHD problemine ilişkin temel kavramlar aşağıda açıklanmıştır.

Görev: Montaj sürecinde yapılması gereken işlemlere ait en küçük iş parçasına verilen isimdir. MHD probleminde en temel kısıtlardan biri görevlerin bölünmezliği ile ilgilidir. Buna göre her görev bölünmeden bir iş istasyonunda tamamlanmalıdır.

Öncelik ilişkileri: Üretilen ürünün özelliğine göre montaj görevleri arasında öncüllük ve ardıllık ilişkileri bulunur. Bu ilişkilere göre belirli görevlerin, ilişkili olduğu diğer görevlerden daha önce veya daha sonra gerçekleştirilmesi gerekir. Bu ilişkiler, teknolojik öncelik diyagramı üzerinde gösterilir. Bu diyagramda, aralarında ilişki bulunan görevler birbirine ok ile bağlanır. Görevleri iş istasyonlarına atarken bu ilişkileri göz önünde bulundurmak gerekir. Şekil 2.1'de, örnek bir teknolojik öncelik diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.1. Teknolojik öncelik diyagramı (Karaş'tan, 2020)

İşlem süresi: Her bir montaj görevini gerçekleştirmek için gerekli olan süreye verilen isimdir.

İş istasyonu: Montaj görevlerinin öncelik ilişkilerine göre atandığı iş alanlarıdır. Bir istasyonda genellikle birden fazla görev gerçekleştirilir.

İşgören: İş istasyonlarında montaj görevlerini gerçekleştirmek için bulunan operatörlere verilen genel isimdir. Bir iş istasyonunda işgören olarak işçi, robot veya bu türlerin etkileşimine izin veren iş birlikçi işlem alternatifleri bulunabilir. Bir görevin işlem süresi, işgören türlerine göre değişiklik gösterebilir. Bu durumda, hat dengelenirken işgörenlerin atanmasına dair kararın da verilmesi gerekir.

İş istasyonu yükü: Her bir iş istasyonunun yükü, ilgili istasyona atanan görevlerin işlem sürelerinin toplamından oluşur.

Çevrim süresi: Son iş istasyonundan ardışık olarak çıkan iki bitmiş ürün arasında geçen süredir. Her bir iş istasyonuna, ilgili istasyona atanan görevlerin tamamlanması için çevrim süresi kadar zaman verilir. Her çevrim süresi sonunda, taşıma aracı istasyonlar arasında hareket eder. Çevrim süresi, istasyon süresine eşit veya daha büyük olabilir. Bir iş istasyonunun yükü çevrim süresinden küçükse, ilgili istasyonda çevrim süresi ve istasyon yükü arasındaki fark kadar boş bekleme süresi meydana gelir. Hatların dengelenmesindeki temel amaç, boş sürelerin olabildiğince azaltılmasıdır. Tüm istasyonların eşit yüke sahip olduğu durum, mükemmel dengeyi ifade eder. Ancak, pratik uygulamalarda mükemmel denge durumuna nadiren ulaşılabilir.

2.2.2.2. Montaj hattı dengelemede temel atama kararları

MHD probleminde en temel atama kararı, görevlerin atanacağı istasyonların belirlenmesi ile ilgilidir. Bunun haricinde, problemin daha karmaşık versiyonlarında işgören ve kaynak ataması gibi farklı atama kararları da bulunabilmektedir. MHD problemlerinde sıklıkla karşılaşılan atama kararları aşağıda açıklanmıştır.

Görev atamaları: Görevlerin iş istasyonlarına iş yükü açısından dengeli bir şekilde atanabilmesi için gerekli olan karardır. Problemin temel versiyonu, yalnızca görev-iş istasyonu atamalarına ilişkin kararı içerir.

İşgören atamaları: Ele alınan MHD probleminde farklı işgören alternatiflerinin bulunması ve bu durumun hat dengesini etkilemesi halinde istasyonlara/görevlere atanacak olan işgörenlerin belirlenmesi gerekir.

Kaynak atamaları: Belirli görevlerin belirli kaynakları gerektirmesi veya bir kaynağın yalnızca belirli iş istasyonlarında kullanılabilmesi halinde, kaynak atamaları ile ilgili kararın verilmesi gerekliliği ortaya çıkar.

2.2.2.3. Montaj hattı dengelemede temel kısıtlar

MHD probleminde temel kısıtlar; görevlerin bölünmezliği kısıtı, öncelik ilişkileri kısıtı ve çevrim süresi kısıtıdır.

Görevlerin bölünmezliği kısıtı: Görevlerin bölünmezliği kısıtına göre her görev bir iş istasyonuna atanmalıdır. Bir görevin birden fazla istasyona bölünerek tahsis edilmesine veya hiçbir istasyona atanmamasına izin verilmez.

Öncelik ilişkileri kısıtı: Görevler iş istasyonlarına atanırken aralarındaki öncelik ilişkilerine uyulmalıdır. Bir görevi gerçekleştirmeden önce yapılması gereken görevler ilgili görevin öncülü, o görev tamamlanmadan yapılamayanlar ise ardıllarıdır. Bir görevin öncülleri, ilgili görevin atandığı istasyondan sonra gelen bir istasyona; ardılları ise daha önceki bir istasyona atanamaz.

Çevrim süresi kısıtı: Her bir iş istasyonunun yükü en fazla çevrim süresi kadar olabilir. Dolayısıyla, malzemelerin/yarı mamullerin bir istasyonda çevrim süresinden fazla kalması mümkün değildir.

MHD problemlerinde, temel kısıtlar haricinde problemin yapısına göre aynı istasyona atanması veya atanmaması gereken görevlere ilişkin bölgeleme kısıtları, kullanılan ekipmanlar dolayısıyla bazı görevlerin belirli istasyonlara atanmasını sağlayan sabit donanım kısıtları, hattın birden fazla tarafının olduğu durumlarda bazı görevlerin yalnızca belirli bir tarafta gerçekleştirilmesini sağlayan konum kısıtları, maliyet odaklı uygulamalarda bütçe kısıtları ve iş yükünün yanı sıra iş istasyonlarındaki ergonomik risklerin sınırlandırılmasına yönelik kısıtlar gibi farklı kısıt türleri de görülebilmektedir.

2.2.2.4. Montaj hattı dengelemede temel amaçlar

MHD literatüründe problem özelliklerine göre çok çeşitli optimizasyon ölçütlerinin ele alındığı bilinmektedir. Problemin temel versiyonunda tip-1, tip-2, tip-E ve tip-F olarak bilinen dört ana amaç fonksiyonu türü bulunmaktadır.

Tip-1: Çevrim süresinin bilindiği durumda hattın iş istasyonu sayısının enküçüklenmesidir.
Tip-2: İş istasyonu sayısının bilindiği durumda hattın çevrim süresinin enküçüklenmesidir.
Tip-E: Çevrim süresinin ve iş istasyonu sayısının enküçüklenmesini ifade eder. Bu amaç, hat etkinliğinin enbüyüklenmesine karşılık gelir.
Tip-F: Belirli çevrim süresi ve iş istasyonu sayısı için olurlu bir çözümün bulunup bulunmadığını araştıran uygunluk problemidir.

2.2.3. Montaj hattı dengeleme problemlerinin sınıflandırılması

Ortaya çıkışından bu yana farklı versiyonları önerilen ve geniş bir literatüre sahip olan MHD problemi için araştırmacılar tarafından çeşitli sınıflandırmalar yapılmıştır. Baybars (1986), Becker ve Scholl (2006), Scholl ve Becker (2006) ve Boysen vd. (2006, 2008) problemi varsayım özellikleri açısından basit montaj hattı dengeleme (BMHD) ve genel montaj hattı dengeleme (GMHD) problemleri olarak iki gruba ayırmıştır. Ghosh ve Gangnon (1989) ise varsayım özellikleri haricinde model sayısına ve işlem sürelerinin doğasına göre bir sınıflandırma yapmıştır. Erel ve Sarin (1998), model sayısını ve işlem sürelerinin doğasını baz almıştır. Sivasankaran ve Shahabudeen (2014) ise bu sınıflandırmaya istasyonların yerleşim şeklini ifade eden bir grup eklemiştir.

MHD problemleri, literatürdeki sınıflandırılmalar ışığında varsayım özelliklerine, optimize edilmek istenen amaç sayısına, üretilen model sayısına, işlem sürelerinin doğasına, hattın yerleşim şekline, kontrol yapısına, otomasyon seviyesine ve kurulum sıklığına göre gruplandırılabilir.

2.2.3.1. Varsayım özelliklerine göre sınıflandırma

Varsayım özellikleri açısından MHD problemleri, BMHD ve GMHD olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. BMHD, problem karmaşıklığını azaltan bazı temel varsayımları içermektedir (Baybars, 1986):

- Tüm girdi parametreleri deterministiktir.
- Bir görev, iki veya daha fazla istasyon arasında bölünemez.
- Teknolojik öncelik gereklilikleri nedeniyle görevler rastgele sıralarla gerçekleştirilemez.
- Tüm görevler yerine getirilmelidir.
- Tüm istasyonlar, herhangi bir görevi yapabilecek donanıma ve işgörene sahiptir.
- Görevlerin işlem süreleri, gerçekleştirildikleri istasyondan ve önceki ya da sonraki görevlerden bağımsızdır.
- Herhangi bir görev, herhangi bir istasyonda yürütülebilir.
- Montaj hattının, besleyici veya paralel alt montaj hatları olmaksızın seri olduğu kabul edilir veya bu türden olası etkileşimler göz ardı edilir.
- Tek bir ürünün benzersiz bir modeli üretilmektedir.

BMHD varsayımları, gerçek hayat uygulamalarında verimli sonuçlar elde etme olasılığını düşürmektedir. GMHD problemlerinde ise pratik uygulamalara daha gerçekçi bir bakış sunmak amacıyla bazı BMHD varsayımları kaldırılır. Örneğin, hattın iş istasyonlarının düz yerine farklı şekillerde sıralanmasını, montaj hattında birden fazla modelin üretilmesini ve işlem sürelerinin veya talebin belirsiz olduğunu ele alan problemler GMHD kategorisine girmektedir (Saif vd., 2014).

2.2.3.2. Amaç sayısına göre sınıflandırma

MHD problemleri, amaç sayısına göre tek amaçlı ve çok amaçlı olmak üzere iki grupta incelenmektedir.

Tek amaçlı: Tek performans ölçütünün eniyilenmesine çalışılır.

Çok amaçlı: Eşzamanlı olarak birden fazla amacın optimize edilmesine odaklanılır. Bir problemin çok amaçlı olabilmesi için ele alınan amaçların birbiriyle çelişmesi gerekmektedir.

2.2.3.3. Model sayısına göre sınıflandırma

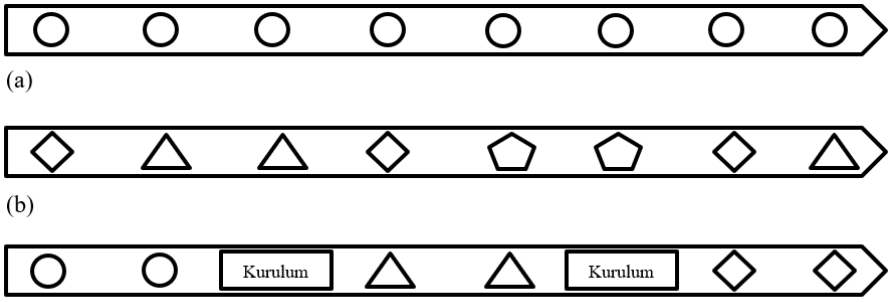
MHD problemleri, üretilen model sayısı açısından tek modelli, karma modelli ve çok modelli olmak üzere üçe ayrılmaktadır (Boysen vd., 2008):

Tek modelli: Montaj hattında yalnızca bir modelin üretimiyle ilgilenilir. Aynı hat üzerinde birden fazla ürün üretilmesine karşın kurulum ve işlem sürelerinde önemli farklılıklar meydana gelmiyorsa, bu tip bir montaj sistemi de tek modelli olarak ele alınabilir.

Karma modelli: Benzer özellikler taşıyan birden fazla model çeşidinin üretildiği hatlardır. Bu hatlarda, model geçişleri arasındaki kurulum süreleri ihmal edilebilecek kadar azaltılarak farklı modeller üretilebilir. Karma modelli hatlarda, modellerin üretim sırasının belirlenmesi gerekir.

Çok modelli: Birden fazla modelin üretiminin partiler halinde gerçekleştirildiği ve modeller arasındaki geçişlerde kurulum yapılması gereken hatlardır. Özellikle parti büyüklükleri fazlaysa, partiler arasındaki kurulum sürelerinin önemi nispeten küçük olduğundan, hat dengesi her model için ayrı ayrı belirlenebilir. Bununla birlikte, çok modelli üretimde de üretim süreçlerinde belirli bir derecede benzerlik olması gerekir ve farklı modeller aynı kaynaklar kullanılarak üretilir. Hat dengeleri ayrı ayrı belirlenirse, modeller tarafından paylaşılan bu kaynakların, üretim sistemi yeni bir parti için ayarlandığında diğer iş istasyonlarına taşınması veya birden fazla kez kurulması gerekebilir. Bu da kurulum sürelerini ve maliyetleri artırır. Bu durum hat dengesinde dikkate alınırsa, kurulum süreleri önemli ölçüde azaltılabilir ve daha küçük partilerin oluşturulması mümkün hale gelir.

Şekil 2.2, tek modelli (a), karma modelli (b) ve çok modelli (c) montaj hatlarını ifade etmektedir.



Şekil 2.2. Model sayısına göre montaj hatları: a) tek modelli montaj hattı, b) karma modelli montaj hattı, c) çok modelli montaj hattı (Karaş'tan, 2020)

2.2.3.4. İşlem sürelerinin doğasına göre sınıflandırma

MHD problemleri, işlem sürelerinin doğası açısından deterministik, stokastik ve bulanık olmak üzere üçe ayrılabilir.

Deterministik: İşlem sürelerinin değerleri önceden bilinir ve sabittir. MHD problemlerinde, genellikle problem karmaşıklığını azaltmak için girdi parametrelerinin deterministik olduğu varsayılır.

Stokastik: Gerçek hayat uygulamalarında, insan unsuru görevlerin işlem sürelerinin değişken olmasına yol açmaktadır. Söz konusu değişkenliğin sebepleri arasında yorulma, dikkatin dağılması, yetersiz nitelikteki iş gücü, iş tatminsizliği, hatalı girdiler ve araç-gereç bozulmaları sayılabilir. Stokastik MHD'de işlem süreleri, belirli bir olasılık dağılımına uyan rassal değişkenler olarak kabul edilir (Ağpak vd., 2002).

Bulanık: İşlem süreleri deterministik olarak ifade edilemeyebilir veya geçmişe dair yeterli veri olmaması sebebiyle işlem sürelerinin dağılımı belirlenemeyebilir. Bu gibi durumlarda, işlem süreleri bulanık olarak ele alınabilir (Kalender vd., 2013).

2.2.3.5. Hat yerleşimine göre sınıflandırma

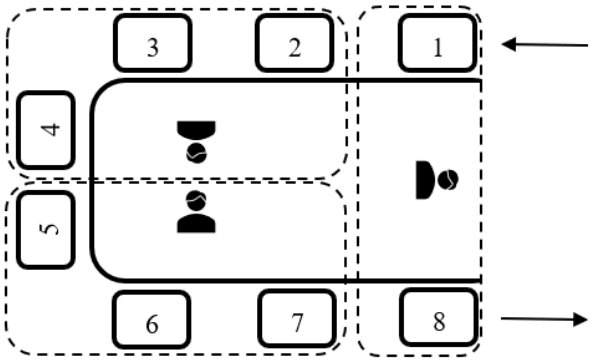
İş istasyonlarının montaj hattındaki yerleşim şekline göre MHD problemleri; düz, U-tipi, paralel ve çift taraflı olarak sınıflandırılabilir.

Düz: Düz montaj hatlarında iş istasyonları seri şekilde birbiri ardına sıralanır. Bu hatlarda, parçalar ve yarı mamuller düz bir doğrultuda istasyonlar arasında hareket eder (Şekil 2.3). Geleneksel MHD probleminde modellenen üretim hattında, iş istasyonları düz bir sırada yerleştirilir (Ağpak vd., 2002).



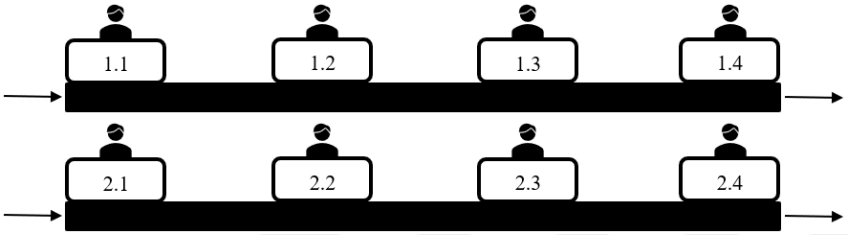
Şekil 2.3. Düz bir montaj hattı (Karaş'tan, 2020)

U-tipi: Toyota'nın Tam Zamanında Üretim (TZÜ) ilkesinin uygulanabilmesi amacıyla üretim hattındaki istasyonların "U" şeklini alacak şekilde konumlandırılmasıyla ortaya çıkmıştır. Bu hatlarda, hattın girişi ve çıkışı aynı yönde bulunur (Şekil 2.4). U-tipi hatlar, görevler arasındaki öncelik ilişkilerinin sağlanması için düz hatlara nazaran daha esnek bir yapıya sahiptir. Düz hatlarda, görevlerin istasyonlara atanmasında dikkate alınan atanabilir görevler kümesinin elemanları, öncülleri daha önceden atanmış görevlerden oluşur. U-tipi hatlarda ise atanabilir görevler kümesinin elemanları, öncülleri atanmış görevler kümesi ile ardılları atanmış görevler kümesinin birleşiminden meydana gelir (Ağpak vd., 2002). U-tipi hatlar, işgörenler arasındaki iletişimin güçlenmesine ve bir sorunla karşılaşıldığında hızlı çözülebilmesine katkı sağlar. Bu hatlarda çalışan işgörenler, çeşitli istasyonlarda dönüşümlü şekilde görev alarak çoklu beceriye sahip olur. U-tipi hatlar, TZÜ prensiplerinin bir sonucu olarak hattın çıktı oranının yeniden ayarlanması gerekliliği söz konusu olduğunda, işgörenlerin sayısının değiştirilmesi açısından esneklik sağlar. Bu hatlarda, düz yerleşime kıyasla daha az sayıda iş istasyonuna gereksinim duyulur (Miltenburg ve Wijngaard, 1994).



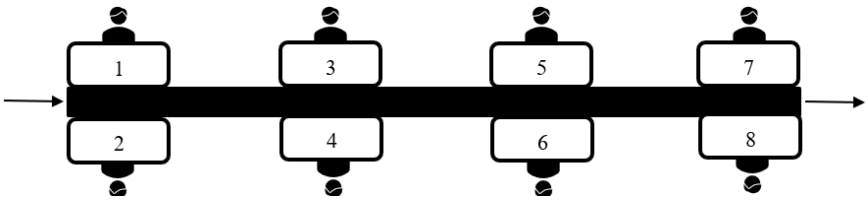
Şekil 2.4. U-tipi bir montaj hattı (Karaş'tan, 2020)

Paralel: Birden fazla birbirine paralel şekilde konumlandırılmış montaj hattının bulunduğu türü ifade eder (Şekil 2.5). Paralel hatlarda, tek modelli üretimin yanı sıra aynı ürüne ait farklı modellerin veya benzer ürünlerin üretimi gerçekleştirilebilir. Paralel hatların çevrim süreleri birbirinden farklı olabilir. Paralel hatlar; işgörenler arasındaki gözlenebilirliği ve iletişimi geliştirir, işgören ihtiyacını azaltır, boş bekleme sürelerini düşürür ve verimliliği artırır (Özcan vd., 2010). Talebin yüksek olduğu durumlarda sıklıkla karşılaşılan bu yerleşim düzeni, hat uzunluğunu kısaltmaya yardımcı olur. Herhangi bir iş istasyonunda bir sorun olduğunda tek bir hattın kapatılması yeterli olur. Bu yerleşim türünün dezavantajı, alet ve ekipman gereksiniminin yüksek olmasıdır (Gökçen vd., 2006).



Şekil 2.5. Paralel montaj hatları (Karaş'tan, 2020)

Çift taraflı: Hattın iki farklı tarafında işlemlerin gerçekleştirildiği versiyondur (Şekil 2.6). Karşılıklı olarak konumlandırılmış eş istasyonların bulunduğu bu hatlar, genellikle görevlerin bazılarının hattın yalnızca bir tarafında yapılmaya uygun olduğu büyük hacimli ürünlerin montajını gerçekleştirmek için kullanılır. Eş istasyonlardaki işgörenler, aynı ürün üzerinde eşzamanlı olarak farklı görevleri gerçekleştirir. İşgörenlerin aynı ürünün farklı taraflarındaki işlemleri gerçekleştirmek için sürekli yer değiştirmesine gerek kalmadığından, kurulum süreleri azalır ve bazı görevler daha hızlı bir şekilde tamamlanabilir. Hattın uzunluğu tek taraflı bir hatta göre daha kısa olabildiğinden dolayı işgörenlerin alet, parça veya ürün taşıma ihtiyacı azalır ve malzeme taşıma maliyetleri düşer. Eş istasyonlardaki işgörenler, aletleri veya fikstürleri paylaşabildiği için tasarruf sağlanabilir (Bartholdi, 1993).



Şekil 2.6. Çift taraflı bir montaj hattı (Karaş'tan, 2020)

2.2.3.6. Hattın kontrol yapısına göre sınıflandırma

Hattın kontrol yapısına göre montaj hatları, gecikmesiz ve gecikmeli olarak ikiye ayrılır. Gecikmeli hatlar, kendi içinde senkronize gecikmeli ve asenkronize gecikmeli olmak üzere iki grupta incelenir (Saif vd., 2014):

Gecikmesiz: Gecikmesiz hatlarda, tüm iş istasyonları aynı çevrim süresine sahiptir. Her bir çevrim sonunda, parçalar bir sonraki istasyona aktarılır. Bu sistemlerde, konveyörün hareketi çevrim süresine eşittir ve bazı istasyonlar kendilerine atanan görevleri çevrim süresi dolmadan tamamlayabilir. Bu tür hatlarda, tampon stok bulunmaz ve tüm görevlerini çevrim süresinden önce tamamlayan istasyonlarda boş zamanlar meydana gelir. Montaj hattının çevrim süresi, iş yükü en büyük olan istasyonun yüküne eşit olur.

Gecikmeli: Gecikmesiz montaj hatlarının aksine, gecikmeli hatlarda görevlerini tamamlayan istasyonlardaki parçalar, çevrim süresini beklemeksizin bir sonraki istasyona aktarılmaktadır. Senkronize gecikmeli montaj hatlarında, tüm iş istasyonları parçalarını aynı anda bir sonraki istasyona iletir. Bu sistemlerde, istasyonlar sabit bir zaman aralığı sonunda parçaları ilerlettiğinden, istasyonlar arasında tampon stok bulunmaz. İşlem sürelerinin deterministik olduğu durumlarda, bu sistemler gecikmesiz montaj hatlarına benzer şekilde çalışır. Öte yandan, asenkronize gecikmeli montaj hatlarında her istasyonun çevrim süresi, kendi iş yüküne bağlı olarak farklılık gösterebilir. Bu sistemlerde, bir istasyonda görevler tamamlandığında bir sonraki istasyonun hala işini tamamlamamış olması olasıdır. Böyle bir durumda, ilgili istasyon bir sonraki istasyon uygun hale gelene kadar beklemek zorunda kalır. Benzer şekilde, bir istasyon görevlerini bitirdiğinde önceki istasyonun henüz parçasını iletmemiş olması mümkündür. Bu tür beklemelerin sistem performansını olumsuz etkilemesini önlemek amacıyla boş bekleme sürelerini azaltacak şekilde tampon stok uygulamalarına başvurulabilir.

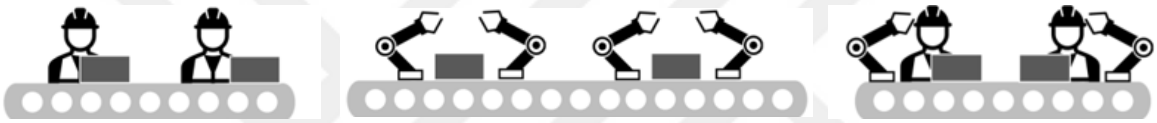
2.2.3.7. Otomasyon seviyesine göre sınıflandırma

Otomasyon seviyesinde göre MHD problemleri, görevleri gerçekleştiren işgörenlerin türü baz alınarak manuel, robotik ve iş birlikçi olmak üzere üç sınıfa ayrılabilir (Şekil 2.7).

Manuel: Görevlerin, istasyonlara atanmış olan işçiler tarafından gerçekleştirildiği hatlardır. Bu hatlarda, bazı işçiler belirli işlemler konusunda yetenekli veya yeteneksiz olabilir.

Robotik: İş istasyonlarında tam otomasyonun sağlandığı hatlardır. Bu hatlarda, montaj görevleri robotlar tarafından gerçekleştirilir.

İş birlikçi: İnsan ve robot işgörenlerin montaj hattında birlikte görev aldığı türdür. Bu hatlarda, manuel ve otomatik hatların farklı avantajlarından yararlanmak ve olası dezavantajlarını ortadan kaldırarak heterojen iş gücüne sahip bir üretim ortamı elde etmek amaçlanmaktadır. Farklı işgören türlerinin yer aldığı bu problem türünde, insanın ve robotun etkileşim şekline ve düzeyine yönelik farklı versiyonlar görülebilir.



(Manuel) (Robotik) (İş birlikçi)

Şekil 2.7. Montaj hatlarında farklı işgören türleri (Barravecchia vd.'den, 2023)

2.2.3.8. Kurulum sıklığına göre sınıflandırma

Kurulum sıklığına göre MHD problemleri, ilk kez dengeleme ve yeniden dengeleme olarak ikiye ayrılır.

İlk kez dengeleme: Yeni bir montaj hattının inşası aşamasında, üretim süreçlerinin henüz tam olarak netleşmediği veya test edilmediği durumlar söz konusu olabilir. Bu senaryoda, yalnızca üretilecek ürünün spesifik özellikleri ve varyasyonları belirlenmiştir. Montaj hattının tasarımı, ürün gereksinimleri doğrultusunda gerçekleştirilir. Bu süreçte, görevler arasındaki öncelik ilişkileri tespit edilir ve alternatif üretim yöntemleri değerlendirilir. Çeşitli makine ve işçi performanslarının yanı sıra maliyet faktörleri de analiz edilerek en düşük maliyetli hat kurulumu amaçlanır (Boysen vd., 2008).

Yeniden dengeleme: Mevcut durumda dengede olan bir sistemin çeşitli faktörlere bağlı olarak dengesinin bozulması durumunda yeni koşullara göre yeniden dengelenmesi gerekir. Gerçek hayat uygulamalarında sıklıkla meydana gelen değişimler, hattın dengesini etkiler

ve yeniden dengeleme ihtiyacını ortaya çıkarır. Hatların yeniden dengelenmesinin ilk dengenin bulunmasından ayrıştığı nokta; yeni denge durumunun, başlangıç durum göz önünde bulundurularak mümkün olan en az değişiklikle ya da değişiklik düzeyini belirli bir sınırın altında tutacak şekilde belirlenmeye çalışılmasıdır.

2.2.4. İş Birlikçi Montaj Hatları

MHD probleminde, görevlerin iş istasyonlarına iş yükü açısından dengeli bir şekilde atanması ve bu sayede istasyonlar arasındaki hız farklarının mümkün olduğunca azaltılması amaçlanmaktadır. Ancak, görevlerin yalnızca işlem sürelerini dikkate alarak toplam yükün düzgün dağılması tek başına yeterince anlam ifade etmeyebilir. İşlem süreleri eşit olan görevler birbirinin aynısı olmayacağından, zorlayıcılık düzeyleri de farklılık gösterebilir. Bu durum, gerçek hayat uygulamalarında büyük önem taşır. Özellikle, emek yoğun çalışılan montaj hatlarında, benzer işlerin tekrarlı olarak uzun süre yapılması sonucunda işçiler üzerindeki zorlanma etkisi giderek artmaktadır. Montaj hatlarının ergonomik açıdan uygun tasarlanmaması, verimlilik kayıplarına ve işçilerin meslek hastalıklarına yakalanmasına yol açabilir (Baykasoğlu ve Akyol, 2014). Dolayısıyla, işçilerin maruz kaldıkları ergonomik yükleri belirli bir düzeyin altında tutmak, insan sağlığı ve sistemin performansı açısından önem teşkil etmektedir (Çimen vd., 2022).

Gelişen teknoloji, çalışma ortamlarında insanlar üzerindeki olumsuz etkilerin azaltılmasına yönelik yenilikçi çözümler sunmaktadır. Bu çözümlerin başında, Endüstri 4.0 doğrultusunda üretim süreçlerinin otomatikleştirilmesi gelmektedir. Dördüncü sanayi devrimi ile yorulmadan ve kesintisiz çalışabilme yetisine sahip robotlar, montaj sistemlerinde de önemli bir yer edinmiştir.

Robotik montaj sistemlerinde; nesnelerin interneti, bulut bilişim ve yapay zeka teknolojileri aracılığıyla robotik iş istasyonlarında veri toplanmakta ve analiz edilmektedir. Akıllı fabrikalar, bu verileri gerçek zamanlı olarak üretim sistemini optimize etmek amacıyla otonom karar verme süreçlerinde kullanmaktadır. Bu sistemler, geniş ürün yelpazelerine verimli biçimde yanıt verebilmek için üretim kaynaklarının yeniden yapılandırılmasına olanak tanımaktadır. Teknik kazanımların ötesinde, otomatik sistemlerin işletmelerin sürdürülebilirliği açısından stratejik bir rol oynadığı vurgulanmaktadır (Chutima, 2020).

Teknolojik gelişmelerle birlikte robotlar, günümüzde çok sayıda nesnenin montajında etkili bir şekilde kullanılabilir hale gelmiştir. Ayrıca, yüksek düzeyde otomatikleştirilmiş montaj hatları; güvenilirlik, kullanılabilirlik, üretkenlik, ürün kalitesi, performans ve düşük maliyet gibi çeşitli açılardan önemli avantajlar sunmaktadır. (Nilakantan ve Ponnambalam, 2016).

Robotlar, standartlaştırılmış süreçlerin yürütülmesi, insan hatalarının önlenmesi ve tehlikeli ortam koşullarında çalışma gibi konularda önemli katkılar sunsa da eleştirel düşünme ve problem çözme becerisi gerektiren durumlarda yetersiz kalmaktadır. Özellikle, ürünlerin kişiselleştirilmesi ve özelleştirilmesi gibi esneklik gerektiren üretim süreçlerinde insan rehberliğine ihtiyaç duyulmaktadır (Maddikunta vd., 2022). İnsanlar, robotlara nazaran üretim sürecinde ortaya çıkabilecek belirsizliklere ve değişkenliklere karşı daha esnek bir yapıya sahiptir. Bu nedenle, insan ve robot iş gücünün birbirini tamamlayan avantajları olduğu kabul edilmektedir.

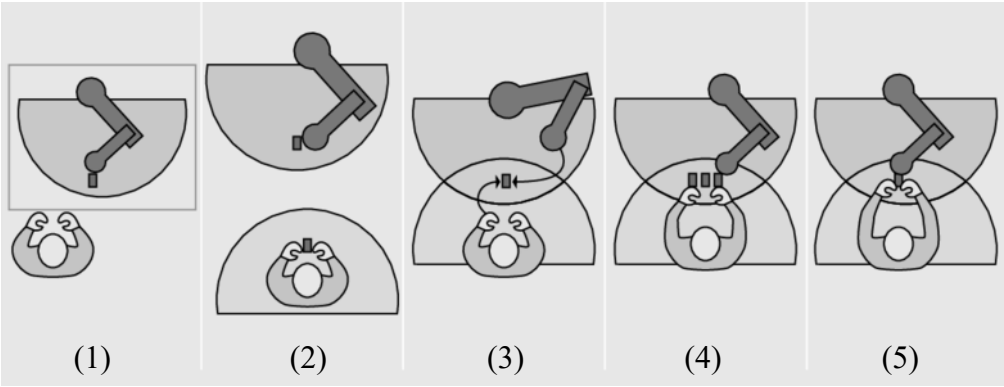
İnsan merkezli, sürdürülebilir ve dayanıklı üretim sistemlerinin önemini vurgulayan Endüstri 5.0'ın temel hedeflerinden biri, insanların ve robotların etkileşim halinde çalışabileceği üretim ortamlarının geliştirilmesidir. Bu kapsamda, insan-robot iş birliğinin etkin bir şekilde yönetilmesi, yalnızca üretkenliğin artırılması açısından değil; iş gücü verimliliği, süreç esnekliği, sistem adaptasyonu ve ergonomik koşulların iyileştirilmesi açısından da kritik öneme sahiptir (Maddikunta vd., 2022).

İnsanların yaratıcı düşünme, sezgisel karar alma ve ani durumlara esnek biçimde tepki verebilme yeteneklerinin; robotların yüksek hassasiyet, tekrar edilebilirlik ve uzun süreli kesintisiz çalışabilme kapasiteleriyle birleştirilmesi, üretim süreçlerinde önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu doğrultuda, MHD literatüründe de son yıllarda insanların ve robotların birlikte görev aldığı iş birlikçi montaj hatlarının optimizasyonuna yönelik araştırmalarda önemli bir artış olduğu gözlemlenmektedir. Bu çalışmalar, modern üretim sistemlerinde insan-robot etkileşiminden yararlanma konusunda yeni yaklaşımlar sunmaktadır.

2.2.4.1. İş birlikçi robotların temel özellikleri

Otomasyon ve robotik alanındaki hızlı gelişmeler, insanların robotlarla birlikte çalışmasını giderek daha önemli hale getirmiştir. Yapay zeka ve akıllı teknolojilerin hızla ilerlemesi, hesaplama kapasitesine sahip tüm cihazların daha zeki hale gelmesine ve "kobot" olarak adlandırılan yeni nesil kollaboratif yani iş birlikçi robotların ortaya çıkmasına neden olmuştur. İlk kobotlar, 1996 yılında Northwestern Üniversitesi'nden Profesör Edward Colgate ve Michael Peshkin tarafından geliştirilmiştir. İlk nesil kobotlar motor içermeyen, pasif çalışan ve fren mekanizmaları barındıran sistemler iken günümüz kobotları ise geleneksel endüstriyel robotlardan farklı olarak koruyucu kafeslere ihtiyaç duymadan insanlarla güvenli bir şekilde çalışabilme imkanı sunmaktadır. Kobotlar, gelişmiş sensör sistemleri sayesinde beklenmedik çarpışmaları algılayabilme ve bir engel tespit ettiğinde otomatik olarak durarak iş güvenliğini önemli ölçüde artırabilme yeteneğine sahiptir (Correia Simões vd., 2020: Maddikunta vd.'den (2022)). Endüstri 5.0'ın insan merkezli üretim anlayışı, insanların ve kobotların uyum içinde çalışmasını sağlamakta ve kurumsal sosyal ağlar aracılığıyla kişiselleştirilebilir otonom üretimi mümkün kılmaktadır (Maddikunta vd., 2022). Bu bağlamda, rutin ve yoğun iş gücü gerektiren görevler kobotlar tarafından üstlenilirken; insanların yaratıcılık, özelleştirme ve eleştirel düşünme gerektiren süreçlerde rol alması hedeflenmektedir. Bu iş birliği, insan yeteneklerinin verimliliğini artırırken, bireyler ve küçük işletmeler için otomasyonu daha erişilebilir bir hale getirmektedir (Correia Simões vd., 2020: Maddikunta vd.'den (2022)).

Bauer vd. (2016), çalışma ortamlarında insanların ve kobotların etkileşim türlerini beşe ayırmıştır. Şekil 2.8'de birinci sıradaki görselde, kobotun bir kafes içinde yer aldığı ve insanın çalışma ortamıyla fiziksel olarak ayrıldığı görülmektedir. İkinci sıradakinde, işgörenlerin aynı çalışma ortamında bulunmasına karşın birbiriyle temas halinde olmadan farklı iş parçaları üzerinde çalıştıkları bir etkileşim türü ifade edilmektedir. Üçüncüde, işgörenler aynı çalışma ortamında aynı iş parçası üzerinde sıralı olarak çalışmaktadır. Dördüncü etkileşim türünde, işgörenler aynı çalışma ortamını paylaşırken paralel şekilde farklı iş parçaları üzerinde görev yapmaktadır. Sonuncu tür, insanın ve kobotun en yakın etkileşimini ifade etmektedir. Bu türde, iki işgören eşzamanlı olarak aynı ortamda aynı görevi iş birliği içinde gerçekleştirmektedir.



Şekil 2.8. Çalışma ortamında insanın ve kobotun etkileşim türleri (Bauer vd.'den, 2016)

Küresel kobot pazar payının 2024 yılında 1,9 milyar ABD doları değerinde olduğu açıklanmıştır. Bu payın, 2030 yılına kadar 11,8 milyar ABD dolarına ulaşacağı tahmin edilmektedir. Bu artış; kobotların geleneksel endüstriyel robotik sistemlere kıyasla daha yüksek yatırım getirisi sağlaması, e-ticaret ve lojistik sektöründe artan talep, farklı büyüklükteki işletmelere sunduğu önemli faydalar ve kolay programlanabilme özelliği gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır (Pazar Araştırma Raporu, 2024).

Endüstri 5.0'da kobotların temel rolü, üretkenliği artırarak insanlar ve makineler arasında daha güçlü bir iş birliği modeli oluşturmaktır. Kobotlar, iş güvenliğini ve operasyonel verimliliği artırırken, insanlar için daha yaratıcı ve stratejik görevler üstlenme fırsatı yaratmaktadır. Kobotlar sayesinde insanların iş tatmini gelişmekte ve işletmelerin üretkenliklerini yükseltme potansiyeli artmaktadır. İş dünyasının, kobotların yalnızca iş süreçlerini optimize etmekle kalmayıp, aynı zamanda rekabetçi piyasalarda yükselen iş gücü maliyetlerini azaltmaya yardımcı olduğunu fark etmesi gerekmektedir (Maddikunta vd., 2022).

Belirli bir durumda kobotların uygulanmasına ilişkin karar, işletmenin hedeflerine bağlıdır. Endüstride kobotları kullanmanın temel amaçlarından biri, insanların çalışma esnasında rahatsız edici pozisyonlarda kalmaları gereken durumlarda destek sunarak ergonomik açıdan fayda sağlamaktır. İnsan ve kobot etkileşimi sayesinde üretim hedefleri daha az insan çabasıyla karşılanabilir hale geldiğinden, kobotların insanların çalışma koşullarının iyileştirilmesi açısından olumlu etkisi bulunmaktadır (Karaulova vd., 2019). Bu tür bir etkileşim ile insanlarda fiziksel strese neden olan, manuel ve tekrarlayan görevlerin olumsuz etkileri hafifletilebilmektedir (Chutima, 2020).

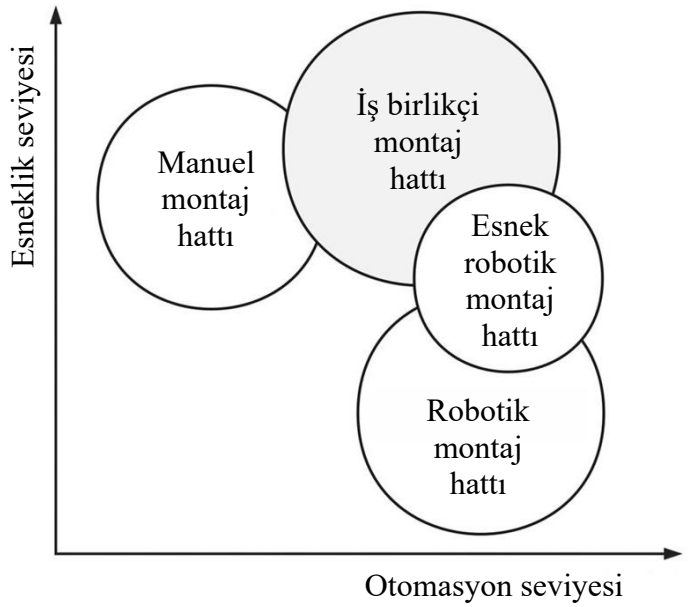
Kobotlar, yeni kullanıcıların çalışmanın temellerini kolayca kavramasına olanak tanıdığı için imalat sektöründe uygulama alanı bulmaktadır. Kobotların doğruluk, hız, erişim ve malzeme taşıma açısından sunduğu avantajlar sayesinde işlem sürelerini kısalttığı bilinmektedir (Pazar Araştırma Raporu, 2018: Karaulova vd.'den (2019)). İnsan-robot iş birliği sayesinde işlem süreleri kısaldığından dolayı manuel ve otomatik üretim sistemlere kıyasla artan verimlilik ve etkinlik sayesinde çeşitli kazanımlar elde edilmesi mümkündür (Chutima, 2020).

2.2.4.2. Manuel montaj hatlarından iş birlikçi sistemlere geçiş

Giderek çeşitlenen üretim pazarı, montaj sektörünü kısalan ürün yaşam döngüleri ve artan üretim hacmi gibi zorluklarla karşı karşıya bırakmaktadır. Bu durum, imalat yapan işletmelerin montaj hatlarında özelleştirilmiş üretim süreçlerini benimsemesini zorunlu kılmaktadır. Ancak, bu süreç yüksek esneklik ve değişkenlik gerektirdiğinden geleneksel montaj hatları bu talepleri karşılamakta yetersiz kalmaktadır (Asadi vd., 2017: Tian vd.'den (2024a)). Bu noktada, Endüstri 5.0'ın insan-robot iş birliği vizyonu; montaj hatlarının verimliliğini, esnekliğini ve yeniden yapılandırılabilirliğini arttırırken, manuel veya robotik montaj hatlarının olası dezavantajlarını ortadan kaldırmayı amaçlayan melez üretim ortamlarının ortaya çıkmasını sağlamıştır (Nourmohammadi vd., 2022a).

Değişen tüketici talepleri, işletmelerin kitlesel üretimin verimliliğini sürdürürken montaj hattındaki ürünlerini çeşitlendirme zorunluluğunu beraberinde getirmektedir. Montaj hatları, manuel sistemlerden tam otomatik robotik sistemlere kadar farklı otomasyon seviyelerini içerecek şekilde sürekli olarak geliştirilmektedir. Ancak, tam otomatik sistemler düşük esneklikleri nedeniyle özelleştirilmiş üretim gereksinimlerini karşılamakta yetersiz kalmaktadır. Bu durum, üreticileri daha karmaşık üretim modelleri geliştirmeye zorlamakta ve beraberinde işletme maliyetlerinin artışını getirmektedir (Otto ve Li, 2020: Tian vd.'den (2024a)). Bu zorlukların üstesinden gelmek için bazı montaj hatları, esnek robotik montaj hatlarına dönüşmeye başlamış ve bilgisayarlı sayısal kontrollü (CNC) makineler bu süreçte montaj hatlarına entegre edilmiştir. Teknik personel, CNC makinelerini önceden programlayarak özelleştirilmiş üretim gereksinimlerini karşılayabilmektedir. Ancak, bu sistemlerde işgörenlerin özel programlama becerilerine sahip olması gerekmektedir. Buna ek olarak, CNC makinelerinin uzun konfigürasyon süresi, geniş ürün yelpazesine sahip

üretim senaryoları için uygun değildir. Bu kısıtlar, esnek robotik sistemlerden iş birlikçi montaj hatlarına geçişin önünü açmıştır. İş birlikçi hatlar, özelleştirilmiş üretim trendlerine uygun, yenilikçi ve yüksek esneklik sunan bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. İnsan-robot iş birliği, montaj hatlarının yeniden yapılandırılmasını kolaylaştırarak dinamik pazar taleplerine daha hızlı uyum sağlama imkanı sunmaktadır (Hashemi-Petroodi vd., 2021: Tian vd.'den (2024a)). Şekil 2.9, esneklik ve otomasyon seviyeleri açısından manuel, robotik, esnek robotik ve iş birlikçi montaj hatlarını karşılaştırmaktadır.



Şekil 2.9. Esneklik ve otomasyon seviyesi açısından montaj hatları (Tian vd.'den, 2024a)

Günümüzde, pek çok işletme üretim sistemlerine kobotları entegre etmeyi değerlendirmektedir. Ancak, bu teknolojinin giderek artan kabulüne rağmen özellikle küçük ve orta ölçekli işletmeler arasında benimsenmesini engelleyen bazı tereddütler mevcuttur. Literatürde, kobotların benimsenmesindeki engeller ve bariyerler izleyen şekilde sınıflandırılmıştır (Mahbub, 2008; Stief vd., 2018; Aaltonen ve Salmi, 2019; Davila Delgado vd., 2019; Correia Simões vd., 2020: Montini vd.'den (2024)):

Ekonomik engeller: Kobotların edinimi, kurulumu ve bakımına ilişkin finansal maliyetler, özellikle potansiyel faydalarından emin olmayan şirketler için yatırımı haklı çıkarmayı zorlaştırabilir.

Metodolojik engeller: Kobotların mevcut iş akışlarına entegrasyonu için yerleşik yöntemlerin ve en iyi uygulamaların eksikliği, istenen sonuçlara ulaşmada sorunlara yol açabilir.

Bilgi engelleri: Kobotların yetenekleri ve sınırlamaları hakkındaki bilgi ve uzmanlık eksikliği, teknolojinin verimli kullanımını engelleyerek tam potansiyelinin gerçekleştirilmesini önleyebilir.

Kültürel engeller: Özellikle iş kaybı endişesi taşıyan çalışanlar arasında, değişime direnç ve yeni teknolojileri benimseme isteksizliği söz konusu olabilir.

Teknolojik engeller: Kobotların mevcut iş akışlarına ve sistemlere entegrasyonu bazı teknik zorluklar içermektedir. Bu zorluklar arasında uyumluluk sorunları, yazılım ve donanım sınırlamaları ile teknolojinin kurulumu ve bakımı için uzmanlık gereksinimi gibi faktörler bulunmaktadır.

Diğer engeller: Diğer kategorilere uymayan çeşitli engelleri kapsamaktadır.

Engellerin niteliği farklılık gösterse de, çoğunun kobotların temel kavramlarına, en uygun kullanım alanlarına, ihtiyaç ve faydaların nasıl belirleneceğine ve bu sistemleri destekleyen unsurlara ilişkin bilgi eksikliğinden kaynaklandığı görülmektedir. Ayrıca, bazı engellerin varlığı sadece robotun benimsenmesine değil, uygulama alanlarına da bağlıdır. İşletmeler, bu engelleri değerlendirmek ve aşmak için net bir metodolojiye ihtiyaç duymaktadır (Montini vd., 2024).

İş birlikçi montaj hatlarının mevcut geleneksel sistemlere entegrasyonu, dengeleme süreçlerini önemli ölçüde karmaşıklaştırmaktadır. Bu durumun temel nedenlerinden biri, endüstriyel uygulayıcıların maliyetleri azaltmak amacıyla mevcut montaj hatlarını tamamen yeni sistemlerle değiştirmek yerine melez bir yaklaşımı tercih etmeleridir. Melez model, mevcut montaj hatlarına iş birlikçi bileşenler ekleyerek veya robot destekli sistemlere iş birlikçi iş istasyonları entegre ederek hem esneklik ve özelleştirme imkanı sunmakta hem de maliyet avantajı sağlamaktadır (Sadrfaridpour vd., 2016; Malik ve Bilberg, 2019: Tian vd.'den (2024a)). Ancak, bu melez uygulama; montaj hatlarının yapılandırma, yeniden

yapılandırma ve dengeleme süreçlerini daha da zorlaştırmaktadır (Sadrfaridpour vd., 2016: Tian vd.'den (2024a)). Ayrıca, montaj hattındaki iş gücü becerilerinin çeşitliliği ve karmaşıklığı, görev-iş istasyonu işgören-iş istasyonu atama stratejilerinin geliştirilmesini güçleştirmektedir (Tian vd., 2024a).

Endüstri 5.0'ın insan-robot iş birliğine dayalı vizyonunun sunduğu olanaklardan etkin biçimde faydalanılabilmesi, mevcut kaynakların verimli bir şekilde kullanılmasıyla mümkündür. Ancak, işletmelerin mevcut sistemlerini bu dönüşüme yönelik olarak uyarlama konusunda yeterli düzeyde bilgi birikimine sahip olmadığı görülmektedir. Teorik bilgi eksikliği nedeniyle, uygulamaya yönelik girişimler henüz başlangıç aşamasındadır. Bu tez çalışmasında, Endüstri 5.0 çerçevesinde öne çıkan insan-robot iş birliği vizyonu doğrultusunda, manuel olarak işletilen montaj hatlarından iş birlikçi yapılara geçiş süreci ele alınmakta ve bu bağlamda endüstriyel uygulayıcılara yönlendirici katkılar sunulması hedeflenmektedir. Bu amaçla, bir MHD problemi uzantısı olarak İR-MHYD problemi önerilmektedir.

İR-MHYD problemi, yalnızca işçilerin yer aldığı mevcut durum temel alınarak, montaj hattına robotların ve kobotların işgören olarak entegre edilmesini sağlamak üzere hattın iş gücü yapısının yeniden yapılandırılmasını kapsamaktadır. Söz konusu problem, Bölüm 2.2.3'te sunulan MHD problemlerine ilişkin sınıflandırma ölçütleri dikkate alınarak Çizelge 2.2'deki gibi kategorize edilebilir.

Çizelge 2.2. Önerilen problemin farklı özellikler bakımından sınıflandırılması

Sınıflandırma ölçütü	Problem türü
Varsayım özelikleri	GMHD
Amaç sayısı	Tek amaçlı
Model sayısı	Tek modelli
İşlem sürelerinin doğası	Deterministik
Yerleşim şekli	Düz
Kontrol yapısı	Gecikmesiz
Otomasyon seviyesi	İş birlikçi
Kurulum sıklığı	Yeniden dengeleme

2.3. Hiper-Matsezgisel Yaklaşım

Hiper-matsezgisel algoritmalar, optimizasyon problemlerine çözüm üretmek amacıyla hiper-sezgisel ve matsezgisel yaklaşımların bütünleştirilmesiyle ortaya çıkan yenilikçi yöntemleri temsil etmektedir. Bu melez yöntem, her iki yaklaşımın güçlü yönlerini bir araya getirerek, karmaşık optimizasyon problemlerine daha kaliteli çözümler sunmayı amaçlamaktadır.

İzleyen alt bölümlerde, hiper-matsezgisel algoritmaların temel bileşenleri olan hiper-sezgisel ve matsezgisel yaklaşımların yapısal özelliklerine, çalışma prensiplerine ve sınıflandırma ölçütlerine dair bilgiler sunulmaktadır.

2.3.1. Hiper-sezgisel algoritmalar

Metasezgisel algoritmalar, kesin yöntemlerle çözülmesi güç olan karmaşık optimizasyon problemleri için makul süreler içerisinde yüksek kaliteli yaklaşık çözümler elde etmeye yönelik yaklaşımlardır. Stokastik yapıları nedeniyle optimal çözümü garanti etmeyen bu yöntemler, karmaşık problemler için güçlü birer araç olsalar da büyük boyutlu problemlerde etkinliklerini artırma, teorik temellerini güçlendirme ve keşif-sömürü dengesini iyileştirme gibi konularda geliştirilmeye açıktır (Rajwar, vd., 2023).

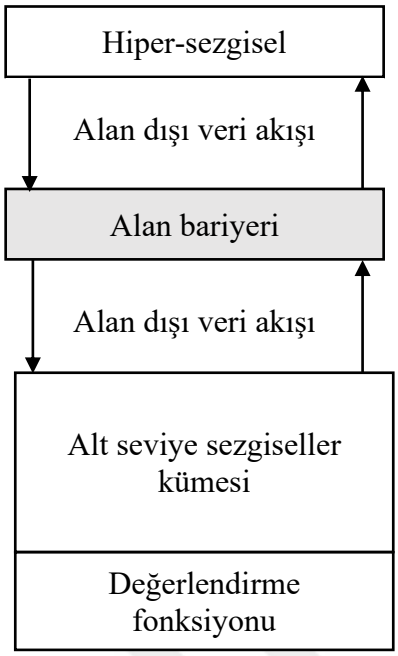
Farklı problem alanlarına uygulanabilecek genel bir çözüm çerçevesi sunan metasezgisel algoritmaların başarısı, kullanıcı tarafından tanımlanan operatörlere ve problem alanına en uygun alternatiflerin uzman bilgisiyle belirlenmesine bağlıdır. Hiper-sezgisel algoritmalar, metasezgisellerin bu tür bağımlılıklarını ortadan kaldırmayı hedefleyen yaklaşımlar olarak ortaya çıkmıştır (Özcan vd., 2008).

Hiper-sezgisel kavramı, literatürde ilk kez otomatik teorem ispatı alanında farklı yapay zeka tekniklerini birleştiren bir protokolü tanımlamak amacıyla kullanılmıştır (Denzinger vd., 1997). Bu kavram, daha sonra Cowling vd. (2001) tarafından kombinatoryal optimizasyon problemlerinde sezgisel yöntemlerin seçimini otomatikleştiren yaklaşımlar olarak ifade edilmiştir (Burke vd., 2010). Hiper-sezgisel yaklaşımın tanımı günümüzde, hesaplamalı arama problemlerine çözüm üretmek için sezgisel yöntemlerin seçimi veya

üretimi amacıyla kullanılan arama algoritmaları veya öğrenme mekanizmaları olarak genişletilmiştir. Bu yaklaşımların temel ayırt edici özelliği, ele alınan problemin çözüm uzayını doğrudan aramak yerine sezgisel yöntemlerin veya sezgisel bileşenlerin arama uzayında işlem yapmalarıdır (Burke vd., 2013).

Hiper-sezgiseller, genellikle belirli bir problem veya dar bir problem sınıfı için özelleştirilmiş çözümler üreten metasezgisellerden farklı olarak belirli bir bağlamda en uygun sezgiseli veya algoritmayı akıllıca seçmeye odaklanır. Bu açıdan bir hiper-sezgisel, bir (meta)sezgisel olabilir ve (meta)sezgiseller üzerinde işlem yapabilir. Başka bir deyişle, hiper-sezgiseller tipik metasezgisellere kıyasla daha üst bir seviyede çalışır. Bu nedenle, hiper-sezgiseller alt seviye (meta)sezgiseller üzerinde işlem yapan bir (meta)sezgisel olarak düşünülebilir (Burke vd., 2003). Bir hiper-sezgisel, zor optimizasyon problemlerinin çözümü için komşuluk yapıları veya metasezgiseller gibi alt seviye sezgisellerin veya sezgisel bileşenlerin arama uzayını araştıran yüksek seviyeli otomatik bir arama metodolojisi olarak da açıklanabilir (Drake vd., 2020). Hiper-sezgiseller, literatürde üst sezgiseller olarak da bilinmektedir.

Şekil 2.10, hiper-sezgisellerin genel çalışma mekanizmasını göstermektedir. Hiper-sezgisel mimaride, alt seviye sezgiseller ile hiper-sezgisel arasında belirgin bir alan bariyeri bulunur. Bu bariyer, alan bilgisinin sezgisellerle etkileşimini kısıtlayarak hiper-sezgiselin problem alanından bağımsız çalışmasını sağlar. Hiper-sezgisel, problemin doğası hakkında herhangi bir ön bilgiye sahip değildir ve sadece kendisine sunulan belirli sayıda alt seviye sezgiselden hangilerini çağıracağına ve değerlendirme fonksiyonundan elde edilen çözüm sonuçlarını nasıl yorumlayacağına karar verir. Bu çerçevede, hiper-sezgiselin erişebildiği tek bilgi, problem alanından bağımsız ve genel geçer nitelikteki verilerdir. Örneğin, hiper-sezgisel; bir sezgiselin son çağrıldığında tükettiği işlemci süresini, amaç fonksiyonunda meydana gelen değişimleri veya bir sezgiselin ne kadar süredir çağrılmadığını takip edebilir. Esas nokta, hiper-sezgiselin alt seviye sezgisellerin işlevselliği hakkında bilgi sahibi olmamasıdır. Hiper-sezgisel, değerlendirme fonksiyonunda en büyük iyileşmeyi sağlayan sezgiseli, en hızlı çalışan sezgiseli veya en uzun süredir çağrılmayan sezgiseli çağırabilir veya bu faktörleri ve diğer ilgili değişkenleri dengeleyerek daha karmaşık bir karar mekanizması uygulayabilir (Burke vd., 2003).



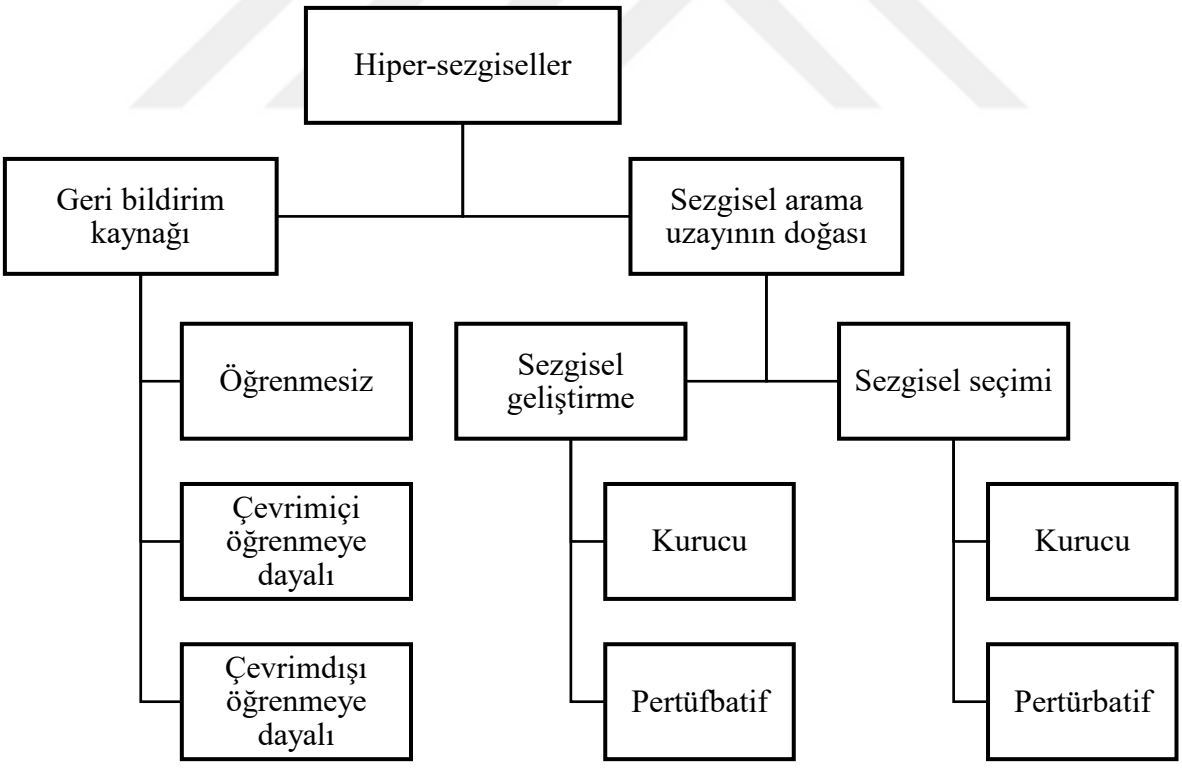
Şekil 2.10. Hiper-sezgisellerin çalışma mekanizması (Burke vd.'den, 2003)

Burke vd. (2010), hiper-sezgisel yaklaşımların sınıflandırılması için sezgisel arama uzayının yapısı ve öğrenme sürecinde kullanılan geri bildirim kaynağı olmak üzere iki temel kategori önermiştir (Şekil 2.11).

Öğrenme sürecinde kullanılan geri bildirim kaynağına göre hiper-sezgiseller; öğrenmesiz, çevrimiçi öğrenmeye dayalı ve çevrimdışı öğrenmeye dayalı olmak üzere üç gruba ayrılır. Öğrenmesiz hiper-sezgisellerde geri bildirim kullanılmazken, öğrenmeye dayalı hiper-sezgisellerin arama sürecinden elde edilen geri bildirimlerin kullanımı yoluyla öğrenme yeteneği bulunur. Çevrimiçi öğrenmeye dayalı hiper-sezgisellerde, öğrenme süreci bir problem örneğini çözerken gerçekleşir. Bu yaklaşımda, üst seviye strateji, uygulanacak en uygun alt seviye sezgiseli belirlemek için probleme özgü yerel özellikleri kullanabilir. Hiper-sezgisel yaklaşımlar içinde çevrimiçi öğrenme yöntemlerine örnek olarak sezgisel seçiminde pekiştirmeli öğrenme kullanımı ve sezgisel arama uzayında metasezgisellerin uygulanması gösterilebilir. Çevrimdışı öğrenmeye dayalı hiper-sezgisellerin temel amacı, eğitim verilerinden elde edilen kural veya programlar aracılığıyla bilgi toplayarak, bu bilgilerin görülmemiş problem örneklerinin çözümüne genelleştirilmesini sağlamaktır. Hiper-sezgisel yaklaşımlar içinde çevrimdışı öğrenme yöntemlerine örnek olarak öğrenen sınıflayıcı sistemler, vaka tabanlı akıl yürütme ve genetik programlama verilebilir (Burke vd., 2010; Burke vd., 2013).

Arama uzayının yapısına göre hiper-sezgiseller, sezgisel seçimi ve sezgisel geliştirme olmak üzere iki ana kategoride incelenmektedir. Sezgisel seçimi, mevcut sezgisel yöntemlerin seçimini veya uygulanmasını içermektedir. Sezgisel geliştirme ise sezgisel yöntemlerin bileşenlerinden yeni sezgisellerin oluşturulmasını ifade etmektedir. Bu grupların her biri kendi içinde, kurucu alt sezgisellere ve pertürbatif alt sezgisellere dayalı olmak üzere ikiye ayrılabilir (Burke vd., 2013). Kurucu alt sezgiseller, bir çözümü sıfırdan kademeli olarak inşa etmek için kullanılırken, pertüfbatif alt sezgiseller ise mevcut çözümler üzerinde çalışır. Pertürbatif sezgiseller, önceden tanımlanmış komşuluk yapılarını kullanarak yerel arama işlemleri gerçekleştirir (Drake vd., 2020).

Alt seviye sezgiseller, genellikle takas, ekleme ve silme operatörleri ile yerel arama teknikleri kullanarak komşu çözüm uzayında arama yapan temel yöntemlerdir. Hiper-sezgiseller, metasezgiseller ve matsezgiseller gibi farklı yaklaşımları da alt seviye sezgiseller olarak kullanabilir (Dökeroğlu vd., 2024).



Şekil 2.11. Hiper-sezgisellerin sınıflandırılması

2.3.2. Matsezgisel algoritmalar

Kombinatoryal optimizasyon problemlerinin yapısı, çözüm süreçlerini zorlaştırmakta ve geleneksel optimizasyon teknikleri bu tip problemler için genellikle tatmin edici sonuçlar üretememektedir. Bu zorlukların üstesinden gelebilmek amacıyla matematiksel programlama ile sezgisel yöntemleri birleştiren ve matsezgisel adı verilen bir algoritma sınıfı geliştirilmiştir (Ngoo vd., 2024).

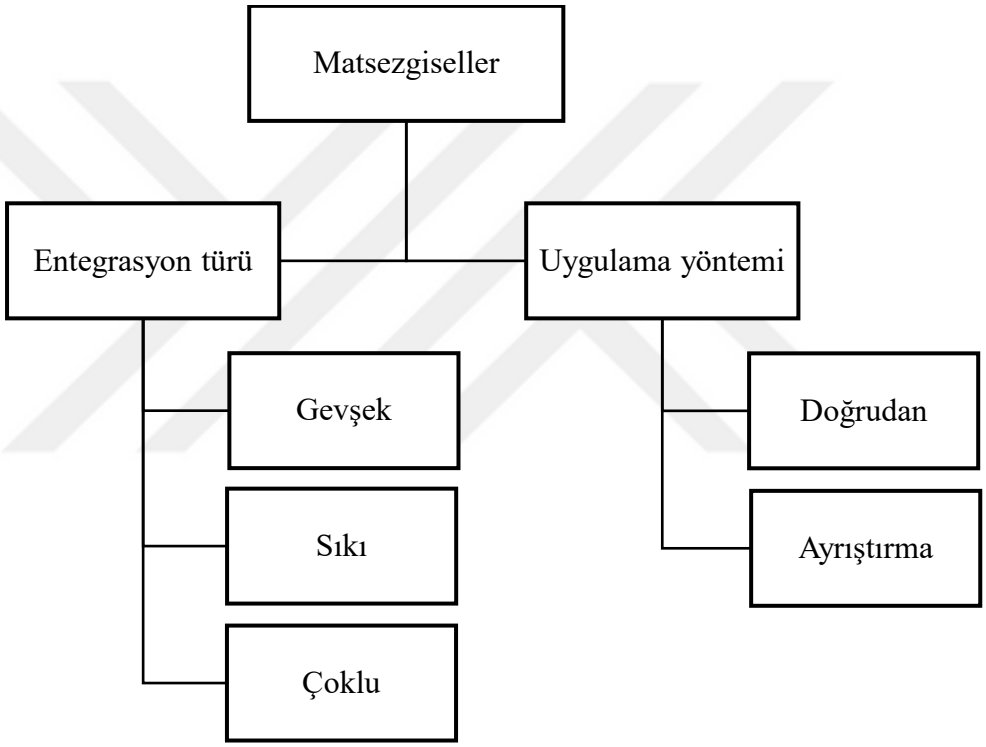
Matsezgisel yaklaşımlar, yüksek kaliteli çözümler üretmek amacıyla matematiksel programlama araçlarını kullanan, problemden bağımsız algoritmik çerçeveler olarak tanımlanabilir. Bu tanım, metasezgisel yaklaşımların daha genel tanımıyla örtüşmekle birlikte, matsezgisellerin çözüm sürecinin belirli aşamalarında kullanılan problem modeline dayalı matematiksel temellerini vurgular. Geleneksel metasezgisel algoritmaların tasarımında matematiksel modellere ve matematiksel programlama tekniklerine yeterli dikkatin verilmemesi, model tabanlı sezgisel yaklaşımlara odaklanma ihtiyacını doğurmuştur. Matsezgisel kavramı, ilk kez 2006 yılında İtalya'da düzenlenen bir çalıştayda ortaya çıkmıştır. Bu çalıştay, optimizasyon topluluğunun dikkatini bu araştırma alanına çekmeyi başarmıştır (Boschetti ve Maniezzo., 2024).

Matsezgiseller, temelini matematiksel programlama gibi matematiksel araçlardan alan sezgisel algoritmalardır. Bu algoritmaların yapısal genelliği, minimal uyarlamalarla farklı problem türlerine uygulanabilmelerini mümkün kılar. Bu yaklaşım, problem modellerinden türetilen bileşenlere sahip metasezgisel melezlerin geliştirilmesine olanak tanırken, matematiksel tekniklerin kendileri de genel sezgisel çözüm çerçeveleri oluşturabilir (Boschetti ve Maniezzo., 2022).

Matsezgisel yaklaşımlar, büyük ölçekli problem örneklerini optimuma yakın çözme amacını muhafaza ederken, matematiksel programlama formülasyonlarından etkin bir şekilde faydalanır ve aynı zamanda problemin özgün yapısal özelliklerini kullanır. Bu yaklaşımların, karma tamsayılı doğrusal programlama modellerinin çözümü için geliştirilen en son yazılımlardan yararlanabilme yetenekleri sayesinde optimizasyon alanında giderek daha fazla kabul görmesi ve başarıya ulaşması beklenmektedir. Matsezgiseller, matematiksel programlama formülasyonlarına dayandıkları için farklı problem türlerine kolaylıkla

uyarlanabilme esnekliğine sahiptir ve geleneksel sezgisel veya metasezgisel yöntemlere kıyasla daha sağlam çözümler üretebilir. Ek olarak, matsezgisel yaklaşımların uygulanması, metasezgisel algoritmaların tasarımına göre daha az uygulama çabası gerektirebilir (Archetti ve Speranza, 2014).

Ngoo vd. (2024), matsezgisel yaklaşımları entegrasyon türüne göre gevşek, sıkı ve çoklu olarak sınıflandırırken, uygulama yöntemine göre doğrudan ve ayrıştırma olmak üzere iki grupta incelemiştir. Şekil 2.12, matsezgisellerin sınıflandırılmasını ifade etmektedir.



Şekil 2.12. Matsezgisellerin sınıflandırılması

Gevşek entegrasyon türünde, kesin bir yöntem ile bir (meta)sezgisel yöntem ardışık şekilde çalıştırılmakta olup bu iki yaklaşım birbirinden bağımsız çözüm çerçeveleri içerisinde ele alınmaktadır. Bu yöntemler, birbiri içine geçirilmeden uygulanmakta ve uygulama kolaylığı nedeniyle literatürde yaygın biçimde tercih edilmektedir. Pratikte, genellikle matematiksel modeller aracılığıyla kesin bir yöntemle bir başlangıç çözümü üretilmekte, ardından bu çözüm sezgisel bir yöntemle iyileştirilmektedir. Alternatif olarak bu modeller, sezgisel yöntemlerle elde edilen çözümler üzerinde yerel optimizasyon amacıyla kullanılabilmektedir. Sıkı entegrasyon ise kesin bir yöntem ile (meta)sezgisel bir

yöntemin birbirine daha yakın ve iç içe geçmiş şekilde çalıştığı yapıları tanımlar. Bu entegrasyon türünde; kesin yöntem, sezgisel algoritmanın bir bileşeni olarak yerel arama amacıyla kullanılabilir veya sezgisel bileşen, çözüm sürecinin bir aşamasında çözüm kalitesini artırmak üzere matematiksel modele entegre edilebilir. Bu entegrasyon türünün uygulanması, farklı yöntemlerin tek bir çözüm çerçevesinde birleştirilmesini ve algoritmanın hassas biçimde yapılandırılmasını gerektirdiğinden gevşek entegrasyonlu matsezgisellerin uygulanmasına göre daha karmaşıktır. Çoklu entegrasyon, en az bir temel matsezgisel yaklaşımın bulunduğu ve birden fazla yöntemin bütünleştirildiği türü ifade eder. Bu yapı, genellikle her metodolojinin farklı bir amaca veya alt probleme odaklandığı yüksek karmaşıklığa sahip çok amaçlı problemlerde tercih edilir. Farklı çözüm yöntemlerinin entegre biçimde kullanılabilmesi, dikkatli bir koordinasyon ve senkronizasyon süreci gerektirir. Çoklu entegrasyon yaklaşımı, yüksek hesaplama maliyeti ve yapısal karmaşıklığı nedeniyle diğer türlere nazaran daha az tercih edilmektedir (Ngoo vd., 2024).

Uygulama yöntemine göre doğrudan yaklaşım, temel problem yapısında herhangi bir değişiklik yapılmaksızın problemin doğrudan çözülmesini esas alan, yaygın ve uygulaması nispeten kolay bir yöntemdir. Bu yaklaşım, sunduğu düşük yapısal karmaşıklık nedeniyle optimizasyon problemlerinin çözümünde araştırmacılar tarafından sıklıkla kullanılmaktadır. Doğrudan çözüm yaklaşımına dayalı matsezgisel algoritmalar, genellikle bütüncül ve entegre bir arama stratejisi gerektiren ve çözümünde yüksek düzeyde performans artışı hedeflenen problemler için uygundur (Ngoo vd., 2024). Ayrıştırma temelli metodolojiler, orijinal problemin çözüm karmaşıklığını azaltmak amacıyla daha küçük ve daha yönetilebilir alt problemlere bölünmesine dayanır. Bu alt problemler, birbirinden bağımsız biçimde ele alınır ve çözülür. Ardından, orijinal problem için geçerli bir çözüm, bu alt çözümlerin birleştirilmesiyle elde edilir. Bu alt problemlerin bir ya da birkaçı, matematiksel programlama temelli kesin çözüm yöntemleriyle çözülebilir. Ancak, büyük ölçekli problem örneklerinde hesaplama süresini sınırlamak amacıyla zaman kısıtlaması uygulanması gerekebilir. Ancak, bu durum, elde edilen çözümlerin optimal olmamasına neden olabilmektedir. Ayrıştırma temelli yaklaşımlar, özellikle yapısal olarak karmaşık ve çok bileşenli optimizasyon problemlerinin çözümünde etkili bir strateji sunmaktadır (Archetti ve Speranza, 2014).

2.3.3. Hiper-sezgiselleri ve matsezgiselleri melezlemenin sağladığı avantajlar

Kombinatoryal optimizasyon problemlerinin çözümü için hiper-sezgisellerin ve matsezgisellerin melezlenmesi, her iki yöntemin güçlü yönlerini bir araya getirerek uyarlanabilirlik kabiliyetinin artmasını, parametre ayarlarında esneklik elde edilmesini, arama uzayının daha sistematik bir şekilde taranmasını ve kaliteli çözümlere hızlı bir şekilde ulaşılmasını sağlayan bir yaklaşım sunar. Matsezgisel tabanlı hiper-sezgisel uygulamalarının sayısı sınırlı olmasına karşın bu alan önemli bir araştırma potansiyeli taşımaktadır (Dökeroğlu vd., 2024).

Gerçek hayat problemlerinin genellikle dinamik olan yapısı göz önünde bulundurulduğunda, çevresel değişikliklerin getirdiği karmaşıklıkla başa çıkabilmek için optimizasyon algoritmalarının bu değişimlerin dinamiklerini izleyebilmek için uyarlanabilir nitelikte olması gerekir. Hiper-sezgisellerin adaptif yapısı, dinamik bir ortamdaki değişikliklere hızlıca tepki verebilmeyi ve değişimlerin niteliğinden bağımsız olarak bu tür ortamlarda etkili çözüm üretebilmeyi sağlar (Kiraz vd., 2013). Hiper-sezgisellerin en uygun alt seviye sezgiselleri seçerek parametrelerini ayarlayabilme ve aramayı umut vaat eden bölgelere yönlendirme özelliği ile matsezgisellerin belirli bir alanı derinlemesine tarama yeteneği birleştiğinde, yüksek kaliteli çözümlere ulaşma olasılığı artar. Bu iki yaklaşımın entegrasyonu hem genel hem de probleme özgü stratejilerin etkin bir şekilde kullanılmasına olanak tanır.

Hiper-sezgisellerin ve matsezgisellerin melezlenmesi ile ortaya çıkan hiper-matsezgisel yaklaşımlar, çözüm süresi açısından da önemli avantajlar sunar. Hiper-sezgiseller, problem yapısına en uygun alt seviye sezgiselleri dinamik olarak seçerek arama sürecini hızlandırırken; matsezgisel algoritmalar, belirli bir arama bölgesindeki en iyi çözüme daha hızlı ulaşma yeteneğine sahiptir. Bu yaklaşımlarda, çeşitliliği artırmak amacıyla belirli adımlarda rassallık benimsenirken, kısıtları sağlayan çözümlere ulaşmak için rassal arama yapmak yerine algoritmanın içine entegre edilen matematiksel modelleme tekniklerinden faydalanılabilir. Böylelikle, özellikle karmaşık kısıt yapısına sahip problemlerde arama uzayı daraltılarak çözüm süresi kısaltılabilir.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

3.1. İnsan-Robot İş Birliği ile Montaj Hattı Dengeleme Literatürü

Endüstri 4.0'ın üretim sistemlerinde robot kullanımını ön plana çıkarması, robotik montaj hattı dengeleme (RMHD) problemini ele alan akademik çalışmaları ivmelendirmiştir. Öte yandan, Endüstri 5.0'ın insan-robot iş birliği vizyonu, montaj sistemlerindeki araştırma ve uygulama odağının salt robotik otomasyondan ziyade insan ve robotun etkileşimini incelemeye doğru itmektedir. Bu vizyon, son yıllarda MHD alanında insan ve robot etkileşimine yönelik araştırmaların artışını beraberinde getirmiştir.

Literatürde, insanların ve robotların aynı istasyonlara tahsis edildiği çalışmalarda etkileşimin yapısı açısından farklı versiyonlar ele alınmıştır. Bunlardan ilki, görevlerin sırasıyla sadece işçi veya kobot tarafından gerçekleştirildiği türdür. Bu durumda, her görevi işgörenlerden biri yerine getirir ve ilgili istasyonda aynı anda birden fazla görev gerçekleştirilemez. Paralel yürütme ise bu iki işgörenin aynı anda farklı görevleri gerçekleştirebilmesine karşılık gelir. Bir diğer tür, işçinin ve kobotun yüksek düzeyde etkileşimi ile gerçekleşen, iki işgörenin eşzamanlı olarak aynı görevi birlikte yerine getirmesini ifade eden iş birlikçi çalışmadır. İş birlikçi çalışmada, işgörenlerin aynı anda farklı görevleri yapmasına izin verilmez. Bir montaj hattında, bu türlerin farklı kombinasyonlarının görülmesi de mümkündür.

İR-MHD literatüründeki çalışmaların önemli bir kısmında, işlem sürelerinin deterministik olduğu varsayımı altında iş istasyonlarının düz şekilde yerleştirildiği ve tek modelli üretimin yapıldığı montaj hatlarında çevrim süresinin optimizasyonuna odaklanılmıştır. Bu alandaki ilk çalışmalardan birini gerçekleştiren Weckenborg vd. (2020), işçilerin ve robotların görevleri paralel veya iş birliği içinde gerçekleştirme durumlarını ele almış ve çevrim süresinin enküçüklenmesi amacıyla bir karma tamsayılı programlama modeli sunmuştur. Bu çalışmada, türetilen test problemlerini çözmek için matematiksel modele ek olarak melez bir genetik algoritma önerilmiştir.

Sikora ve Weckenborg (2022), insanların ve robotların aynı istasyonda paralel ve iş birliği halinde çalışabildiği İR-MHD problemini ele alarak çevrim süresini enküçüklemek için Benders ayrıştırma algoritmasının çeşitli versiyonlarını geliştirmiş ve önerilen yöntemlerin performansını test problemleri üzerinde değerlendirmiştir.

Nourmohammadi vd. (2022b), farklı yeteneklere sahip işçilerin ve robotların paralel çalıştığı gerçek bir montaj hattında çevrim süresini enküçüklemek için bir genetik algoritma önermiştir.

Mao vd. (2024a), farklı kobot türlerinin olduğu bir ortamda insanların ve robotların paralel şekilde ve iş birliği halinde görev aldığı bir İR-MHD çalışması gerçekleştirmiştir. Yazarlar, çalışma kapsamında çevrim süresini enküçüklemek amacıyla matematiksel programlama modelleri ve bir tavlama benzetimi algoritması geliştirmiştir.

Zheng vd. (2025a), Mao vd. (2024a) tarafından ele alınan problem üzerinde çalışmış ve yeni bir karma tamsayılı programlama modeli önermiştir. Bu çalışmada, modelin yanı sıra büyük boyutlu problemlerin çözümü için YAK ve göçmen kuşlar algoritmaları geliştirilmiştir.

Mao vd. (2024b), işçilerin heterojen olduğunu varsayarak çevrim süresinin optimizasyonu için bir matematiksel modelleme yaklaşımı ve bir tavlama benzetimi algoritması önermiştir.

Ma'ruf vd. (2024), görevlerin farklı sıralarla veya farklı ekipmanlarla yapılmasını ifade eden alternatif alt grafikleri dikkate almıştır. Yazarlar, çevrim süresinin optimizasyonu için matematiksel modele ek olarak karınca kolonisi optimizasyon algoritması temelli bir çözüm yöntemi sunmuştur.

Kheirabadi vd. (2025), insan ve robot etkileşiminde güvenlik konusunun önemine dikkat çekmiş ve çevrim süresini optimize ederken iş birlikçi iş istasyonlarında işçi ve kobotun orta ve yüksek risk taşıyan durumlarda görevleri paralel yürütmesini engelleyen bir kısıt programlama modeli önermiştir. Bu model, kobotların atanacağı en uygun iş istasyonlarını belirlemekte ve görevleri iş istasyonlarındaki işgörenlere atamaktadır.

Güvenlik kısıtlarının uygulanmadığı senaryoyla karşılaştırıldığında, çevrim süresinde küçük bir artış karşılığında belirgin bir güvenlik iyileşmesi sağlandığını görülmüştür. Ayrıca, elde edilen optimal çevrim süresini girdi olarak kullanan ve montaj hattının ihtiyaç duyduğu kobot sayısını optimize eden farklı bir model daha sunulmuştur.

İR-MHD kapsamımda, çevrim süresinin yanı sıra farklı performans ölçütleri dikkate alınarak çok amaçlı çalışmalar da gerçekleştirilmiştir. Li vd. (2021a), farklı satın alma maliyetlerine sahip çeşitli türlerde robotun mevcut olduğu İR-MHD problemini ele alan ilk çalışmayı sunmuştur. Bu çalışmada, görevleri gerçekleştirme sırasında çarpışma tehlikesi sebebiyle bir işçinin ve kobotun aynı istasyonda paralel görevler yürütmesine izin verilmemiştir. Çevrim süresini ve toplam robot satın alma maliyetini eşzamanlı olarak enküçüklemek için çok amaçlı bir karma tamsayılı programlama modeli ve göçmen kuşlar algoritması geliştirilmiştir.

Koltai vd. (2021), gerçek bir montaj hattının iş istasyonlarına sadece işçilerin atanması, yalnızca işçilerin veya robotların atanması ve bu iki işgören türünün birlikte atanması senaryolarını ayrı ayrı incelemiştir. Yazarlar, çevrim süresini ve iş istasyonu sayısını optimize etmek için matematiksel programlama modelleri sunmuştur.

Dimény vd. (2021), üç adımda montaj hattında istihdam edilen işçi sayısının, robot sayısının ve hattın çevrim süresinin enküçüklenmesi üzerine çalışmıştır. Farklı yeteneklere sahip işçilerin bulunduğu bu çalışmada, problemin çözümü için bir matematiksel model geliştirmiştir.

Nourmohammadi vd. (2022a), işçilerin ve robotların ayrı ayrı, paralel ve aynı iş parçası üzerinde eşzamanlı çalıştığı durumları ele alarak montaj hattının çevrim süresini ve işgören sayısını optimize etmeyi sırasıyla birincil ve ikincil amaç olarak ele almıştır. Bu çalışmada, aynı istasyonda birden fazla işçinin ve robotun çalışmasına izin verilmiştir. Yazarlar, iş istasyonlarına görevlerin ve işgörenlerin atanması ve istasyonlardaki görevlerin ve kaynakların çizelgelenmesi için bir karma tamsayılı doğrusal programlama modeli ve bir tavlama benzetimi algoritması önermiştir.

Tian vd. (2024b), yarı vasıflı işçiler ile kobotların birlikte görev aldığı iş birlikçi hatları ele almıştır. Çalışmada, iki işgören türünün etkileşimine yönelik yedi farklı senaryo incelenmiştir. Montaj hattının çevrim süresini ve kobot maliyetini enküçüklemek amacıyla bir matematiksel model ve adaptif özelliklere sahip çok amaçlı iş birlikçi evrimsel algoritma önerilmiştir.

Nourmohammadi vd. (2024a), enerji krizi nedeniyle görevlerin robotlar tarafından asgari enerji tüketimiyle yerine getirilmesinin gerekliliğini vurgulamıştır. Yazarlar, çevrim süresine ek olarak toplam enerji maliyetini optimize etmek amacıyla bir karma tamsayılı doğrusal programlama modeli ve ε-kısıta dayalı çok amaçlı bir optimizasyon yaklaşımı geliştirmiştir.

Çevresel faktörleri optimize etmeye odaklanan bir diğer çalışma Li ve Wang (2024) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, çevrim süresini ve karbon emisyonunu optimize etmek amacıyla bir karma tamsayılı programlama modeli ve bir parçacık sürüsü optimizasyon algoritması önerilmiştir.

Montaj hatlarında kobot kullanımının başlıca gerekçelerinden biri, işçilerin ergonomik yükünü azaltmaktır. Bu doğrultuda, İR-MHD çalışmalarının kayda değer bir kısmında; işçilerin iş yükü dengesi, enerji tüketim düzeyi ve diğer ergonomik kriterler amaç fonksiyonu ya da kısıtlar kapsamında ele alınmıştır. Dalle Mura ve Dini (2019), farklı yeteneklere sahip işçilerin bulunduğu bir hatta aynı istasyona atanan işçinin ve kobotun yalnızca iş birliği halinde çalışmasına izin vererek montaj hattı maliyetini, yüksek teknik yeteneğe sahip işçi sayısını ve işçiler arasındaki enerji yükü farkını enküçüklemeyi amaçlamıştır. Ele alınan problemde, bazı görevlerin belirli ekipmanları gerektirdiği dikkate alınmıştır. Problemin çözümü için bir genetik algoritma önerilerek gerçek bir vaka çalışmasında test edilmiştir.

Weckenborg ve Spengler (2019), İR-MHD alanında ergonomiyi göz önünde bulundurarak maliyet odaklı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Yazarlar, çevrim başına maliyetleri optimize ederken işçilerin enerji tüketimini sınırlandıran bir matematiksel model önermiştir. Çalışmada, bir işçi ile kobotun aynı iş istasyonuna birlikte atandığı durumlarda, iki işgörenin aynı anda farklı görevleri paralel olarak gerçekleştirdiği ele almıştır.

Weckenborg vd. (2022), iş birlikçi hatlar kapsamında ergonomik ve ekonomik amaçlar arasındaki ödünleşmeyi göz önünde bulundururken, kobotların yanı sıra dış iskeletlerin kullanımını araştırmıştır. Çalışmada, problemin çözümü için bir karma tamsayılı programlama modeli geliştirilmiştir.

Dalle Mura ve Dini (2022), İR-MHD kapsamında iş rotasyonunu dikkate almıştır. İşçilerin farklı özelliklere sahip olduğu bu çalışmada, işgörenlerin sayısına ve istasyonlara kurulan ekipmanlara göre belirlenen toplam maliyetin ve işçilerin enerji yükü değişkenliğinin enküçüklenmesi için bir genetik algoritma önerilmiştir.

Dimény ve Koltai (2022), kısmi otomasyonun uygulandığı montaj hatlarında toplam iş yükünün optimize edilmesine odaklanmıştır. Bu çalışmada, iki ayrı karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Bu modeller, işçilerin ve robotların montaj hattında bağımsız istasyonlarda görev yapması, aynı istasyonda paralel çalışması ve iş birlikçi bir şekilde görevleri birlikte yürütmesi olmak üzere üç farklı etkileşim senaryosunu kapsamaktadır. İlk modelde, işçi sayısının belirli olduğu durumda robot sayısını; ikinci modelde ise belirli sayıda robot için işçilerin toplam iş yükünü enküçüklemek amaçlanmıştır.

Keshvarparast vd. (2022), işçilerin farklı seviyelere ayrıldığı ve insanlar ile kobotların paralel ve iş birlikçi görev yürütmesine izin verilen bir İR-MHD problemini ele alarak montaj hattının çevrim süresini ve işçiler üzerindeki toplam fiziksel iş yükünü eşzamanlı olarak enküçüklemeyi amaçlamıştır. Her görevin fiziksel iş yükünün Borg skalasına (Borg, 1990) göre 6 ile 20 arasında ifade edildiği bu çalışmada, bir gerçek hayat problemi için işçilerden hissettikleri zorlanma düzeylerine ilişkin görevlere skor vermeleri istenmiş ve işçilerin fiziksel kapasiteleri belirlenmiştir. Çalışmada, işçilerin fiziksel kapasitelerini aşmadan hattı dengelemek için iki amaçlı bir matematiksel model önerilmiş ve ele alınan amaçlar ε-kısıt yöntemi ile birleştirilmiştir.

Bekdemir ve Özmehmet Taşan (2024), İR-MHD problemini ergonomik kısıtlar altında maliyet tabanlı olarak araştırmıştır. Ele alınan problemin amacı, çevrim başına düşen maliyeti enküçüklemektir. Aynı istasyona atanan işçinin ve kobotun görevleri paralel olarak gerçekleştirdiği bu çalışmada, işçiler için belirlenen enerji tüketim seviyesinin aşılması

durumunda ilgili işçiye dinlenme payı verilmektedir. Problemin çözümü için bir karma tamsayılı doğrusal programlama modeli önerilmiştir.

Keshvarparast vd. (2025), işçilerin ve kobotların sıralı, paralel ve iş birliği halinde çalışmasının yanı sıra bu etkileşim türlerinin tüm olası kombinasyonlarını içeren çeşitli senaryoları ele almıştır. İşçilerin yorgunluk düzeyi, enerji tüketim miktarı ve ihtiyaç duydukları dinlenme süreleri üzerinden değerlendirilmiş ve hat optimizasyonu sürecinde, çevrim süresine her bir işçi için ayrı ayrı hesaplanan dinlenme süreleri dahil edilmiştir. İşçilerin çalışma sırasında harcadıkları enerji miktarı; yaş, vücut ağırlığı ve cinsiyet gibi özelliklere bağlı olan bir değişken olarak kabul edilmiştir. Bu doğrultuda, çevrim süresini enküçüklemek amacıyla işçilerin ve kobotların özelliklerine göre en uygun etkileşim türünü seçen ve kaynakları iş istasyonlarına atayan bir model önerilmiştir.

Cai vd. (2025), montaj hattındaki her bir görevin otomasyon potansiyelini değerlendirerek, hangi görevlerin robotlar tarafından gerçekleştirilebileceğini belirlemiştir. Ayrıca, görevlerin işçiler ve robotlar için montaj karmaşıklığı ve işçiler için iş yükü analiz edilmiştir. Elde edilen göstergeler doğrultusunda çevrim süresini, farklı iş istasyonları arasındaki iş yükü değişkenliğini ve ürün başına düşen montaj karmaşıklığını optimize etmek için bir matematiksel model ve bir göçmen kuşlar algoritması geliştirilmiştir.

Zheng vd. (2025b), heterojen kobotlar ve sınırlı kaynaklarla donatılmış iş birlikçi montaj hatlarını göz önünde bulundurarak, işçilerin ve robotların paralel çalışabildiği bir ortamda çevrim süresini optimize etmeyi amaçlamıştır. Bu çalışmada, bir kısıt programlama modeli formüle edilmiş ve bir meyve sineği optimizasyon algoritması önerilmiştir. Ardından, görevlerin işçiler üzerinde oluşturduğu psikolojik yükler dahil edilerek model genişletilmiştir. Bu model, yalnızca çevrim süresini optimize etmekle kalmayıp, aynı zamanda işçiler arasındaki psikolojik iş yükü farklılıklarını azaltmayı ve işçilerin psikolojik yüklerini belirli bir aralıkta tutmayı sağlamıştır.

İR-MHD kapsamında düz hatlarda karma modelli üretimi ele alan çalışmalar da bulunmaktadır. Yaphiar vd. (2020), karma modelli iş birlikçi montaj hatları için bir matematiksel model sunmuştur. Önerilen matematiksel modelin amacı, yatırım ve işletme maliyetlerinden oluşan toplam maliyeti enküçüklemektir.

Çil vd. (2020), farklı modellerin çevrim süresi toplamını enküçüklemeyi amaçlamıştır. Çalışmada, bir işçinin ve kobotun aynı istasyona atandığı durumda, farklı türde işgörenlerin görevleri paralel şekilde gerçekleştiremediği varsayılmıştır. Türetilen test problemlerini çözmek için bir matematiksel model ve iki farklı sürü zekası optimizasyon algoritması önerilmiştir.

Stecke ve Mokhtarzadeh (2022), hareketli robotların ardışık iki istasyona tahsis edilerek iki farklı işçiyle iş birliği yapabildiği karma modelli bir İR-MHD problemi üzerinde çalışmıştır. Çalışmada, montaj süreci boyunca her istasyonda bir işçinin sabit olarak görev aldığı ve robotların ya bir istasyonda işlem yapabildiği ya da iki istasyon arasında geçiş yaparak görev üstlenebildiği varsayılmıştır. Çevrim süresini, hattın toplam ergonomik riskini, en büyük riske sahip istasyonun toplam ergonomik riskini enküçüklemek ve tercih edilen aktif kaynaklara ayrılan toplam işlem sayısını enbüyüklemek amaçlanmıştır. Farklı işgören türlerinin aynı anda farklı görevleri paralel olarak gerçekleştirebildiği ve aynı görev üzerinde iş birliği içinde çalışabildiği senaryolar dikkate alınmıştır. Problemin çözümü için bir karma tamsayılı doğrusal programlama modeli, bir kısıt programlama yaklaşımı ve bir Benders ayrıştırma algoritması geliştirilmiştir. Ergonomik risklerin değerlendirilmesinde ise enerji tüketimine dayalı bir yöntem benimsenmiştir. Ayrıca, istasyon alanı ve bölgeleme kısıtları da göz önünde bulundurulmuştur.

Dalle Mura ve Dini (2023), karma modelli iş birlikçi hatlarda çalışma ortamlarını ergonomik açıdan iyileştirmek için işçilerin harcadığı enerji miktarının, gürültüye maruz kalma seviyesinin ve iş rotasyonunun dikkate alındığı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada; hat kurulum maliyetinin, işçilerin arasındaki enerji yükü değişkenliğinin ve işçilerin maruz kaldığı gürültü değişkenliğinin enküçüklenmesi için genetik algoritma temelli bir yaklaşım önerilmiştir.

İR-MHD problemi, araştırmacılar tarafından farklı istasyon yerleşim şekilleri kapsamında da ele alınmıştır. Rabbani vd. (2020), insanların ve robotların çalıştığı dört taraflı karma modelli montaj hatları üzerinde çalışmıştır. Her istasyonda yalnızca bir işgörenin bulunduğu bu çalışmada, istasyon sayısının ve toplam maliyetin enküçüklenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada bir matematiksel model ve parçacık sürüsü optimizasyonu algoritması geliştirilmiştir.

Chutima ve Khotsaenlee (2022), geleneksel işçilerin yanı sıra engelli işçilerin de çalıştığı paralel U-tipi hatları içeren bir sistemi ele almıştır. Çalışmada; hatların verimliliğinin, robotik iş istasyonlarının enerji tüketiminden kaynaklanan ortalama ince partikül emisyonunun, iş istasyonları arasındaki iş yükü değişkenliğinin, manuel iş istasyonları için işçiler arasındaki enerji tüketim değişkenliğinin ve firmanın engelli işçi istihdamından kaynaklanan ortak vergi indiriminin eşzamanlı olarak optimize edilmesi için çok amaçlı bir evrimsel algoritma önerilmiştir.

Li vd. (2023), farklı satın alma maliyetlerine sahip robotların bulunduğu U-tipi montaj hatlarına odaklanmıştır. Çalışmada, bütçe kısıtı altında çevrim süresini optimize etmek için üç farklı karma tamsayılı programlama modeli formüle edilmiş, ayrıca YAK ve göçmen kuşlar optimizasyon algoritmaları geliştirilmiştir.

U-tipi hatlarda iş birlikçi sistemleri inceleyen ve çevrim süresini enküçüklemeyi amaçlayan bir diğer çalışma Mao vd. (2023) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, problemin çözümü için bir matematiksel modelleme yaklaşımı ve tavlama benzetimi algoritması önerilmiştir.

Keshvarparast vd. (2023), birden fazla çok ürünlü hattın bulunduğu ve hatlar arasında kaynak atamasının yapıldığı bir sistemi incelemiştir. Bu sistemde, farklı deneyim seviyelerine sahip işçiler yer almaktadır. Çalışmada, işçilerin ve robotların hem bağımsız hem de paralel olarak çalışmasına olanak tanınmıştır. Yazarlar, farklı hatların çevrim süreleri arasındaki farkı enküçüklemeyi amaçlayan bir matematiksel model geliştirmiştir.

Nourmohammadi vd. (2024b), istasyonlarda paralel veya iş birliği halinde çalışılabilen İR-MHD kapsamında istasyon sayısının, çevrim süresinin ve enerji tüketiminden kaynaklanan maliyetin optimize edilmesini amaçlayan üç farklı problem türünü düz ve U-tipi montaj hatları kapsamında ele almış ve karma tamsayılı doğrusal programlama modelleri önermiştir. Bu çalışmada; robot takım değişiklikleri, bölgeleme ve teknolojik gereksinimler gibi özel kısıtlar da dikkate alınmıştır.

Huang vd. (2024), çift taraflı İR-MHD problemini incelemiştir. Bu problem; ergonomik riski, enerji tüketimini ve çevrim süresini enküçüklemek amacıyla karma tamsayılı programlama modeli kullanılarak formüle edilmiştir. Ayrıca, çok amaçlı bir YAK algoritması önerilmiştir.

Mao vd. (2024c), birbirine paralel hatların bulunduğu İR-MHD problemini tanıtmıştır. Bu çalışmada, işçilerin ve robotların görevleri paralel ve iş birliği halinde yürütebildiği varsayılmıştır. Yazarlar, çevrim süresinin optimizasyonu için bir matematiksel model ve bir yasaklı arama algoritması önermiştir.

İR-MHD literatüründe az sayıda çalışmada, talebin veya işlem sürelerinin deterministik olmadığı göz önünde bulundurulmuştur. Samouei ve Ashayeri (2019), farklı seviyelerdeki işçilerin ve robotların çalıştığı karma modelli montaj hatlarını ele alarak komşu istasyonlarda çalışan işçiler arasında iş birliğinin mümkün olduğunu varsaymıştır. Bu çalışmada, talep belirsizliğinin varlığına bağlı olarak belirli veya değişken bir çevrim süresi için toplam maliyeti enküçüklemek amaçlanmıştır. Bu problemler, sırasıyla tek ve çok amaçlı robust fonksiyonlar olarak incelenmiştir.

Slama vd. (2023), işçilerin işlem sürelerinin rassal değişkenler olduğu iş birlikçi hatlarını ele almıştır. Bu çalışmada, farklı işgören türlerinin paralel veya iş birliği içinde çalışmasına izin verilmiştir. Sabit iş istasyonu işletme maliyetlerinden ve çevrim süresini aşmaktan dolayı ortaya çıkan kaynak maliyetlerinden oluşan toplam maliyetin enküçüklenmesi amacıyla stokastik bir karma tamsayılı programlama formülasyonu sunulmuştur.

Rahman vd. (2023), işlem süresindeki belirsizliğin ve işçilerin yaşlarının ve becerilerinin dikkate alındığı montaj hatları için üç amaçlı bir matematiksel model geliştirmiştir. Çalışmada, modele ek olarak bir memetik algoritma önerilmiştir.

Zacharia vd. (2024), farklı becerilere sahip işçilerin tek başına veya bir robotla iş birliği içinde çalışabildiği bulanık İR-MHD problemini ele alarak bir genetik algoritma önermiştir. Bu çalışmada, işçilerin işlem süreleri bulanık, robotların yüksek otomasyonlarından dolayı işlem süreleri ise deterministik olarak kabul edilmiştir. Problem

öncelikle sadece bulanık çevrim süresinin enküçüklenmesi amacıyla çözülmüştür. Ardından, bulanık çevrim süresinin ve hattın bulanık düzgünlük indeksinin eşzamanlı olarak optimize edilmesi sağlanmıştır.

Zhang vd. (2024), karma modelli bulanık İR-MHD problemine odaklanmıştır. Farklı yeteneklere sahip işçilerin ve robotların istasyonlarda paralel şekilde çalıştığı dikkate alınmış ve montaj sürecindeki belirsizlikleri modellemek için aralık tip-2 bulanık kümelerinden yararlanılmıştır. Çalışmada; iş istasyonu sayısı, iş istasyonu boş kalma süreleri arasındaki farklar, montaj maliyeti ve enerji tüketim miktarı arasında ödünleşme sağlamak için bir arı algoritması sunulmuştur.

3.2. Montaj Hattı Yeniden Dengeleme Literatürü

Son yıllarda, işçilerin ve robotların montaj hatlarında birlikte çalışmasına olanak tanıyan sistemler, sundukları avantajlar nedeniyle dikkat çekmektedir. Buna bağlı olarak manuel iş gücüne dayalı olarak faaliyet gösteren işletmeler, mevcut sistemlerini teknolojik gelişmeler doğrultusunda iş birlikçi sistemlere uyarlamaya çalışmaktadır. Ancak, İR-MHD problemi kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar, iş birlikçi sistemlerin sıfırdan kurulmasını dikkate almaktadır. Oysaki, oldukça maliyetli ve zaman alıcı olan sıfırdan hat kurulumu yerine belirli noktalarda değişiklikler yaparak hatları yeniden yapılandırmak mümkündür. Bu durum, montaj hattının mevcut yapısına kısmen bağlı kalınarak, iş gücü yapısındaki değişim sebebiyle yeniden dengelenmesine karşılık gelmektedir.

Falkenauer'a (2005) göre yeni kurulmuş bir üretim sisteminde montaj hatlarının ilk kez dengelenmesine nazaran mevcut hatların çeşitli sebeplere bağlı olarak yeniden dengelenmesi ihtiyacıyla daha sık karşılaşılmaktadır. Gerçek üretim ortamlarında; iş istasyonlarında meydana gelen arızalar veya kapanmalar, yeni talep gelişleri, teknolojik şartnamede değişiklikler ve işlem alternatiflerinin değişimi gibi durumlar, ilk dengeleme planının uygulanmasını zorlaştırdığından hattı yeniden dengeleme gereksinimi ortaya çıkmaktadır (Sancı ve Azizoğlu, 2017). MHD kapsamında bu problem, MHYD olarak bilinmektedir.

Literatürde MHYD konusundaki çalışmaların çoğu düz hatlarda işlem sürelerinin deterministik olduğu varsayımı altında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda, genellikle talep değişkenliği sebebiyle hattın yeniden dengelenme durumu ele alınmıştır (Corominas vd. 2008; Grangeon vd. 2011; Yang vd. 2013; Samadhi ve Sumihartati, 2016; Belassiria vd., 2018; Perez-Wheelock vd., 2022; Hou ve Zhang, 2024; Yang, 2024).

Yılmaz ve Erol (2005), işlem sürelerindeki değişiklikler sebebiyle hattın yeniden dengelenmesini incelemiştir. İlgili çalışmada, taşıma maliyetlerini enküçüklemeyi amaçlayarak problemin çözümü için bir tamsayılı programlama modeli ve bir dal-sınır algoritması önerilmiştir.

Makssoud vd. (2015), üretim içeriği değiştiğinde hattın yeniden dengelenmesi için yeniden atanan görev sayısını ve istasyon sayısını enküçüklemeyi amaçlamıştır. Yazarlar, problemi matematiksel olarak formüle etmiş ve kesin bir çözüm yöntemi geliştirmiştir.

Sancı ve Azizoğlu (2017), iş istasyonu arızası sebebiyle hattın yeniden dengelenmesini incelemiştir. Bu çalışmada, çevrim süresinin ve yeniden atanan görev sayısının enküçüklenmesi amaçlanmıştır. Tüm baskın olmayan çözümleri bulmak için karma tamsayılı doğrusal programlama tabanlı bir algoritma ve bir dal-sınır algoritması önerilmiştir.

Budak ve Chen (2020), kesintiler olduğunda üretim hızının değişimini dikkate alarak hattın yeniden dengelemesinden sonra tüm iş istasyonlarının üretim oranlarındaki eksiklik ve fazlalık toplamını enküçüklemeyi amaçlayarak bir matematiksel model önerisinde bulunmuştur.

Girit ve Azizoğlu (2021), istasyon kapanmaları durumunda iş yükü dengesi ve istasyonu değişen görevler için toplam yer değiştirme mesafesini enküçüklemek amacıyla bir yeniden dengeleme çalışması gerçekleştirmiştir.

Fan vd. (2024), işlem süresi değişikliği sebebiyle yeniden dengeleme gereksinimine odaklanmış, değişiklik maliyetini ve hat verimliliğini optimize etmek için bir matematiksel model ve çok amaçlı bir genetik algoritma sunmuştur.

Zhu vd. (2024), ürün yapısındaki değişim nedeniyle yeniden dengeleme durumu üzerinde çalışmıştır. Yazarlar, kaynakların da istasyonlara atanmasını dikkate alarak yeniden dengeleme maliyetinin enküçüklenmesi için bir matematiksel model ve gelişmiş özelliklere sahip bir değişken komşuluk arama algoritması önermiştir.

Deterministik MHYD problemi kapsamında U-tipi (Ağpak, 2010; Oliveira vd., 2012; Zha ve Yu, 2014) ve çift taraflı (Zhang vd., 2018, 2019; Hu vd., 2020) hatlar da dikkate alınmıştır. Problemin stokastik (Gamberini vd., 2006, 2009; Çelik vd., 2014; Li, 2017; Serin vd., 2019; Li vd., 2021b, 2024; Nikkerdar ve ElMaraghy, 2025) versiyonuna odaklanan çalışmalar da bulunmaktadır.

Montaj hatlarının yeniden dengelenmesi kapsamında farklı performanslara sahip işçilerin istasyonlara atanmasının dikkate alındığı ilk çalışmayı Karaş ve Özçelik (2021) gerçekleştirerek, montaj hattı işçi atama ve yeniden dengeleme (MHİAYD) problemini tanımlamış ve belirli sayıda iş istasyonunun kapanmasına bağlı olarak hattın yeniden dengelenme durumunu ele almıştır. Çevrim süresinin ve yeniden atanan görev sayısının enküçüklenmesinin amaçlandığı bu çalışmada, problemin çözümü için bir karma tamsayılı doğrusal programlama modeli ve bir YAK algoritması önerilmiştir.

Michels ve Costa (2022), MHİAYD problemini, talep değişimi sebebiyle yeniden dengeleme ihtiyacını göz önünde bulundurularak incelemiştir. Yazarlar, iş gücü maliyetlerini enküçüklemeyi amaçlayan karma tamsayılı doğrusal programlama modelleri geliştirmiştir.

Çimen vd. (2022), ergonomik riskleri dikkate alarak çok amaçlı bir MHİAYD çalışması gerçekleştirmiştir. Çalışmada, yeniden dengeleme maliyetini ve istasyonların ergonomik risk faktörlerini enküçüklemek amaçlanmıştır. Problemi çözmek için rassallaştırılmış kural tabanlı kurucu bir sezgisel yaklaşım geliştirilmiştir.

MHİAYD bağlamında ergonomik riskleri ele alan bir diğer çalışma Katiraeea vd. (2023) tarafından sunulmuştur. Bu araştırmada, çevrim süresini ve istasyonu değişen görev sayısını enküçüklemek amaçlanmış ve işçilerin maruz kaldığı risk seviyelerini belirli bir eşik altında tutmak için ergonomik risk kısıtları kullanılmıştır. Çalışmada, her bir işçinin belirli

bir görevi yerine getirirken deneyimlediği zorlanma düzeyi, Borg CR10 skalası (Borg, 1990) aracılığıyla değerlendirilmiştir. İşçilerin zorlanma düzeylerinin yanı sıra görevleri tamamlama sürelerine bağlı olarak belirlenen yetkinlik seviyesi de dikkate alınarak bir işçi-görev matrisi önerilmiştir. Bu matriste yer alan 0 ile 10 arasındaki değerler, zorlanma düzeyi ve yetkinlik seviyesine göre hangi işçinin hangi görev için ne kadar fiziksel efor sarf ettiğini değerlendirmede kullanılmıştır. Önerilen modelde ele alınan amaçlar, ε-kısıt yöntemiyle birleştirilmiştir.

3.3. Önerilen Problemin Literatürdeki Yeri

Gerçek üretim ortamlarında, çeşitli nedenlerle montaj hatlarının yeniden dengelenmesi gereksinimi sıklıkla ortaya çıkmasına rağmen literatürde insan-robot iş birliği kapsamında hatların yeniden dengelenmesi konusunda bir araştırma boşluğu bulunmaktadır. Bu çalışmada, farklı işgören türlerinin avantajlarından yararlanarak yeniden yapılandırılabilir iş birlikçi montaj sistemlerinin geliştirilmesine destek sunmak amacıyla İR-MHYD problemi önerilmektedir.

İR-MHYD problemi, çeşitli MHD uzantılarının farklı niteliklerini bir araya getirmektedir (Çizelge 3.1). Görev atama, işçi atama, robot atama ve yeniden dengeleme özelliklerini içeren İR-MHYD problemin, insanların ve robotların aynı çalışma alanını paylaştığı ve yeniden yapılandırılabilirlik özelliğine sahip gelişmiş seri üretim sistemlerinin kurulması bağlamında literatüre katkı sağlaması hedeflenmektedir.

Çizelge 3.1. MHD ve türlerinin içerdiği özellikler

Problem	Görev atama	İşçi atama	Robot atama	Yeniden dengeleme
MHD	✓			
RMHD	✓		✓	
İR-MHD	✓	✓	✓	
MHYD	✓			✓
MHİAYD	✓	✓		✓
İR-MHYD	✓	✓	✓	✓

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. İnsan-Robot İş Birliği ile Montaj Hattı Yeniden Dengeleme Problemi

İR-MHYD probleminde, başlangıç durumda manuel işçiler ile çalışan bir montaj hattının dengede olduğu ve bu durumda hangi görevin hangi istasyona atandığının bilindiği varsayılmıştır. Problemde; montaj hattının istasyonlarının düz bir şekilde sıralandığı ve tek modelli olduğu, işçilerin ise hiyerarşik yetenek seviyelerine sahip olduğu ele alınmıştır.

Hiyerarşik seviyelere ayrılan işçilerin montaj hatlarına atanması için hiyerarşik işçi ataması ile montaj hattı dengeleme (HİAMHD) problemini öneren Sungur ve Yavuz'un (2015) yaklaşımı benimsenerek; 1. yetenek seviyesindeki işçilerin tüm görevleri gerçekleştirme konusunda becerikli olduğu ve ilgili görevler için diğer gruplara nazaran daha az işlem süresine gereksinim duyduğu dikkate alınmıştır. Bir sonraki grup olan 2. seviye işçiler ise bazı görevleri yerine getirme konusunda yetenekli değildir ve yetenekli oldukları görevler kapsamında 1. seviye işçilerden belirli bir oranda daha yüksek işlem süresine sahiptir. 2. seviyedeki işçilerin maliyeti, 1. seviye işçilerin maliyetinden daha düşüktür. 3. seviyede olan işçiler ise en düşük maliyete sahip olan grup iken 2. seviyede olanlara göre daha az sayıda görevde yeteneklidir ve yapabildikleri görevler için daha fazla süreye ihtiyaç duyar. Farklı seviyelerdeki işçilerin işlem süreleri ve maliyetlerinin yanı sıra her bir görevi gerçekleştirirken maruz kaldıkları ergonomik risk düzeyleri de farklıdır. Bunun sebebi, daha kalifiye işçilerin diğerlerine göre görevleri gerçekleştirme konusunda daha yetkin ve pratik olmaları dolayısıyla daha az yaralanma riski ile karşı karşıya kalmalarıdır.

İşletme, bazı süreçleri otomatikleştirmek ve istasyonların ergonomik riskini belirli bir seviyenin altında tutmak amacıyla robotlardan ve kobotlardan faydalanmak istemektedir. Buna bağlı olarak işçiler, robotlar ve kobotlardan oluşan farklı işgören türlerinin bir arada çalışacağı bir sisteme geçiş yapmaya karar verildiği varsayılmıştır. Bazı istasyonlarda sadece bir işçinin veya robotun, bazı istasyonlarda ise bir işçi ve bir kobotun iş birliği içinde çalışması için çevrim süresini enküçükleyecek şekilde hattın yeniden dengelenmesi amaçlanmaktadır. Bir işçi ve kobotun aynı istasyona atandığı durumlarda, iki işgörenin ilgili istasyona atanan görevleri iş birliği halinde birlikte yaptığı varsayılmıştır.

Bir görevi gerçekleştirebilecek işgören türlerinin/işçi seviyelerinin hangileri olduğu, bu işgörenlere ait işlem süreleri ve işgören maliyetleri önceden bilinmektedir. Bu maliyetler, belirli bir dönemde ilgili işgörenlerin montaj hattında görev yapması sebebiyle ortaya çıkan maliyetleri kapsamaktadır. Bir işçi ve kobot ile iş birliği yaptığında, tehlikeli ve yorucu adımların kobot yardımıyla yapılabilmesinden dolayı işlem süresinin ve ergonomik riskin düştüğü, kobotun ek maliyet getirdiği göz önünde bulundurulmuştur. Robotların ergonomik riskinin bulunmadığı ele alınmıştır. Belirli görevlerin robotlar tarafından ve/veya iş birliği içinde yapılmaya uygun olmadığı varsayılmıştır. Ele alınan problemde, hattın en baştan kurulması yerine başlangıç (yalnızca işçilerin çalıştığı durum) ve yeni duruma (işçilerin, robotların ve kobotların bir arada çalıştığı durum) ait görev-iş istasyonu atamalarının en az belirli bir oranda benzerlik göstermesi istenmektedir. İşletmenin robotların ve kobotların da dahil olacağı yeni durumdaki satın alma maliyetini göze aldığı ve dolayısıyla probleme dahil edilmediği, ancak hatta çalışacak işgörenlerin belirli bir dönem içindeki toplam maliyeti konusunda bir bütçe sınırı olduğu ele alınmaktadır. Özetle, İR-MHYD probleminde, klasik MHD kısıtlarına ek olarak ergonomik risk, bütçe ve başlangıç-yeni hat benzerliği ile ilgili kısıtlar da bulunmaktadır.

Yalnızca işçilerin bulunduğu başlangıç hattın görev-iş istasyonu atamaları Bölüm 4.2'de sunulan başlangıç hat dengesi modeli ile elde edilmektedir. Bu model, Karaş Çelik ve Özçelik (2024) çalışmasında HİAMHD problemi için sunulan modele ergonomik risk kısıtının eklenmesiyle geliştirilmiştir.

4.2. Başlangıç Hat Atamalarının Elde Edilmesi

İndisler ve kümeler

i, j	görev
s	iş istasyonu
h	işçi seviyesi
T	görev kümesi
S	iş istasyonu kümesi
H	işçi seviyesi kümesi
P_i	görev i'nin bitişik öncüllerinin kümesi

Parametreler

NS	iş istasyonu sayısı
t_{ih}^0	görev i'nin h seviyesindeki işçiler açısından işlem süresi
r_{ih}^0	görev i'nin h seviyesindeki işçiler açısından ergonomik riski
ml_h^0	h seviyesinde işçi maliyeti
$enbrisk$	bir iş istasyonu için ergonomik risk sınırı
NCS	çevrim süresinin normalleştirme katsayısı
NIM	toplam işçi maliyetinin normalleştirme katsayısı
w_1	çevrim süresi amacının ağırlığı
w_2	toplam işçi maliyeti amacının ağırlığı

Karar değişkenleri

x_{ish}^0	görev i istasyon s'de h seviyesinde bir işçiye atanırsa 1; diğer durumlarda 0
y_{sh}^0	iş istasyonu s'ye h seviyesinde bir işçi atanırsa 1; diğer durumlarda 0
CS	çevrim süresi
IM	toplam işçi maliyeti

Başlangıç hat dengesi modeli

$$\sum_{s\epsilon S}\sum_{h\epsilon H} x_{ish}^0 = 1 \quad \forall i \in T \tag{4.1}$$

$$\sum_{i\epsilon T}\sum_{h\epsilon H} x_{ish}^0 \geq 1 \quad \forall s \in S \tag{4.2}$$

$$\sum_{h\epsilon H} y_{sh}^0 = 1 \quad \forall s \in S \tag{4.3}$$

$$\sum_{i\epsilon T} x_{ish}^0 \leq M * y_{sh}^0 \quad \forall s \in S, h \in H \tag{4.4}$$

$$\sum_{s\epsilon S}\sum_{h\epsilon H} s * x_{ish}^0 \leq \sum_{s\epsilon S}\sum_{h\epsilon H} s * x_{jsh}^0 \quad \forall\, i,j \in T \mid i \in P_j \tag{4.5}$$

$$\sum_{i\epsilon T} t_{ih}^0 * x_{ish}^0 \leq CS \quad \forall s \in S, h \in H \tag{4.6}$$

$$\sum_{s\epsilon S}\sum_{h\epsilon H} ml_h^0 * y_{sh}^0 = IM \tag{4.7}$$

$$\sum_{i\epsilon T}\sum_{h\epsilon H} r_{ih}^{0} * x_{ish}^{0} \leq enbrisk \quad \forall s \in S \tag{4.8}$$

$$x_{ish}^{0}, y_{sh}^{0} \epsilon \{0,1\} \quad \forall i \in T, s \in S, h \in H \tag{4.9}$$

$$CS, IM \geq 0 \tag{4.10}$$

kısıtları altında

$$enk\ z = w_1 * \left(\frac{CS}{NCS}\right) + w_2 * \left(\frac{IM}{NIM}\right) \tag{4.11}$$

Kısıt (4.1), her görevin bir iş istasyonuna ve belirli seviyeden bir işçiye atanmasını garanti eder. Kısıt (4.2), her istasyona en az bir görevin atanmasını sağlar. Kısıt (4.3), her istasyona bir işçinin atanmasını kontrol eder. x_{ish}^{0} ve y_{sh}^{0} değişkenleri arasındaki bağlantı Kısıt (4.4) ile sağlanır. Burada M, yeterince büyük bir sayıdır ($\sum_{i\epsilon T}\sum_{h\epsilon H} t_{ih}^{0} < M$). Kısıt (4.5), görevler arasındaki öncelik ilişkilerini kurar. Kısıt (4.6), çevrim süresi kısıtıdır. Hattın çevrim süresini, en büyük iş yüküne sahip iş istasyonu belirler. Kısıt (4.7), toplam işçi maliyetini hesaplar. Kısıt (4.8), bir istasyona atanan görevlerin ilgili istasyonda çalışan işçinin seviyesine göre hesaplanan toplam ergonomik riskinin belirlenen sınır değeri aşmamasını sağlar. Kısıt (4.9) ve (4.10), karar değişkenlerinin işaret kısıtlarıdır. Amaç fonksiyonu (4.11), çevrim süresinin ve toplam işçi maliyetinin normalleştirilmiş değerlerinin ağırlıklı toplamının enküçüklenmesidir.

Çevrim süresi ve toplam işçi maliyeti amaçlarının birimleri farklı olduğundan, amaç fonksiyonunda normalleştirme işlemi yapılmıştır. Çevrim süresi amacı için normalleştirme (NCS) değeri, her bir görevin farklı seviyelerdeki işçiler açısından en büyük işlem süresinin iş istasyonu sayısına oranı ($\frac{\sum_i max\{t_{ih}^{0} | h\epsilon H\}}{NS}$) ile elde edilir. Bir görev için en büyük işlem süresi, o görevi yapma yeteneği bulunan kalifiye düzeyi en düşük işçi grubunun işlem süresine eşittir. Toplam işçi maliyeti amacı için normalleştirme (NIM) değeri ise her bir iş istasyonuna en kalifiye grup olan 1. seviyeden birer işçi atanması durumundaki toplam maliyet ($NS * ml_1^0$) olarak alınmıştır.

Manuel montaj hatlarından iş birlikçi yapıya geçiş kapsamında hattın yeniden dengelenmesi için önerilen İR-MHYD modeli Bölüm 4.3'te sunulmuştur. İR-MHYD modeli, başlangıç hat dengesi modelinden elde edilen görev-iş istasyonu atamalarını girdi olarak kullanmaktadır.

4.3. İR-MHYD Problemi için Önerilen Matematiksel Modelleme Yaklaşımı

İndisler ve kümeler

i, j	görev
c	kobot (c = 1, kobot atanmamışsa; c = 2, kobot atanmışsa)
h	işçi seviyesi/robot (h =1, 2, 3 işçi seviyesi; h = 4 robot)
s	iş istasyonu
T	görev kümesi
S	iş istasyonu kümesi
H	işçi seviyesi/robot kümesi
C	kobot kümesi
P_i	görev i'nin bitişik öncüllerinin kümesi

Parametreler

NT	görev sayısı
t_{ihc}	görev i'nin bir robota veya h seviyesinde bir işçiye kobotla/kobotsuz atandığı durumdaki işlem süresi
ml_h	h seviyesinde işçi/robot maliyeti
mlc	kobot maliyeti
$butce$	belirli bir dönemde işgören atamaları için bütçe
a_{is}	eğer görev i başlangıç durumda iş istasyonu s'ye atanmışsa 1; diğer durumlarda 0
beo	başlangıç ve yeni hattın görev-iş istasyonu atamaları açısından karşılaması gereken benzerlik oranı
r_{ihc}	görev i'nin bir robota veya h seviyesinde bir işçiye kobotla/kobotsuz atandığı durumdaki ergonomik riski
$enbrisk$	bir iş istasyonu için ergonomik risk sınırı

Karar değişkenleri

x_{ishc}	görev i istasyon s'de bir robota veya h seviyesinde bir işçiye kobotla/kobotsuz atanırsa 1; diğer durumlarda 0
y_{shc}	iş istasyonu s'ye bir robot veya h seviyesinde bir işçi kobotla/kobotsuz atanırsa 1; diğer durumlarda 0

b_i	görev i başlangıç ve yeni hat dengesinde aynı iş istasyonuna atanırsa 1; diğer durumlarda 0
NW_h	atanan h seviyesinde işçi sayısı
NR	atanan robot sayısı
NC	atanan kobot sayısı
CS	çevrim süresi
TM	toplam işgören maliyeti

İR-MHYD modeli

$$\sum_{s\epsilon S}\sum_{h<4}\sum_{c\epsilon C} x_{ishc} + \sum_{s\epsilon S} x_{is41} = 1 \quad \forall i \in T \tag{4.12}$$

$$\sum_{i\epsilon T}\sum_{h\epsilon H}\sum_{c\epsilon C} x_{ishc} \geq 1 \quad \forall s \in S \tag{4.13}$$

$$\sum_{h<4}\sum_{c\epsilon C} y_{shc} + y_{s41} \leq 1 \quad \forall s \in S \tag{4.14}$$

$$y_{s42} = 0 \quad \forall s \in S \tag{4.15}$$

$$\sum_{i\epsilon T} x_{ishc} \leq M * y_{shc} \quad \forall s \in S, h \in H, c \in C \tag{4.16}$$

$$\sum_{i\epsilon T}\sum_{h\epsilon H}\sum_{c\epsilon C} t_{ihc} * x_{ishc} \leq CS \quad \forall s \in S \tag{4.17}$$

$$\sum_{s\epsilon S}\sum_{h\epsilon H}\sum_{c\epsilon C} s * x_{ishc} \leq \sum_{s\epsilon S}\sum_{h\epsilon H}\sum_{c\epsilon C} s * x_{jshc} \quad \forall\, i,j \in T \mid i \in P_j \tag{4.18}$$

$$NW_h = \sum_{s\in S}\sum_{c\epsilon C} y_{shc} \quad \forall h \in H \mid h < 4 \tag{4.19}$$

$$NR = \sum_{s\in S} y_{s41} \tag{4.20}$$

$$NC = \sum_{s\in S}\sum_{h<4} y_{sh2} \tag{4.21}$$

$$TM = \sum_{h<4} ml_h * NW_h + ml_4 * NR + mlc * NC \tag{4.22}$$

$$TM \leq butce \tag{4.23}$$

$$\sum_{i\epsilon T}\sum_{h\epsilon H}\sum_{c\epsilon C} r_{ihc} * x_{ishc} \leq enbrisk \quad \forall s \in S \tag{4.24}$$

$$a_{is} * \sum_{h\epsilon H} \sum_{c\epsilon C} x_{ishc} = b_i \quad \forall i \in T, s \in S \mid a_{is} = 1 \tag{4.25}$$

$$\sum_{i\epsilon T} b_i \geq beo * NT \tag{4.26}$$

$$x_{ishc}, y_{shc}, b_i \epsilon \{0,1\} \quad \forall i \in T, s \in S, h \in H, c \in C \tag{4.27}$$

$$NW_h, NR, NC, CS, TM \geq 0 \quad \forall h \in H \tag{4.28}$$

kısıtları altında

$$enk\ z = CS \tag{4.29}$$

Kısıt (4.12), her görevin bir istasyona ve bir işgören türüne (bir işçiye, bir robota veya bir işçi ile beraber bir kobota) atanmasını garanti eder. Kısıt (4.13), her istasyona en az bir görevin atanmasını sağlar. Kısıt (4.14), her istasyona en fazla bir işgören türünün atanmasını kontrol eder. Kısıt (4.15), bir robotun ve kobotun istasyonlara birlikte atanmasını engeller. x_{ishc} ve y_{shc} değişkenleri arasındaki ilişki Kısıt (4.16) ile sağlanır. Burada M, yeterince büyük bir sayıdır ($\sum_{i\epsilon T} \sum_{h\epsilon H} \sum_{c\epsilon C} t_{ihc} < M$). Kısıt (4.17), her bir istasyonun toplam iş yükünün çevrim süresini aşmasını önler. Kısıt (4.18), görevler arasındaki öncelik ilişkilerini kurar. Kısıt (4.19)-(4.21) sırasıyla hatta atanan h seviyesinde işçi, robot ve kobot sayılarını belirler. Kısıt (4.22), toplam işgören maliyetini hesaplar. Kısıt (4.23), toplam işgören maliyetinin bütçeyi aşmamasını kontrol eder. Kısıt (4.24), bir istasyona atanan görevlerin ilgili istasyonda çalışan işgörene göre hesaplanan toplam ergonomik riskinin belirlenen sınır değeri aşmamasını garanti eder. Kısıt (4.25), görevlerin başlangıç ve yeni hat dengesinde aynı istasyona atanıp atanmadığını belirler. Kısıt (4.26), başlangıç ve yeni hat dengesindeki atamaların belirli bir oranda benzerlik göstermesini sağlar. Bu kısıt, istasyonu değişen görev sayısını sınırlandırır. Kısıt (4.27) ve (4.28), karar değişkenlerinin işaret kısıtlarıdır. Amaç fonksiyonu (4.29), çevrim süresinin enküçüklenmesidir.

4.4. Örnek Problem

İR-MHYD probleminin detaylı olarak açıklanması amacıyla Bowman (1960) çalışmasında sunulmuş olan ve 8 görevden oluşan bir örnek problem kullanılmıştır. İlgili çalışmada, BMHD problemi ele alındığından dolayı her göreve ait tek bir işlem süresi bulunmaktadır. Bu işlem süreleri, en kalifiye grup olan 1. seviyedeki işçilerin işlem süreleri olarak alınmış ve diğer işgörenlerin işlem süreleri probleme uygun şekilde türetilmiştir.

Örnek problemde, 3 iş istasyonu ve hiyerarşik yetenek seviyelerine ayrılan işçiler görev almaktadır. İşçilerin yanı sıra robotlardan ve kobotlardan faydalanmak istendiğinden, hat yeni işgören yapısına göre yeniden dengelenmelidir. Tüm görevlerin öncelik ilişkileri ve işgörenlere ait işlem süreleri Çizelge 4.1'de görülmektedir. H1, H2 ve H3 sırasıyla 1., 2. ve 3. seviye işçilikleri ve R robotu ifade etmektedir. C1, C2 ve C3 ise sırasıyla H1, H2 ve H3 işçileri ile kobotun iş birliğini göstermektedir. İlk sütunda, görev numaraları yer almaktadır. 2. sütunda görevlerin bitişik öncülleri, sonraki üç sütunda farklı seviyelerdeki işçilerin işlem süreleri verilmiştir. 6. sütunda, her görevin işçiler açısından en büyük işlem süreleri sunulmuştur. Bu değerler, başlangıç hat dengesi modelinde NCS değerini hesaplamak için kullanılmaktadır. 7. sütunda, robotun işlem süreleri ve son üç sütunda ise ilgili seviyelerdeki işçilerin yanına birer kobot atanması durumundaki işlem süreleri bulunmaktadır. "X" ile ifade edilen değerler, görevin ilgili işgören türü tarafından yerine getirilemediğini göstermektedir. Örnek problemde, aynı görev için işgörenlerin işlem sürelerinin Robot>İşçi>İşçi-kobot iş birliği şeklinde olduğu varsayılmıştır. 5. görevin robot veya kobotla gerçekleştirilmeye uygun olmadığı ve 8. görevin ise robot tarafından yapılamazken kobot yardımıyla yerine getirilebildiği ele alınmıştır.

Çizelge 4.1. Örnek problem için öncelik ilişkileri ve işlem süreleri

Görev	Öncül	H1	H2	H3	$max\{t_{ih}^0\}$	R	C1	C2	C3
T1	-	11	X	X	11	37	7	11	17
T2	T1	17	X	X	17	57	11	17	26
T3	T2	9	14	X	14	30	6	9	14
T4	T2	5	8	X	8	17	3	5	8
T5	T3	8	12	18	18	X	X	X	X
T6	T3, T4	12	18	27	27	41	8	12	18
T7	T5	10	15	23	23	34	7	10	15
T8	T6	3	5	7	7	X	2	3	5
					$\Sigma = 125$				
					$NCS = 42$				

Çizelge 4.2'de, tüm işgörenler bazında görevlerin ergonomik risk değerleri verilmiştir. Risk değerleri, 0 ile 10 arasında tamsayı değerlerle ifade edilmiştir. Robotun tüm görevler için ergonomik riskinin 0 olduğu, işçilerin kobot ile iş birliği halinde olduğu

durumda ergonomik riskin işçinin tek başına çalışmasına kıyasla düştüğü varsayılmıştır. Çizelge 4.2'de işçiler bazında her bir görev için ortalama risk seviyeleri 5. sütunda, tüm işgörenler bazında ortalama risk seviyeleri ise 10. sütunda verilmiştir. Sisteme robotlar ve kobotlar dahil edildiğinde görevlerin ortalama risk seviyeleri düştüğünden dolayı hattın ergonomik riskini düşürmek mümkün hale gelmektedir. Her bir istasyon için toplam ergonomik riskin üst sınırı hesaplanırken, ilgili durumda hatta bulunan işgören türleri bazında her görev için ortalama risk değerlerinin toplamı kullanılır. Elde edilen toplam, istasyon sayısına oranlanarak riskin üst sınırı belirlenir. Örnek problemde, riskin üst sınırı sadece işçilerin bulunduğu durumda 17 birim iken tüm işgörenler bazında 12 birimdir. Hattın ergonomik riski, riski en yüksek istasyonun risk değerine eşittir. Her bir istasyonun riski, ilgili istasyondaki görevlerin o istasyonun işgöreni açısından risk değerlerinin toplamıyla elde edilir.

Çizelge 4.2. Örnek problem için ergonomik risk değerleri

Görev	H1	H2	H3	Ortalama (H)	R	C1	C2	C3	Ortalama (HRC)
T1	7	X	X	7,00	0	2	4	5	3,60
T2	5	X	X	5,00	0	4	6	8	4,60
T3	5	6	X	5,50	0	1	2	4	3,00
T4	5	6	X	5,50	0	3	5	6	4,17
T5	6	8	10	8,00	X	X	X	X	8,00
T6	4	5	7	5,33	0	1	2	6	3,57
T7	7	8	10	8,33	0	1	3	8	5,29
T8	5	6	8	6,33	X	1	2	3	4,17
				$\Sigma = 50,99$					$\Sigma = 36,39$
				$enbrisk = 17$					$enbrisk = 12$

Çizelge 4.3'te, tüm işgörenlerin maliyetleri yer almaktadır. Bu değerler, işgörenlerin işe alınması/satın alınması ile ilgili maliyetleri değil, belirli bir dönemde hatta çalışmaları sebebiyle ortaya çıkan maliyetleri ifade etmektedir. İşçilerin yanına kobotların atanması durumunda, işçi maliyetine kobot maliyetinin eklendiği dikkate alınmıştır. Bir istasyona bir H1 işçisi ve bir kobot atanırsa, bu istasyonun işgören maliyeti 134 (100+34) birim olmaktadır. Benzer şekilde, bir H2 işçisi ve bir kobotun maliyeti 104 (70+34) birim ve bir H3 işçisi ve bir kobotun maliyeti ise 83 (49+34) birimdir.

Çizelge 4.3. Örnek probleme ait işgören maliyetleri

İşgören	H1	H2	H3	R	C
Maliyet	100	70	49	34	34

Yalnızca işçilerin çalıştığı başlangıç durumdaki görev-iş istasyonu atamalarını elde etmek için Bölüm 4.2'de sunulan başlangıç hat dengesi modeli kullanılmıştır. Bu modelde, w_1 ve w_2 değerleri 0,50 olarak alınmıştır. NCS ve NIM parametrelerinin değerleri sırasıyla 42 ve 300 iken $enbrisk$ değeri ise 17'dir. İlk hat dengesine ait sonuçlar Çizelge 4.4'te yer almaktadır.

Çizelge 4.4. Başlangıç atamalar

İstasyon	S1	S2	S3
İşçi seviyesi	H1	H1	H1
Görevler	T1 T2	T3 T4 T5	T6 T7 T8
Ergonomik risk	12	16	16
İstasyon yükü	28	22	25

Başlangıç hattın görev-iş istasyonu atamaları İR-MHYD modeline girdi olarak verilmektedir. Başlangıç ve yeni hattın karşılaması gereken minimum benzerlik oranı (beo) 0,50 olarak alınmıştır. Bütçenin sonuçlar üzerindeki etkisini görmek amacıyla 5 farklı bütçe değeri seçilmiştir. Çizelge 4.5'te ilk sütunda, bütçe kısıtının sağ taraf sabiti olarak belirlenen bütçe değeri bulunmaktadır. 2. ve 3. sütunlarda, sırasıyla ilgili bütçe değeri için elde edilen çözümün toplam işgören maliyeti (TM) ve çevrim süresi (CS) görülmektedir. 4. sütunda hattın ergonomik riski (ER), 5.-7. sütunlar ise hattaki istasyonlara kobot olmadan tek başına atanan farklı seviyelerdeki işçilerin sayılarını ifade etmektedir. 8. sütun, bu üç sütundaki değerlerin toplamından oluşmaktadır ve hatta tek başına çalışan işçilerin sayısını göstermektedir. 9. sütunda ise atanan robot sayısı bulunmaktadır. 10.-12. sütunlarda, işçilerin ve kobotun aynı istasyonda çalıştığı istasyonların sayısı iş birliği yapılan işçi seviyeleri bazında verilmiştir. Son sütunda, hatta atanan toplam kobot sayısı görülmektedir.

Çizelge 4.5. Örnek problem için elde edilen sonuçlar

Bütçe	TM	CS	ER	H1	H2	H3	ΣH	R	C1	C2	C3	ΣC
200	187	124	12	0	0	1	1	1	0	1	0	1
250	232	37	12	0	0	2	2	0	1	0	0	1
300	287	27	10	0	0	1	1	0	1	1	0	2
350	317	24	10	0	0	1	1	0	2	0	0	2
400	368	20	11	1	0	0	1	0	2	0	0	2

Sisteme robotların ve kobotların dahil olmasıyla, tüm bütçe durumları için başlangıç duruma göre ergonomik risk değeri düşmüştür. Robotlar/kobotlar tüm görevler konusunda yetenekli olmadığından, her durumda montaj hattında tek başına çalışan en az bir işçi bulunmaktadır. En kalifiye işçi grubu olan H1 işçilerinin tek başına ve kobotla iş birliği halinde atanma sayısının, bütçe değeri arttıkça yükseldiği görülmektedir. Robotlar ise bütçenin en düşük olduğu durumda kullanılmıştır. Bunun sebebi, bütçe kısıtına uyabilmek için daha az maliyetli işgörenlerin kullanılmak zorunda olmasıdır. Bütçe arttıkça, daha yüksek maliyetli ve hızlı işgörenler kullanılabilmektedir. Bütçenin düşük olduğu durumlarda yüksek, yüksek olduğu durumlarda ise düşük çevrim süresi değerleri elde edilmektedir. Dolayısıyla, bütçenin değişimi çevrim süresini etkilemektedir.

4.5. Önerilen Algoritma

4.5.1. Yapay arı kolonisi algoritmasının temel özellikleri

MHD problemlerinin çekirdeğini oluşturan BMHD için dahi, problem boyutundaki artışa bağlı olarak kesin yöntemlerle optimal çözüme ulaşmak için gereken hesaplama süresi üstel şekilde artış göstermektedir (Battaïa ve Dolgui, 2013). Dolayısıyla, BMHD'den daha fazla atama kararı içeren ve daha karmaşık bir yapıya sahip olan İR-MHYD problemi de NP (Nondeterministic Polynomial Time)-zor problem sınıfına girmektedir ve problem boyutu büyüdükçe yaklaşık çözüm veren yaklaşımların kullanımı kaçınılmaz hale gelmektedir.

Büyük ölçekli operasyonlar söz konusu olduğunda, kaynakların doğru şekilde kullanılmasını ve faydanın en üst düzeye çıkarılmasını sağlamak için metasezgisel algoritmalar güçlü, esnek, uyarlanabilir ve geniş arama kapasitesine sahip optimizasyon

araçları olarak ortaya çıkmıştır. Bu yöntemler, problem karmaşıklığı ve boyutu arttıkça kesin çözüm yöntemlerinin yetersiz kaldığı noktalarda makul süreler içinde olurlu çözümler elde etmeye yarar. Her yıl otuzun üzerinde metasezgisel geliştirilmesine karşın yeni nesil algoritmaların birçoğu YAK algoritması, parçacık sürüsü optimizasyon algoritması, karınca sürüsü optimizasyon algoritması, diferansiyel evrim algoritması ve genetik algoritma gibi temel yaklaşımlar ile benzerlik göstermektedir (Rajwar, vd., 2023).

Bu çalışmada, İR-MHYD probleminin çözümü için YAK algoritması tabanlı bir yaklaşım önerilmektedir. Farklı türde kısıtlar içeren İR-MHYD için komşuluk tabanlı bir yöntemin kullanılması, kısıtlarla başa çıkma konusunda avantaj sunmaktadır. YAK algoritması, az sayıda kontrol parametresine sahip olması nedeniyle uygulama kolaylığı sağlayan pratik bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, MHD problemleri bağlamında literatürde yüksek kaliteli çözümler üretebilme potansiyeliyle tanınmaktadır.

YAK algoritması, Karaboğa (2005) tarafından literatüre kazandırılan bir sürü zekası optimizasyon algoritması olup arı sürülerinin doğada besin arama davranışına öykünerek geliştirilmiştir. Bu algoritmada; safhalara adını veren görevli, gözcü ve kaşif arılar bulunmaktadır. Besin kaynakları çözümleri temsil etmekte ve bir çözümün başarısı ilgili kaynağın kalitesini göstermektedir.

YAK algoritması, arama uzayında kaşif arıların rassal olarak besin kaynaklarını araması ile başlar. Ardından, görevli arılar mevcut besin kaynaklarının komşularına giderek daha kaliteli kaynaklar bulmaya çalışır. Görevli arılar, bu kaynaklar hakkında edindikleri bilgileri gözcü arılar ile paylaşır ve gözcüler, kaliteli kaynakların komşuluklarında arama yapmaya devam eder. En başarılı kaynak hafızada tutulur ve daha kaliteli bir kaynak bulunduğunda güncelleme yapılır. Bir kaynağın komşuluğunda belirli sayıda ardışık denemenin ardından daha başarılı kaynaklar bulunamıyorsa, mevcut kaynak terk edilir ve kaşifler, bu kaynağın yerine yeni bir kaynak arayışına girer. Durma koşulu sağlanana kadar görevli arı safhasından itibaren yeni bir döngü başlar.

4.5.2. Hiper-matsezgisel yapay arı kolonisi algoritması

Metasezgisel algoritmaların başarısı, uygulandıkları problemin yapısal özelliklerine ve seçilen parametre değerlerine büyük ölçüde bağlıdır. Bu bağlamda, YAK algoritması yerel eniyiye takılma eğilimi gösterebilmektedir. Çözüm uzayının farklı bölgelerine erişebilmek amacıyla algoritmaya çeşitli mekanizmalar eklenmesi, algoritma performansını önemli ölçüde iyileştirebilmektedir. Bu çalışmada önerilen algoritma, çözüm kalitesi ve hesaplama süresi açısından performansı artırmak amacıyla literatürde bilinen temel yapay arı kolonisi (T-YAK) algoritmasına aşağıdaki özellikler eklenerek geliştirilmiştir:

- İşgören atamalarında matematiksel programlamanın kullanılması
- Komşuluk yapılarının başarısına göre seçim olasılıklarının belirlenmesi
- Mevcut çözümden daha kötü komşu çözümlerin belirli bir oranda kabul edilebilmesi
- Popülasyondaki en iyi çözümün ardışık deneme sınırı aşılsa bile terk edilmemesi
- Terk edilen çözümlerin, sıfırdan bulunan bir çözümle veya popülasyondaki en iyi çözümün bir komşusuyla değiştirilmesi
- Popülasyondaki en iyi çözümün amaç fonksiyonu değerini iyileştirebilecek daha iyi işgören atamaları bulabilmek için matematiksel programlamanın kullanıldığı işgören güncelleme safhasının bulunması

Çeşitli aşamalarda matematiksel programlamanın kullanımı ve algoritmanın komşuluk yapılarını seçme olasılıklarını puanlamaya dayalı olarak belirleme yeteneği, geliştirilen algoritmaya hem bir matsezgisel hem de bir hiper-sezgisel olma özelliği kazandırmıştır. Böylelikle, bir metasezgisel olan YAK algoritması, bir hiper-matsezgisel çözüm yöntemi haline gelmiştir. Önerilen algoritma, hiper-matsezgisel yapay arı kolonisi (HM-YAK) algoritması olarak isimlendirilmiştir. Bu çalışmada, MHD literatüründe bilindiği kadarıyla ilk kez bir hiper-matsezgisel yaklaşım sunulmaktadır.

Ele alınan İR-MHYD probleminde, görevler ve işgörenler ile ilgili iki farklı atama kararı verilmektedir. İşgören atamalarını sezgisel olarak gerçekleştirmeye çalışmak, bu kısıtları karşılayabilecek çeşitli kombinasyonların denenmesi için uzun zaman gerektirebilmektedir. Algoritmanın işgörenlerin istasyonlara tahsisinde matematiksel

programlamadan yararlanması; görev-işgören uygunluğu, ergonomik risk ve bütçe kısıtlarının tamamını sağlayan atamaların mümkün olup olmadığını belirlemeyi ve farklı alternatifler arasından çevrim süresini enküçükleyeni seçmeyi amaçlamaktadır. İşgören atamalarının matematiksel modelleme ile yapılması, çözüm süresi ve kalitesi açısından avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, önerilen algoritmaya dahil edilen işgören güncelleme safhasında da matematiksel programlamadan faydalanılmaktadır.

HM-YAK algoritmasında, matematiksel model ve metasezgisel iç içe çalıştığından ve iki farklı yöntem tek bir çözüm çerçevesinde birleştiğinden dolayı bu algoritma, entegrasyon türüne göre sıkı entegrasyonlu bir matsezgisel olarak sınıflandırılabilir. HM-YAK, görev atamalarının belirli olduğu durumda işgören atamalarını matematiksel modelleme yoluyla yaptığından, uygulama yöntemine göre ayrıştırmaya dayalı bir yaklaşımdır.

Alt seviye sezgisellerin seçimini veya üretimini otomatikleştiren hiper-sezgisellere arama sürecinden elde edilen geri bildirimlerin kullanımı yoluyla çeşitli öğrenme mekanizmaları eklenebileceği bilinmektedir. Burke vd. (2013), bir dizi olası komşuluk yapısı söz konusu olduğunda karar verme sürecini geliştirmek için sezgisel seçim sürecinde performansa dayalı bir puanlama sistemi kullanılabileceğini ve bu değerlerin her adımda çözüme uygulanacak sezgiseli seçmek için sistematik bir şekilde işlenebileceğini ifade etmiştir. Bu doğrultuda, önerilen HM-YAK algoritmasına komşuluk yapılarının başarısına dayalı bir öğrenme mekanizması eklenmiştir. Algoritma, komşuluk yapılarına puan verir ve bu yapıları seçerken rulet tekeri stratejisini uygulayarak arama süreci boyunca daha yüksek puan alan yapıların daha yüksek olasılıkla seçilmesini sağlar. Dolayısıyla, HM-YAK algoritması, öğrenme sürecinde kullanılan geri bildirim kaynağına göre çevrimiçi öğrenmeye dayalı olarak çalışmaktadır. Önerilen algoritma, mevcut çözümlerin iyileştirilmesine yönelik pertürbatif alt seviye sezgiseller olan komşuluk yapılarının adaptif bir biçimde seçilmesini sağladığından dolayı sezgisel arama uzayının doğasına göre sezgisel seçimine dayalı bir hiper-sezgiseldir.

Özetle, İR-MHYD probleminin çözümü için geliştirilen HM-YAK algoritması; kesin çözüm yöntemlerinin, metasezgisellerin, matsezgisellerin ve adaptif yapıya sahip hiper-sezgisellerin belirli özelliklerini taşımakta ve faydalı yönlerini bütünleştirmektedir.

4.5.2.1. Temel kontrol parametreleri

Önerilen algoritmada kullanılan kontrol parametreleri *besin kaynağı sayısı*, *limit* ve *maksimum nesil başarısızlık sayısıdır*. *Besin kaynağı sayısı*, çözüm popülasyonunun büyüklüğünü temsil eder. Bir çözüm, *limit* parametresinin değerinden daha fazla ardışık denemeden sonra iyileştirilemezse, o çözüm terk edilir ve yeni bir çözüm bulunur. Bu çalışmada, bir çözüm için ardışık deneme sayısının limiti aşıp aşmadığı, *çözüm başarısızlık sayısı* adı verilen bir sayaçla kontrol edilmektedir. Yeni bulunan çözüm için bu sayacın değeri başlangıçta sıfırlanır. Mevcut en iyi çözümün ardışık kaç iterasyondur gelişmediği, *nesil başarısızlık sayısı* sayacında tutulur. Her iterasyon sonunda, mevcut en iyi çözümün güncellenip güncellenmediği kontrol edilir. Mevcut en iyi çözüm, *maksimum nesil başarısızlık sayısı* parametresinin değeri kadar ardışık iterasyondan sonra iyileştirilmezse algoritma sona erer.

4.5.2.2. Çözümlerin gösterimi

Önerilen algoritmada çözüm vektörü, tamsayı elemanlardan oluşan iki parçalı bir yapıdadır. İlk parça, görev sayısı kadar elemana sahiptir ve her bir görevin atandığı iş istasyonunu gösterir. İkinci parçanın uzunluğu ise iş istasyonu sayısına eşittir ve hangi istasyona hangi tür işgörenin atandığını ifade eder. 1, 2 ve 3 değerleri işçi seviyelerini, 4 değeri robotu, 5, 6 ve 7 değerleri ise bir kobot ile sırasıyla 1., 2. ve 3. seviyelerdeki işçilerin iş birliğini temsil etmektedir.

8 görev ve 3 iş istasyonundan oluşan bir problem için örnek bir çözüm vektörü Şekil 4.1'de görülmektedir. Bu örnekte; T1, T2 ve T4 görevleri S1 istasyonunda, T3 ve T5 görevleri S2 istasyonunda, T6, T7 ve T8 görevleri ise S3 istasyonunda yer almaktadır. S1 istasyonuna bir robot, S2 istasyonuna 1. seviyeden bir işçi ve S3 istasyonuna ise 2. seviyeden bir işçi ve kobot birlikte atanmıştır.

1	1	2	1	2	3	3	3	4	1	6
T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	S1	S2	S3

Şekil 4.1. Örnek çözüm vektörü

4.5.2.3. Başlangıç çözümlerin oluşturulması

Önerilen algoritma, besin kaynağı kadar çözümün üretilmesiyle başlar. Bir başlangıç çözümü elde etmek için öncelik ilişkilerine uygun olarak bir atama sırası oluşturulur. Bir sıra oluşturulurken, tüm öncülleri zaten sıraya eklenmiş olan veya öncülü olmayan aday görevler kümesi belirlenir. Bu kümede birden fazla aday varsa, aralarından rassal olarak bir tanesi seçilir ve seçilen görev sıraya eklenir. Daha sonra, bu kümenin elemanları güncellenir. Aynı işlem tüm görevler sıralanana kadar devam eder. Atama sırası oluşturulduktan sonra her bir iş istasyonuna atanacak olan görev sayısı rassal şekilde seçilir. Bu adımda, tüm istasyonlardaki görev sayılarının toplamının ilgili problemdeki toplam görev sayısına eşit olması sağlanır. Daha sonra, her bir istasyona belirlenen sayıda görev, oluşturulan atama sırası dikkate alınarak atanır. Böylelikle, her görevin bir iş istasyonuna atanmasına ve öncelik ilişkilerinin sağlanmasına ilişkin kısıtların garanti edildiği görev-iş istasyonu atamaları elde edilir. Bu aşamada, benzerlik kısıtının sağlanması zorunlu değildir.

Görevlerin atanacağı istasyonlar belirlendikten sonra, işgörenleri istasyonlara atamak için matematiksel programlama kullanılır. Ergonomik risk, görev-işgören uygunluğu ve bütçe kısıtları göz önünde bulundurularak ilgili görev atamaları için mümkün olan en iyi işgören atamaları, işgören atama modeli ile belirlenir. Modelin notasyonları, kısıtları ve amaç fonksiyonu aşağıda sunulmuştur.

İndisler ve kümeler

s	iş istasyonu
o	işgören türü (o = 1, 2, 3 işçi seviyesi; o = 4 robot; o = 5, 6, 7 belirli seviyedeki bir işçi ile kobotun iş birliği)
S	iş istasyonu kümesi
O	işgören türü kümesi

Parametreler

$load_{so}$	o türünde bir işgören s istasyonuna atandığında o iş istasyonunun toplam iş yükü
$risk_{so}$	o türünde bir işgören s istasyonuna atandığında o iş istasyonunun toplam ergonomik riski

$enbrisk$	bir istasyon için ergonomik riskin üst sınırı
$cost_o$	o türünde işgören maliyeti
$butce$	işgören atamaları için ilgili dönemdeki bütçe

Karar değişkenleri

v_{so}	o türünde bir işgören s istasyonuna atanırsa 1; diğer durumlarda 0
CS	çevrim süresi
TM	toplam işgören maliyeti

İşgören atama modeli

$$\sum_{o \in O} v_{so} = 1 \quad \forall s \in S \tag{4.30}$$

$$\sum_{o \in O} load_{so} * v_{so} \leq CS \quad \forall s \in S \tag{4.31}$$

$$TM = \sum_{s \in S} \sum_{o \in O} cost_o * v_{so} \tag{4.32}$$

$$TM \leq butce \tag{4.33}$$

$$\sum_{o \in O} risk_{so} * v_{so} \leq enbrisk \quad \forall s \in S \tag{4.34}$$

$$v_{so} \in \{0,1\} \ \forall s \in S, o \in O \tag{4.35}$$

$$CS, TM \geq 0 \tag{4.36}$$

kısıtları altında

$$enk\ z = CS \tag{4.37}$$

Kısıt (4.30), her istasyona bir işgören türünün atanmasını sağlar. Kısıt (4.31), her bir istasyonun toplam iş yükünün çevrim süresini aşmamasını kontrol eder. Kısıt (4.32), toplam işgören maliyetini hesaplar. Kısıt (4.33), toplam işgören maliyetinin bütçeden yüksek olmamasını garanti eder. Kısıt (4.34), her bir istasyonun toplam ergonomik riskinin belirlenen sınırı aşmamasını sağlar. Kısıt (4.35) ve (4.36), karar değişkenlerinin işaret kısıtlarıdır. Amaç fonksiyonu (4.37), çevrim süresinin enküçüklenmesidir.

Belirlenen görev atamaları için ergonomik risk, görev-işgören uygunluğu ve bütçe kısıtlarını sağlayan işgören atamaları yapmak mümkün değilse, atama sırası oluşturma aşamasına dönülür ve benzerlik kısıtı haricindeki kısıtlara uyan bir çözüm bulununcaya kadar aynı adımlar tekrarlanır. İlgili kısıtları sağlayan bir çözüm bulunduğunda, benzerlik kısıtına uyup uymadığı kontrol edilir. Uymaması durumunda, çözümün amaç fonksiyonuna üst limitin aşılması ile doğru orantılı bir ceza değeri eklenir. *Besin kaynağı sayısı* kadar sayıda başlangıç çözüm elde edildiğinde bu safha sonlanır. Başlangıç çözüm oluşturma safhasının sözde-kodu Şekil 4.2'de verilmiştir.

```
Çözüm sayısı = 1
While Çözüm sayısı < Besin kaynağı sayısı
    Öncelik ilişkilerine uygun bir atama sırası oluştur
    İstasyonlara atanacak görev sayılarını rassal olarak belirle
    Atama sırasını gözeterek istasyonlara belirlenen sayılarda görev ata
    If Tüm görevler istasyonlara atandıysa
        Matematiksel programlama ile istasyonlara işgören ataması yap
        If Uygun bir işgören ataması yapılabiliyorsa
            If Benzerlik kısıtı sağlanmıyorsa
                Amaç fonksiyonunu cezalandır
            End If
            Mevcut çözümü popülasyona ekle
            Çözüm başarısızlık sayacı (çözüm) = 0
            Çözüm sayısı = Çözüm sayısı + 1
        Else
            Atama sırası oluşturma adımına dön
        End If
    End If
End While
Popülasyondaki en iyi çözümü belirle ve hafızada tut
```

Şekil 4.2. Başlangıç çözüm oluşturma safhasının sözde-kodu

4.5.2.4. Görevli arı safhası

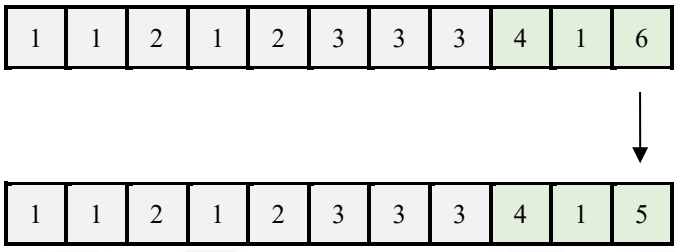
Görevli arı safhasında, popülasyondaki her bir çözüm için birer komşu çözüm bulunur. Algoritmada; bir görevin başka bir istasyona taşınmasına, iki istasyon arasında görev takasına, bir istasyonun işgöreninin değişimine ve iki istasyon arasında işgören takasına dayanan 13 farklı komşuluk yapısı bulunmaktadır (Çizelge 4.6).

Çizelge 4.6. Algoritmada kullanılan komşuluk yapıları

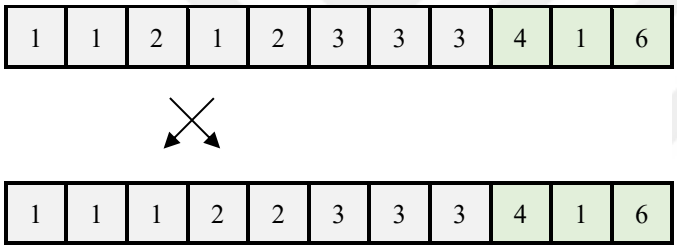
No	Komşuluk yapısı	Açıklama
1	Taşıma-1	Yükü en yüksek olan istasyondan seçilen bir görevin mümkün olan en az yüklü istasyona taşınması
2	Taşıma-2	Yükü en yüksek olan istasyondan seçilen bir görevin farklı bir istasyona taşınması
3	Taşıma-3	Rassal olarak seçilen bir görevin farklı bir istasyona taşınması
4	Taşıma-4	Ergonomik riski en yüksek istasyondan seçilen bir görevin mümkün olan en düşük riskli istasyona taşınması
5	Değişim-1	Yükü en yüksek olan istasyonun işgöreninin değiştirilmesi
6	Değişim-2	Rassal olarak seçilen bir istasyonun işgöreninin değiştirilmesi
7	Değişim-3	Yükü en düşük olan istasyonun işgöreninin değiştirilmesi
8	Takas-1	Yükü en yüksek olan istasyon ile mümkün olan en az yüklü istasyon arasında görev takası yapılması
9	Takas-2	Yükü en yüksek olan istasyon ile farklı bir istasyon arasında görev takası yapılması
10	Takas-3	Yükü en düşük olan istasyon ile farklı bir istasyon arasında görev takası yapılması
11	Takas-4	Yükü en yüksek olan istasyon ile farklı bir istasyon arasında işgören takası yapılması
12	Takas-5	Rassal olarak seçilen bir istasyon ile farklı bir istasyon arasında işgören takası yapılması
13	Takas-6	Yükü en düşük olan istasyon ile farklı bir istasyon arasında işgören takası yapılması

Komşu çözümlerin bulunmasında; öncelik ilişkileri, ergonomik risk, görev-işgören uygunluğu ve bütçe kısıtları dahil olmak üzere çeşitli hususların dikkate alınması gerekmektedir. Bu kısıtları ihlal eden hareketlere izin verilmemektedir. Bir görevin, öncüllerinin atandığı istasyonlardan daha önce gelen veya ardıllarının atandığı istasyonlardan daha sonra gelen istasyonlara atanması mümkün değildir. Ayrıca, görevler yalnızca işgörenlerin görevi yerine getirebilecek yeteneğe sahip olduğu ve görevin taşınması sonucunda risk sınırının aşılmayacağı istasyonlara taşınabilir (veya bu istasyonlar arasında takas edilebilir). İşgörenlerin değiştirilmesi (veya takas edilmesi) ile ilgili komşuluk

yapılarında, işgörenin o istasyondaki tüm görevleri yerine getirebileceği, riskin aşılmayacağı ve bütçe kısıtına uyulacağı garanti edilir. Benzerlik kısıtının ihlal edilmesi durumunda ise başlangıç çözümlerin elde edilmesi aşamasında kullanılan ceza fonksiyonu uygulanır. Şekil 4.3'te ve Şekil 4.4'te sırasıyla bir istasyonun işgöreninin değişimi ve iki istasyon arasında görev takası yapılması örneklendirilmiştir.



Şekil 4.3. S3 istasyonunda işgören değişimi



Şekil 4.4. T3 ve T4 görevlerinin karşılıklı istasyonlarının değişimi

HM-YAK algoritmasının hiper-sezgisel olma özelliği, komşuluk yapıları seçilirken kullanılan olasılıkların algoritma tarafından belirlenmesinden gelmektedir. Bu yapıların tamamına başlangıçta 1 puanı verilir. Bir çözümün komşusunu bulmak için rulet tekeri seçim yöntemi kullanılarak havuzdan (Bkz. Çizelge 4.6) bir yapı seçilir. Ardından, seçilen yapı mevcut çözüme uygulanır. İlgili komşuluk yapısıyla bir komşu çözüm elde edilemiyorsa aynı yaklaşımla yeni bir yapı seçilir ve seçilen yapı ilgili çözüme uygulanır.

Algoritmada; komşu çözümün amaç fonksiyonu değeri mevcut çözümünkinden daha iyiyse, komşu çözüm mevcut olanın yerini alır, o çözüm için *çözüm başarısızlık sayacı* sıfırlanır ve kullanılan komşuluk yapısının puanı bir birim artırılır. Bu puanlara göre komşulukların seçim olasılığı belirlenir. Böylelikle, çözümleri iyileştirme potansiyeli daha fazla olan yapılar daha yüksek olasılıkla seçilir.

T-YAK algoritmasında mevcut çözümden daha kötü olan tüm komşular reddedilir. HM-YAK algoritmasında ise yerel eniyiye takılmamak için belirli bir oranda daha kötü komşu çözümler de kabul edilebilmektedir. Eğer komşu çözüm kabul kriterlerini karşılamıyorsa, mevcut çözüm korunur ve *çözüm başarısızlık sayacı* bir birim artırılır. Aksi takdirde, komşu çözüm mevcut çözümün yerini alır ve sayacın değeri sıfırlanır. Aynı adımlar popülasyondaki tüm çözümler için tekrarlanır. Görevli arı safhasının sözde-kodu Şekil 4.5'teki gibidir.

```
For çözüm = 1:Besin kaynağı sayısı
    Komşuluk yapılarının puanlarına göre rulet tekeri yöntemi ile bir komşuluk yapısı seç
    Seçilen yapıyı ilgili çözüme uygula
    If Komşu çözüm kabul kriterini sağlıyorsa
        Çözümü güncelle
        Çözüm başarısızlık sayacı (çözüm) = 0
        If Komşu çözüm mevcut çözümden daha iyiyse
            Komşuluk puanı (yapı) = Komşuluk puanı (yapı) + 1
        End If
        If Yeni mevcut çözüm popülasyondaki en iyi çözümse
            Popülasyondaki en iyi çözümü güncelle
        End If
    Else
        Çözüm başarısızlık sayacı (çözüm) = Çözüm başarısızlık sayacı (çözüm) + 1
    End If
End For
```

Şekil 4.5. Görevli arı safhasının sözde-kodu

4.5.2.5. Gözcü arı safhası

Gözcü arı safhasında, görevli arı safhasından farklı olarak popülasyondaki her bir çözüm için değil, ikili turnuva seçimi ile belirlenen çözümlerin komşuluğunda çözümler aranır. Öncelikle, popülasyondan rassal olarak iki çözüm seçilir ve amaç fonksiyonu değeri daha iyi olan çözüm için komşu aranır.

Bu safhada kullanılan komşuluk yapıları, komşuluk yapısı seçim ve kabul mekanizmaları, görevli arı safhasındakiler ile aynıdır. Bu işlem, *besin kaynağı sayısı* kadar tekrar edilir. Gözcü arı safhasının sözde-kodu Şekil 4.6'da sunulmuştur.

```
For sıra = 1:Besin kaynağı sayısı
    İkili turnuva seçimi ile popülasyondan bir çözüm seç
    Komşuluk yapılarının puanlarına göre rulet tekeri yöntemi ile bir komşuluk yapısı seç
    Seçilen yapıyı ilgili çözüme uygula
    If Komşu çözüm kabul kriterini sağlıyorsa
        Çözümü güncelle
        Çözüm başarısızlık sayacı (çözüm) = 0
        If Komşu çözüm mevcut çözümden daha iyiyse
            Komşuluk puanı (yapı) = Komşuluk puanı (yapı) + 1
        End If
        If Yeni mevcut çözüm popülasyondaki en iyi çözümse
            Popülasyondaki en iyi çözümü güncelle
        End If
    Else
        Çözüm başarısızlık sayacı (çözüm) = Çözüm başarısızlık sayacı (çözüm) + 1
    End If
End For
```

Şekil 4.6. Gözcü arı safhasının sözde-kodu

4.5.2.6. Kaşif arı safhası

Kaşif arı safhasında, her bir çözüme ait *çözüm başarısızlık sayacı* kontrol edilir. *Çözüm başarısızlık sayacının* değeri, *limit* parametresinin değerini aşan çözümler terk edilir. Terk edilen çözümlerin yerine yeni birer çözüm bulunur ve popülasyona eklenir.

T-YAK algoritmasında, terk edilen çözümlerin yerine sıfırdan birer çözüm bulunmaktadır. Ancak, bu durum popülasyondaki başarılı çözümlerin kaybolmasına neden olabilir. Başlangıç çözümler, görev atamaları açısından rassallık içerdiğinden dolayı genellikle çok iyi değerlere sahip olmadığından popülasyon kalitesi düşebilir.

Önerilen HM-YAK algoritmasında, terk edilen bir çözümün yerine belirli bir olasılıkla ya başlangıç çözüm oluşturma safhasındaki gibi sıfırdan bir çözüm bulunur veya görevli ve gözcü arı safhalarında kullanılan komşuluk yapılardan biri uygulanarak popülasyondaki en iyi çözümün bir komşusu popülasyona dahil edilir.

Bu safhada, terk edilen bir çözümün yerine sıfırdan bir çözüm üretilecekse, başlangıç çözüm oluşturma aşamasındaki adımlar takip edilir. Aksi takdirde, Çizelge 4.6'daki yapılardan biri rassal şekilde seçilir ve popülasyondaki en iyi çözüme uygulanır. Elde edilen çözüm terk edilenin yerini alır ve çözümün *çözüm başarısızlık sayacı* sıfırlanır. Eğer ilgili

komşuluk yapısıyla olurlu bir çözüm bulunamazsa, rassal olarak yeni bir komşuluk yapısı seçilir ve seçilen yapı uygulanır.

HM-YAK algoritmasında, popülasyondaki en iyi çözüm değerine sahip çözümün(lerin) *çözüm başarısızlık sayacının* değeri, *limit* parametresinin değerini aşsa dahi terk edilmez. Bu sayede, popülasyondaki başarılı çözümleri korurken çeşitliliği de sağlayarak kaliteli çözümlere hızlı bir şekilde ulaşılması hedeflenir. Kaşif arı safhasının sözde-kodu Şekil 4.7'de verilmiştir.

```
For çözüm = 1:Besin kaynağı sayısı
    If Çözüm başarısızlık sayacı (çözüm) > Limit
        If Çözüm popülasyondaki en iyi çözüm değerine sahipse
            Çözüm başarısızlık sayacı (çözüm) = 0
        Else
            Çözümü terk et
            r = (0-1 arasında rassal bir sayı)
            If r ≤ Rassal çözüm bulma olasılığı
                Sıfırdan yeni bir çözüm bul
                Mevcut çözüm = Yeni çözüm
            Else
                Rassal olarak bir komşuluk yapısı seç
                Seçilen yapıyı kullanarak popülasyondaki en iyi çözümün bir komşusunu bul
                Mevcut çözüm = En iyi çözümün komşusu
            End If
            Çözüm başarısızlık sayacı (çözüm) = 0
            If Yeni çözüm popülasyondaki en iyi çözümse
                Popülasyondaki en iyi çözümü güncelle
            End If
        End If
    End If
End For
```

Şekil 4.7. Kaşif arı safhasının sözde-kodu

4.5.2.7. İşgören güncelleme safhası

Önerilen HM-YAK algoritmasında, T-YAK algoritmasında yer almayan bir işgören güncelleme safhası bulunmaktadır. Bu safhada, mevcut en iyi çözümün görev atamaları için amaç fonksiyonunu iyileştirecek daha iyi bir işgören ataması yapılmasının mümkün olup olmadığı araştırılmaktadır. Bu adım, işgören atamaları için kullanılan matematiksel model ile gerçekleştirilmektedir.

Algoritmanın başlangıç çözüm oluşturma ve işgören güncelleme safhalarında matematiksel modelleme kullanılmasıyla matsezgisel olma özelliği kazanması sağlanmıştır. Bu sayede, mevcut görev atamaları için tüm olasılıklar taranarak kısıtlara uygun daha iyi bir çözüm bulunmaya çalışılır. Daha iyi bir işgören atamasının bulunması halinde, mevcut en iyi çözüm güncellenir. Şekil 4.8, işgören güncelleme sayfasının sözde-kodunu içermektedir.

```
Mevcut en iyi çözümün görev atamalarını belirle
Matematiksel programlama ile istasyonlara işgören ataması yap
If Yeni çözüm mevcut en iyi çözümden daha başarılıysa
    Mevcut en iyi çözümü güncelle
End If
```

Şekil 4.8. İşgören güncelleme safhasının sözde-kodu

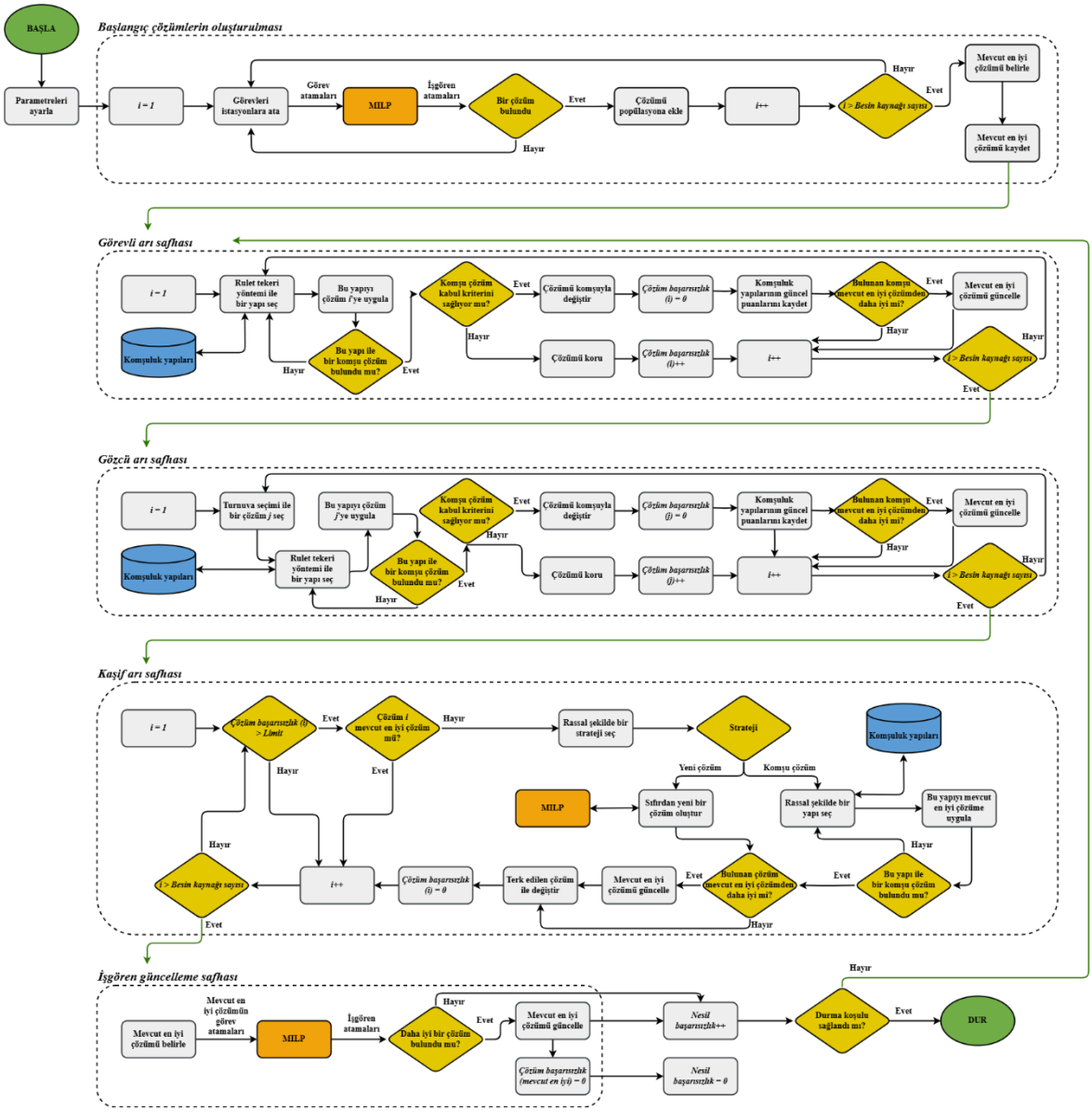
İşgören güncelleme safhasının tamamlanmasıyla bir iterasyon geçmiş olur. Ardından, geçen tüm iterasyonlar boyunca elde edilen mevcut en iyi çözümün ilgili iterasyon sonunda gelişip gelişmediği kontrol edilir. Eğer geliştiyse, *nesil başarısızlık sayacı* sıfırlanır. Aksi durumda, sayaç bir birim artırılır.

Eğer *maksimum nesil başarısızlık sayısını* ulaşılmadıysa, algoritma görevli arı safhasından itibaren çalışmaya devam eder. Durma koşulu sağlandıysa, algoritma sonlanır. Şekil 4.9 son adımın sözde-kodunu, Şekil 4.10 ise algoritmanın akış şemasını göstermektedir.

```
If İlgili iterasyon sonunda mevcut en iyi çözüm geliştiyse
    Nesil başarısızlık sayacı = 0
Else
    Nesil başarısızlık sayacı = Nesil başarısızlık sayacı + 1
End If

Geçen iterasyon = Geçen iterasyon + 1
If Nesil başarısızlık sayacı < Maksimum nesil başarısızlık sayısı
    Görevli arı safhasına dön
Else
    Dur
End If
```

Şekil 4.9. Durma koşulu için kontrol adımının sözde-kodu



Şekil 4.10. Önerilen HM-YAK algoritmasının akış şeması

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Test Problemleri

Başlangıç durumda hiyerarşik yetenek seviyelerine sahip olan işçiler ile çalışan montaj hatlarının, işçilerin yanı sıra robotları ve kobotları da içerecek şekilde yeniden dengelenmesi amacıyla geliştirilen çözüm yaklaşımları, literatürden uyarlanan test problemleri kullanılarak sınanmıştır. İlgili problemler uyarlanırken, BMHD literatüründe (http://www.assembly-line-balancing.de) bulunan 4 farklı probleme ait görev sayısı, işlem süreleri ve öncelik ilişkileri baz alınmıştır. İş istasyonu sayıları, her bir problem ailesinde yer alan görev sayısı göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Test problemlerine ait görev ve iş istasyonu sayıları Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Test problemlerine ait özellikler

Problem ailesi	Görev sayısı	İş istasyonu sayısı
Roszieg	25	4
Buxey	29	6
Wee-Mag	75	12
Mukherje	94	14

HİAMHD problemini ele alan Sungur ve Yavuz'un (2015) yaklaşımı ile paralel şekilde her problemde, 3 seviye olarak dikkate alınan işçiliklere göre görevlerin ilk %20'sinin işçilerden sadece en kalifiye grup olan H1 işçileri tarafından gerçekleştirilebildiği varsayılmıştır. %30'unun H1 ve H2 işçileri tarafından yapılabilirken, H3 işçileri tarafından gerçekleştirilemediği ele alınmıştır. Görevlerin kalanı (%50'si) ise tüm seviyedeki işçiler tarafından yapılmaya uygundur. BMHD literatürüne ait her bir test probleminde yer alan işlem süreleri, H1 olarak ifade edilen en kalifiye işçi grubunun işlem süreleri olarak alınmıştır. İşçi seviyelerinin işlem süreleri arasında 1,5 kat olduğu varsayılmıştır. Süreler, katsayı ile çarpıldıklarında sonucun tamsayı çıkmaması halinde en yakın tamsayıya yuvarlanmıştır. H1 seviyesindeki işçilerin maliyetinin 100 birim olduğu ve sonraki seviyelere geçişlerde 0,70 çarpanının kullanıldığı varsayılmıştır. Böylelikle; H1, H2 ve H3 işçileri için maliyet katsayıları sırasıyla 100, 70 ve 49 birim olarak alınmıştır.

İşçilerin görevleri gerçekleştirirken maruz kaldıkları risk değerleri, Katiraeea vd. (2023) çalışmasında olduğu gibi 0 ile 10 arasındaki tamsayı değerlerle ifade edilmiştir. Her bir görev için ergonomik risk, H3 işçileri için 6 ile 10 arasında değer alacak şekilde rassal olarak türetilmiştir. Kalifiye düzeyi arttıkça ergonomik riskin azaldığı varsayılmış ve diğer işçi seviyeleri için risk değerleri bu yaklaşıma göre rassal şekilde seçilmiştir. Robotların tüm görevler için ergonomik risk değerinin 0 olduğu ele alınmıştır. İşçi-kobot iş birliği durumunda risk değerleri seçilirken; bir görev için maruz kalınan risk düzeyinin, iş birliği yapılan işçinin tek başına çalışmasına göre daha düşük olduğu varsayılmıştır. Her problem ailesi için ergonomik risk kısıtının sağ taraf sabiti ise tüm işgörenlerin risk değerlerine göre belirlenmiştir. Bu sabit, her görev için işgörenler bazında ortalama risk değerlerinin toplamının iş istasyonu sayısına bölünmesiyle elde edilmektedir. Bu sayede, ergonomik riskin istasyonlara dengeli bir biçimde dağıtılması sağlanmaktadır.

İR-MHYD modelinde girdi olarak kullanılan, montaj hattında yalnızca işçilerin çalıştığı başlangıç duruma ilişkin görev-iş istasyonu atamaları, Bölüm 4.2'de sunulan başlangıç hat dengesi modeli ile elde edilmiştir. Robotların ve kobotların da bulunduğu yeni durumdaki görev-iş istasyonu atamalarının, başlangıç durumu ile olan benzerliğinin asgari düzeyi %20 (beo = 0,20) olarak seçilmiştir.

İR-MHYD probleminde, robotların ve kobotların işlem süreleri ile maliyetleri gibi çeşitli faktörler de dikkate alınmaktadır. Görevlerin %10'unun robotlar ve/veya kobotlar tarafından gerçekleştirilemediği varsayımı altında, her problem ailesi için bu oranı yansıtacak şekilde belirli sayıda görev rassal olarak seçilmiştir. Bu kapsamda, farklı parametre değerlerinin karar değişkenleri üzerindeki etkisini gözlemleyebilmek amacıyla çeşitli veri setleri türetilmiştir.

Weckenborg vd. (2020) ve Li vd. (2021a), en yüksek işlem süresine sahip işgören türünün robotlar olduğunu, bunu işçilerin izlediğini ve insanın ve robotun iş birliğinin en hızlı işlem alternatifi olduğunu varsaymıştır. Benzer şekilde Koltai vd. (2021), bir robotun bir parçayı analiz etmesinin ve doğru pozisyonda tutmak ve yerleştirmek için uygun bir yol bulmasının daha fazla zaman alması nedeniyle robotların işçilerden daha uzun işlem sürelerine sahip olduğunu belirtmiştir. Yazarlar, robotların tahsis edilmesinin önemli bir başlangıç yatırımı gerektirdiğini, ancak bu işgörenlerin işletme maliyetinin bir işçinin

maliyetine kıyasla daha düşük olduğunu savunmuştur. Bu bilgiler ışığında, her bir problem ailesine ait 1. veri setinde, en hızlı işgören türünün insan-kobot iş birliği olduğu ve robotların işçilerden daha yavaş çalıştığı ele alınmıştır. Her görev için işçi-kobot iş birliğinin işlem süresi, iş birliği yapılan işçinin seviyesine ve işlem süresine göre seçilmiştir. Belirli bir seviyedeki bir işçi bir kobotla iş birliği yaptığında, işçinin tek başına çalışması durumuna kıyasla görevin 1,5 kat hızlı gerçekleştirildiği varsayılmıştır. Robotların işlem süreleri, H3 işçilerinin işlem sürelerinin 1,5 katı olarak, maliyetleri ise bu işçi grubunun maliyetinin %70'i olacak şekilde seçilmiştir. İşçi-kobot iş birliğinin maliyeti ise iş birliği yapılan işçinin maliyetine kobot maliyetinin eklenmesi ile hesaplanmaktadır. İlgili maliyetler, işgörenlerin belirli bir dönemde hatta çalışması ile ortaya çıkan maliyetleri kapsamaktadır. İşe alma/satın alma maliyetleri göz önünde bulundurulmamıştır.

Her bir problem ailesine ait 2. veri setinde, robot/kobot maliyetlerinin 1. veri setindekinden %10 oranında daha yüksek, 3. veri setindekinde ise robot/kobot maliyetlerinin 1. veri setindekinden %10 oranında daha düşük olduğu ele alınmıştır. Bu veri setlerinde tüm işgörenlerin işlem süreleri 1. veri seti ile aynıdır.

Her ailenin 4. veri setinde, belirli bir seviyedeki bir işçinin bir kobot ile iş birliği yapması durumunda, görevin işçinin tek başına çalışmasına kıyasla 2,25 kat daha hızlı tamamlandığı, yani kobotların 1. veri setindekine nazaran daha hızlı çalıştığı varsayılmıştır. 5. veri setinde ise aynı iş birliği senaryosunda işçinin tek başına çalışması durumuna kıyasla görevin 1,25 kat hızlı yapıldığı ele alınmıştır. Bu veri setinde, kobotların hala işçilerden hızlı çalıştığı, ancak 1. veri setine göre daha düşük hızda olduğu kabul edilmiştir. Bu iki veri setinde, farklı seviyelerdeki işçilerin ve robotların işlem süreleri ile tüm maliyet değerleri 1. veri setindeki ile aynıdır.

Tüm ailelerin 6. veri setinde, robotların işlem süreleri H3 işçilerinin 1,25 katı olarak alınmıştır. 7. veri setinde ise robotların işlem süreleri H3 işçilerinin 2,25 katı olarak seçilmiştir. Son olarak 8. veri setinde; robotların işlem süreleri, H3 işçisi ve kobotun iş birliğinin süresine eşit (H3 işçilerinden 1,5 kat hızlı) olarak alınmıştır. Bu veri setlerinde, farklı seviyelerdeki işçilerin ve işçi-kobot iş birliğinin işlem süreleri ile tüm maliyetler 1. veri setindeki ile aynıdır.

Özetle, robotların/kobotların işlem sürelerinin ve maliyetlerinin etkisini görebilmek amacıyla her bir problem ailesi için 1. veri seti ana veri seti olarak alınarak, bu değerlerin 1. veri setine göre arttığı ve azaldığı farklı durumları ifade eden yedi ek veri seti oluşturulmuştur. 4 aileden oluşan test problemleri, 8'er veri seti için her veri setinde olurlu çözüm veren 5'er bütçe değeri ile toplam 160 durum için çözülmüştür. Veri setlerine ilişkin ayrıntılar Çizelge 5.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 5.2. Veri setlerine ait özellikler

Veri seti	Özellik
1 (Ana)	Robotlar en yavaş, işçi-kobot iş birliği en hızlı işgören türü Robotlar en düşük maliyetli, işçi-kobot iş birliği en yüksek maliyetli işgören türü
2	Robot ve kobot maliyetleri 1. veri setindekinden daha yüksek
3	Robot ve kobot maliyetleri 1. veri setindekinden daha düşük
4	İşçi-kobot iş birliği 1. veri setindekinden daha hızlı
5	İşçi-kobot iş birliği 1. veri setindekinden daha yavaş
6	Robotlar 1. veri setindekinden daha hızlı
7	Robotlar 1. veri setindekinden daha yavaş
8	Robotlar 1. ve 6. veri setlerindekinden daha hızlı

Farklı işgören türlerine ait işlem süreleri ve maliyet değerleri, literatürden alınan değerlerin farklı katsayılar ile çarpılması sonucunda elde edilmiştir. Bir problem ailesinin çözümünde kullanılan bütçe değerleri, o ailedeki her problemin olurlu çözüm verdiği değerler arasından seçilmiştir. Ergonomik risk değerleri ise Borg CR10 skalasına göre 0 ile 10 arasında türetilmiş ve hattın ergonomik riskinin kısıtlanması için kullanılan sağ taraf sabiti değerleri, her bir problem ailesi için türetilen veriler baz alınarak yapılan hesaplamalar sonucunda belirlenmiştir. Dolayısıyla, türetilen ve bunlara bağlı olarak sağ taraf sabiti olarak seçilen tüm değerler birer katsayı olarak değerlendirilmelidir. Test problemleri, farklı katsayıların amaç fonksiyonu üzerindeki etkilerinin görülmesi ve önerilen çözüm yaklaşımlarının performansının karşılaştırılması için kullanılmıştır.

5.2. Parametre Kalibrasyonu

Önerilen HM-YAK algoritmasının ana kontrol parametrelerinin değerleri Taguchi yöntemi ile belirlenmiştir. Bu yöntem, sinyal-gürültü oranı (S/N) olarak bilinen ölçüyü enbüyükleyen en iyi parametre seviyelerinin seçimi amacıyla kullanılmaktadır (Nourmohammadi vd., 2019).

Taguchi yöntemini uygulamak için en büyük boyutlu problemleri içeren Mukherje ailesinin ilk problemi seçilmiştir. Çizelge 5.3, faktörleri ve seviyelerini göstermektedir. Deney tasarımı için L9 ortogonal dizisi kullanılmıştır (Çizelge 5.4). Her bir deney MATLAB (Matrix Laboratory) yazılımında 10 kez çözülmüştür. Bir deney için elde edilen sonuçların ortalaması, o deney için çözüm değeri olarak alınmıştır. Analiz, değişen parametre değerlerine sahip 9 deney setinden elde edilen sonuçlar kullanılarak Minitab 15'te gerçekleştirilmiştir.

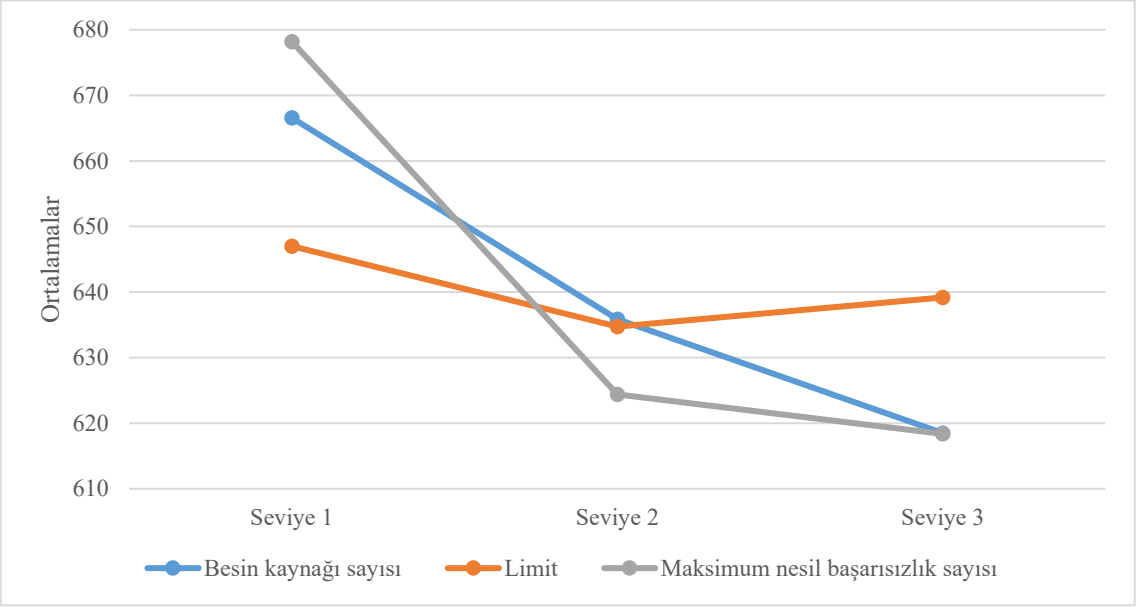
Çizelge 5.3. Temel kontrol parametreleri

Faktör	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Besin kaynağı sayısı	10	20	50
Limit	20	50	150
Maksimum nesil başarısızlık sayısı	1000	2000	5000

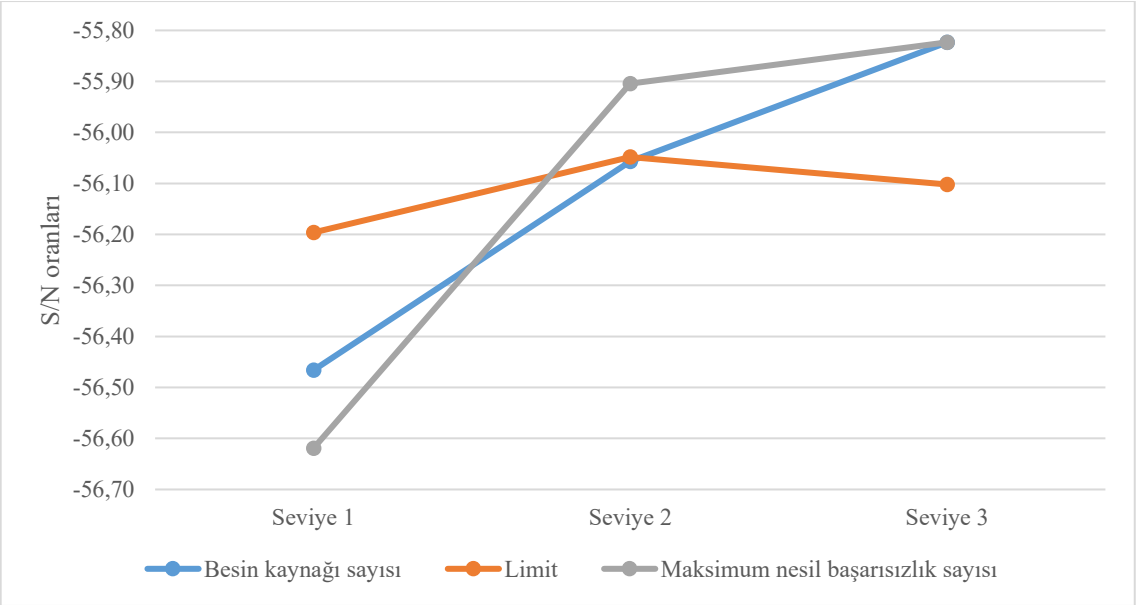
Çizelge 5.4. Taguchi deney tasarımı

Deney	Besin kaynağı sayısı	Limit	Maksimum nesil başarısızlık sayısı
1	10	20	1000
2	10	50	2000
3	10	150	5000
4	20	20	2000
5	20	50	5000
6	20	150	1000
7	50	20	5000
8	50	50	1000
9	50	150	2000

Ortalamalara ve S/N oranlarına ilişkin ana etki grafikleri sırasıyla Şekil 5.1'de ve Şekil 5.2'de sunulmuştur. Taguchi yöntemine göre bir parametre için en uygun değer, ilgili S/N oranının en yüksek olduğu seviyeye karşılık gelmektedir (Taguchi vd., 2005: Nourmohammadi vd.'den 2022b)). Bu doğrultuda, Şekil 5.2'den görüleceği üzere *besin kaynağı sayısı*, *limit* ve *maksimum başarısızlık nesil sayısı* için en uygun değerler sırasıyla 50, 50 ve 5000 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.1. Ortalamalar için ana etkiler grafiği



Şekil 5.2. S/N oranları için ana etkiler grafiği

5.3. Elde Edilen Sonuçlar

Ele alınan İR-MHYD probleminin çözümü için geliştirilen matematiksel model ve başlangıç hat atamalarını elde etmek amacıyla kullanılan başlangıç hat dengesi modeli, Intel Core i5 1.80GHz işlemciye ve 8 GB RAM'e sahip bir bilgisayarda GAMS (General Algebraic Modeling System) programı ile kodlanmış ve çözücü olarak CPLEX seçilmiştir. Problemlerin her biri için modele 3600 saniye süre limiti verilmiştir.

Başlangıç hat dengesi modelinde çevrim süresi ve toplam işçi maliyeti amaçlarına ilişkin w_1 ve w_2 ağırlıkları eşit şekilde 0,50 olarak alınmıştır. Her bir problem ailesi için elde edilen başlangıç hat dengesi çözümlerine ait görev-iş istasyonu atamaları İR-MHYD probleminde girdi olarak kullanılmıştır. Elde edilen çevrim süresi, toplam işçi maliyeti ve atanan farklı seviyelerde işçi sayıları Çizelge 5.5'te verilmiştir.

Çizelge 5.5. İlk hat dengesi sonuçları

Problem ailesi	CS	IM	H1	H2	H3
Roszieg	37	349	3	0	1
Buxey	66	510	3	3	0
Wee-Mag	149	1029	7	4	1
Mukherje	351	1238	10	2	2

HM-YAK algoritmasının yanı sıra YAK algoritmasının temel versiyonu olan T-YAK algoritması da önerilen algoritmaya eklenen özelliklerin çözüm performansı üzerindeki etkilerinin incelenmesi için kodlanmıştır. Algoritmalar, MATLAB programının R2023b versiyonu kullanılarak geliştirilmiştir.

Bölüm 5.2'de belirlendiği üzere HM-YAK için *besin kaynağı sayısı* ve *limit* parametrelerinin her ikisinin de değeri 50 olarak alınmıştır. *Maksimum nesil başarısızlık sayısı* ise 5000'dir. Benzerlik kısıtına uymayan çözümlerin amaç fonksiyonuna, istenen minimum benzerlik ile mevcut benzerlik arasındaki farkın 10.000 katı kadar ceza değeri eklenmektedir. Algoritmaya, *maksimum nesil başarısızlık sayısına* ulaşılmasının haricinde ek durma koşulu olarak her tekrar için 3600 saniye süre limiti verilmiştir.

HM-YAK algoritmasının görevli ve gözcü arı safhalarında belirli bir komşuluk yapısı ile mevcut çözümden daha başarılı bir çözüm bulunduğunda ilgili yapıya ait puan bir birim artmaktadır. Her adımda uygulanacak yapının seçimi, ilgili puanlar göz önünde bulundurularak rulet tekeri yöntemi ile gerçekleştirilmektedir.

HM-YAK algoritmasının kaşif arı safhasında, terk edilen her bir çözümün yerine sıfırdan bir çözüm oluşturma veya popülasyondaki en iyi çözümün bir komşusunu bulma stratejilerine eşit olasılık verilmiştir. İkinci stratejinin uygulanması durumunda, komşuluk yapılarının seçim olasılıkları görevli ve gözcü arı safhalarındakinden farklı olarak eşittir.

HM-YAK'ta; geçen ilk 2000 iterasyonda, mevcut çözümden en fazla %5 oranında daha kötü amaç fonksiyonu değerine sahip komşu çözümler kabul edilmektedir. 2000. iterasyondan sonra komşu çözümün mevcut çözümle amaç fonksiyonu değeri eşit ise kabul olasılığı %50 olarak seçilmiştir. Mevcut çözümden en fazla %2 oranında daha kötü çözümler için kabul olasılığı, tavlama benzetimi algoritmasındaki yaklaşıma benzer şekilde $e^{-(geçen\ iterasyon)*\left(\frac{CS_{komşu\ çözüm}-CS_{mevcut\ çözüm}}{4000}\right)}$ fonksiyonuyla hesaplanmaktadır.

HM-YAK algoritmasında, başlangıç çözüm oluşturma ve işgören güncelleme safhalarında kullanılan model, MATLAB programının araç kutusu içinde bulunan karma tamsayılı doğrusal programlama çözücüsü intlinprog ile çözülmüştür. Algoritma, her bir problem için 20 kez koşturulmuştur.

T-YAK algoritmasında *besin kaynağı sayısı*, *limit*, *maksimum nesil başarısızlık sayısı* parametreleri ile benzerlik cezasının değerleri ve süre limiti HM-YAK'ta kullanılanlar ile aynı olarak alınmıştır. Bu algoritmada; istasyonlara görevlerin atanması, HM-YAK ile aynı adımlar izlenerek gerçekleştirilmektedir. Her istasyon için işgören tahsisi ise görev-işgören uygunluğu, ergonomik risk ve bütçe kısıtlarını sağlayan alternatif işgören türlerinden birinin rassal olarak seçilmesi yoluyla yapılır. T-YAK algoritmasında, görevli ve gözcü arı safhalarında her bir komşuluk yapısının seçim olasılığı eşittir ve mevcut çözümden daha kötü komşular kabul edilmemektedir. Kaşif arı safhasında, popülasyondaki en iyi çözüm dahi terk edilebilmekte ve terk edilen çözümlerin yerine sıfırdan yeni birer çözüm aranmaktadır. T-YAK algoritmasında, işgören güncelleme safhası bulunmamaktadır.

5.3.1. Matematiksel model ve HM-YAK algoritmasının karşılaştırılması

Matematiksel modelden ve HM-YAK algoritmasından elde edilen sonuçlar Çizelge 5.6-5.9'da verilmiştir. Sonuç tablolarında, ilk sütunda ilgili problem ailesine ilişkin problem sırası, 2. sütunda ise veri setinin ismi yer almaktadır. 3. sütunda ilgili veri setinin çözümünde kullanılan bütçe değeri görülmektedir. 4. ve 5. sütunlarda, matematiksel model ile elde edilen çözüme ilişkin toplam işgören maliyeti ve çevrim süresi değerleri verilmiştir. Saniye cinsinden çözüm süreleri ve gap değerleri 6. ve 7. sütunlardadır. 8.-11. sütunlarda algoritma ile ilgili sonuçlara yer verilmiştir. 8. sütun, 20 tekrar içindeki en başarılı çözümün toplam işgören maliyetini ve 9. sütun bu çözümün çevrim süresini göstermektedir. 10. sütunda, saniye cinsinden algoritmanın en başarılı çözüme ulaştığı süre bulunmaktadır. Son sütun ise 20 tekrar sonucunda elde edilen amaç fonksiyonu değerlerinin ortalamasını göstermektedir. Her problem için bulunan en başarılı çevrim süresi değerleri koyu renk ile işaretlenmiştir.

Matematiksel model, Roszieg ve Buxey ailelerine ait problemlerin tamamını optimal olarak çözmüştür. HM-YAK algoritması, ilgili test problemleri için aynı çözüm değerlerine ulaşmayı başarmıştır. Her iki çözüm yaklaşımı da tüm problemlerin çözümüne oldukça kısa süreler içinde erişmiştir. Büyük boyutlu Wee-Mag ve Mukherje ailelerine ait sonuçlar ise matematiksel modelin verilen süre limiti içinde problemlerden hiçbirini optimal olarak çözemediğini, olurlu çözümler elde ettiğini göstermiştir. Önerilen algoritma, ilgili problemler için eşit veya daha başarılı çözüm değerlerine makul süreler içinde ulaşmıştır.

Wee-Mag ailesindeki problemlerden 13 tanesinde iki çözüm yönteminin bulduğu amaç fonksiyonu değerleri eşit iken kalan problemlerde algoritma daha başarılı çözümler elde etmiştir. Aynı çözüm değerinin bulunduğu durumlarda, algoritma bu ailedeki problemleri oldukça makul süreler içinde çözerek çözüm süresi açısından önemli bir üstünlük sağlamıştır. Mukherje ailesine ait problemlerden yalnızca 1 tanesinde model ve algoritma eşit çözüm değerleri elde etmiş, diğer problemler için algoritma daha başarılı çözümlere ulaşmıştır. Önerilen algoritma, matematiksel modele kıyasla tüm durumlarda çok daha kısa süreler içinde çözüm bulabilmiştir. HM-YAK algoritmasının, problem boyutu büyüdükçe çözüm değeri ve çözüm süresi açısından matematiksel modelleme yaklaşımından daha kaliteli çözümler elde ettiği görülmüştür.

Çizelge 5.6. Roszieg problem ailesi için elde edilen sonuçlar

Roszieg ailesi			Model				HM-YAK			
Sıra	Veri seti	Bütçe	TM	CS	Süre	Gap	TM_{eniyi}	CS_{eniyi}	Süre	CS_{ort}
1		200	172	**115**	0,17	%0	172	**115**	0,56	115,00
2		250	242	**85**	0,55	%0	242	**85**	0,44	85,30
3	R1	300	287	**46**	0,74	%0	287	**46**	0,34	46,00
4		350	342	**38**	0,86	%0	342	**38**	0,25	38,00
5		400	372	**33**	0,77	%0	372	**33**	0,27	33,00
6		200	181	**115**	0,19	%0	181	**115**	0,56	115,00
7		250	211	**109**	0,58	%0	211	**109**	0,37	109,00
8	R2	300	293	**46**	0,63	%0	293	**46**	0,44	46,00
8		350	344	**41**	1,03	%0	344	**41**	0,27	41,10
10		400	381	**33**	1,17	%0	381	**33**	0,26	33,00
11		200	193	**109**	0,36	%0	193	**109**	0,35	109,00
12		250	233	**85**	0,97	%0	233	**85**	0,44	85,75
13	R3	300	293	**44**	0,66	%0	293	**44**	0,43	44,25
14		350	333	**38**	0,86	%0	333	**38**	0,29	38,00
15		400	393	**39**	0,70	%0	393	**29**	0,63	29,00
16		200	172	**115**	0,39	%0	172	**115**	0,59	115,00
17		250	242	**85**	0,59	%0	242	**85**	0,49	85,60
18	R4	300	287	**35**	0,75	%0	287	**35**	0,71	35,00
19		350	342	**27**	0,63	%0	342	**27**	0,38	27,40
20		400	372	**23**	0,67	%0	372	**23**	0,27	23,00
21		200	172	**115**	0,30	%0	172	**115**	0,56	115,00
22		250	242	**85**	0,69	%0	242	**85**	0,53	85,00
23	R5	300	287	**52**	0,75	%0	287	**52**	0,50	52,00
24		350	342	**42**	0,67	%0	342	**42**	0,39	43,20
25		400	372	**37**	0,78	%0	372	**37**	0,25	37,00
26		200	172	**94**	0,20	%0	172	**94**	0,58	94,00
27		250	242	**70**	0,59	%0	242	**70**	0,41	70,30
28	R6	300	287	**45**	0,58	%0	272	**45**	0,47	45,00
29		350	342	**36**	0,84	%0	342	**36**	0,42	36,00
30		400	372	**33**	0,77	%0	372	**33**	0,24	33,00
31		200	172	**172**	0,33	%0	172	**172**	0,54	172,00
32		250	242	**126**	0,69	%0	242	**126**	0,37	127,00
33	R7	300	287	**48**	0,66	%0	287	**48**	0,69	48,70
34		350	342	**38**	0,98	%0	342	**38**	0,30	38,00
35		400	372	**33**	1,02	%0	372	**33**	0,26	33,00
36		200	172	**54**	0,31	%0	172	**54**	0,58	54,00
37		250	242	**47**	0,70	%0	242	**47**	0,32	47,00
38	R8	300	272	**38**	0,69	%0	272	**38**	0,34	38,00
39		350	342	**34**	0,89	%0	342	**34**	0,25	34,00
40		400	368	**31**	0,77	%0	368	**31**	0,27	31,00

Çizelge 5.7. Buxey problem ailesi için elde edilen sonuçlar

Buxey ailesi			Model				HM-YAK			
Sıra	Veri seti	Bütçe	TM	CS	Süre	Gap	TM_{eniyi}	CS_{eniyi}	Süre	CS_{ort}
1		400	370	**106**	34,34	%0	370	**106**	0,38	106,00
2		450	440	**77**	45,11	%0	440	**77**	1,52	78,50
3	B1	500	489	**68**	53,66	%0	476	**68**	7,68	72,00
4		550	540	**57**	52,52	%0	540	**57**	3,51	59,90
5		600	585	**55**	25,97	%0	585	**55**	3,32	56,60
6		400	385	**106**	19,78	%0	385	**106**	0,39	106,00
7		450	437	**89**	60,77	%0	437	**89**	7,56	91,25
8	B2	500	488	**68**	67,83	%0	488	**68**	22,96	71,85
8		550	537	**64**	145,94	%0	525	**64**	7,57	64,20
10		600	597	**55**	63,81	%0	597	**55**	22,66	56,15
11		400	395	**91**	22,58	%0	395	**91**	1,24	93,25
12		450	443	**76**	61,72	%0	443	**76**	10,15	78,25
13	B3	500	495	**64**	37,28	%0	495	**64**	5,00	66,55
14		550	525	**57**	49,28	%0	525	**57**	1,90	58,35
15		600	595	**51**	33,02	%0	595	**51**	2,57	52,60
16		400	370	**84**	27,80	%0	370	**84**	1,15	84,10
17		450	440	**54**	14,88	%0	440	**54**	2,65	57,60
18	B4	500	489	**50**	123,09	%0	489	**50**	22,99	51,90
19		550	540	**40**	61,52	%0	540	**40**	1,94	41,75
20		600	589	**38**	36,16	%0	589	**38**	2,02	38,60
21		400	389	**118**	30,28	%0	370	**118**	0,47	118,00
22		450	440	**88**	41,27	%0	440	**88**	0,90	88,90
23	B5	500	491	**78**	80,30	%0	491	**78**	2,45	80,90
24		550	540	**68**	165,36	%0	540	**68**	1,44	69,30
25		600	585	**65**	128,58	%0	585	**65**	2,83	65,75
26		400	370	**98**	62,36	%0	370	**98**	0,63	98,50
27		450	440	**73**	52,80	%0	440	**73**	0,88	74,20
28	B6	500	489	**68**	46,75	%0	470	**68**	0,82	68,20
29		550	540	**57**	59,38	%0	540	**57**	1,79	58,00
30		600	589	**55**	44,28	%0	570	**55**	1,47	55,05
31		400	370	**127**	58,24	%0	370	**127**	0,42	127,00
32		450	440	**82**	31,39	%0	440	**82**	19,54	88,80
33	B7	500	491	**74**	135,59	%0	491	**74**	1,72	76,80
34		550	540	**61**	136,41	%0	540	**61**	1,71	62,75
35		600	591	**56**	28,53	%0	591	**56**	4,30	56,85
36		400	370	**68**	16,64	%0	370	**68**	0,80	68,15
37		450	440	**59**	21,53	%0	440	**59**	2,51	60,15
38	B8	500	470	**57**	38,39	%0	470	**57**	0,73	57,00
39		550	540	**51**	31,13	%0	540	**51**	1,92	52,35
40		600	570	**50**	25,00	%0	570	**50**	0,50	50,00

Çizelge 5.8. Wee-Mag problem ailesi için elde edilen sonuçlar

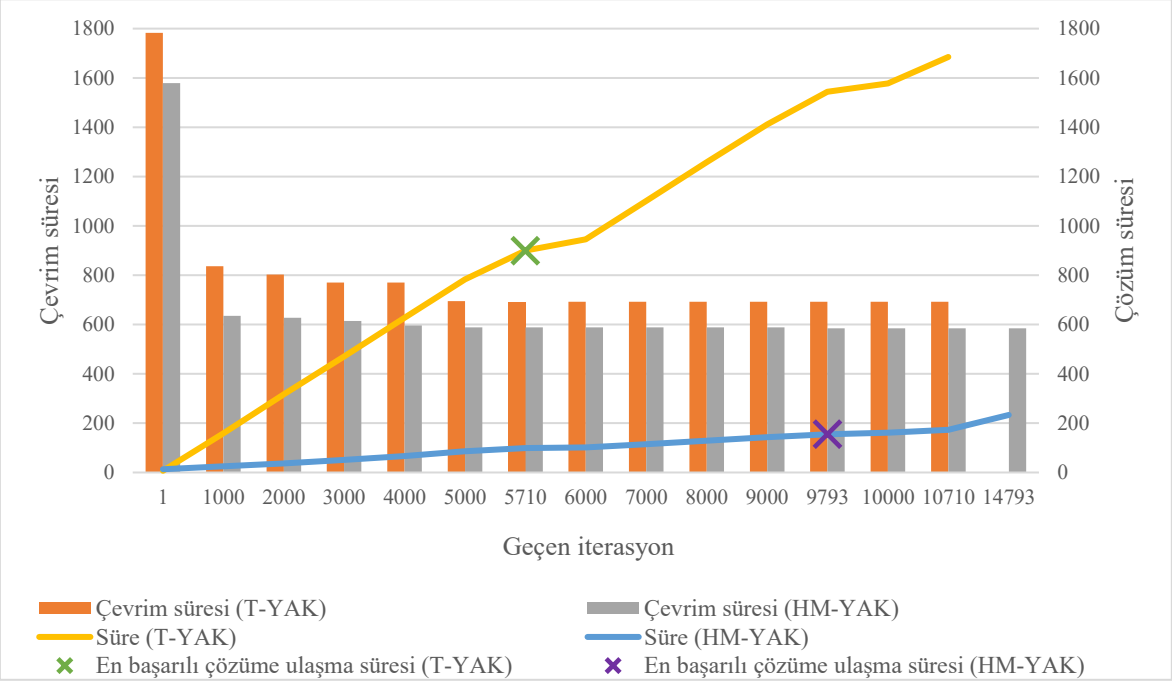
Wee-Mag ailesi			Model				HM-YAK			
Sıra	Veri seti	Bütçe	TM	CS	Süre	Gap	TM_{eniyi}	CS_{eniyi}	Süre	CS_{ort}
1		600	593	317	3600,00	%65	593	**304**	960,63	325,45
2		650	644	**256**	3600,00	%49	644	**256**	44,29	277,20
3	W1	700	693	236	3600,00	%50	693	**235**	95,29	242,55
4		750	738	219	3600,00	%49	744	**212**	60,44	218,45
5		800	793	**199**	3600,00	%49	793	**199**	406,08	204,05
6		600	589	358	3600,00	%17	589	**352**	2112,10	376,25
7		650	617	364	3600,00	%72	647	**291**	85,53	308,40
8	W2	700	680	270	3600,00	%62	689	**256**	41,00	256,95
8		750	750	229	3600,00	%54	747	**226**	67,12	230,40
10		800	792	211	3600,00	%55	789	**210**	36,77	211,60
11		600	590	266	3600,00	%55	590	**264**	85,72	295,70
12		650	639	**249**	3600,00	%51	639	**249**	177,95	253,40
13	W3	700	690	**219**	3600,00	%52	690	**219**	27,46	228,55
14		750	747	210	3600,00	%52	750	**206**	35,38	208,45
15		800	790	**186**	3600,00	%51	790	**186**	54,92	189,70
16		600	593	300	3600,00	%72	593	**297**	351,36	324,60
17		650	644	226	3600,00	%69	644	**210**	40,92	262,75
18	W4	700	687	187	3600,00	%66	693	**181**	109,47	196,50
19		750	738	**159**	3600,00	%54	738	**159**	58,20	164,70
20		800	793	**145**	3600,00	%56	793	**145**	73,89	151,05
21		600	599	423	3600,00	%71	593	**323**	505,06	335,90
22		650	642	318	3600,00	%64	644	**282**	63,23	297,45
23	W5	700	693	265	3600,00	%53	693	**262**	55,39	270,55
24		750	744	**236**	3600,00	%48	744	**236**	60,40	243,50
25		800	793	225	3600,00	%53	793	**224**	123,23	228,75
26		600	593	276	3600,00	%51	593	**272**	391,68	284,30
27		650	644	**236**	3600,00	%57	644	**236**	93,52	250,45
28	W6	700	693	224	3600,00	%47	693	**219**	48,92	223,40
29		750	744	**197**	3600,00	%52	744	**197**	36,09	201,25
30		800	793	189	3600,00	%48	793	**188**	116,36	192,35
31		600	593	446	3600,00	%72	593	**441**	203,99	487,10
32		650	638	323	3600,00	%62	644	**313**	51,59	367,75
33	W7	700	693	295	3600,00	%63	693	**271**	100,97	293,75
34		750	744	**238**	3600,00	%61	744	**238**	24,38	248,05
35		800	793	219	3600,00	%56	793	**217**	64,21	225,00
36		600	593	**177**	3600,00	%12	593	**177**	128,19	177,90
37		650	650	172	3600,00	%45	644	**161**	102,12	166,65
38	W8	700	693	163	3600,00	%28	674	**159**	25,18	160,40
39		750	744	**147**	3600,00	%23	744	**147**	89,44	152,10
40		800	789	147	3600,00	%34	774	**145**	23,50	145,60

Çizelge 5.9. Mukherje problem ailesi için elde edilen sonuçlar

Mukherje ailesi			Model				HM-YAK			
Sıra	Veri seti	Bütçe	TM	CS	Süre	Gap	TM_{eniyi}	CS_{eniyi}	Süre	CS_{ort}
1		800	793	600	3600,00	%60	793	**576**	134,35	608,45
2		850	848	534	3600,00	%55	848	**527**	150,65	540,70
3	M1	900	893	503	3600,00	%56	893	**485**	93,82	505,60
4		950	950	452	3600,00	%53	948	**449**	124,04	467,80
5		1000	993	429	3600,00	%50	993	**423**	73,52	430,75
6		800	793	680	3600,00	%63	793	**631**	240,66	666,65
7		850	844	563	3600,00	%57	844	**562**	119,83	576,30
8	M2	900	896	545	3600,00	%58	896	**523**	122,90	534,40
8		950	947	473	3600,00	%54	947	**472**	228,15	486,85
10		1000	996	448	3600,00	%51	996	**443**	96,67	456,60
11		800	791	563	3600,00	%56	790	**553**	45,21	564,75
12		850	842	497	3600,00	%53	842	**495**	92,95	516,25
13	M3	900	896	487	3600,00	%53	890	**462**	100,52	480,25
14		950	948	444	3600,00	%51	942	**432**	184,89	443,90
15		1000	991	423	3600,00	%50	999	**405**	49,39	417,90
16		800	793	496	3600,00	%62	793	**475**	216,17	535,30
17		850	842	432	3600,00	%61	848	**419**	154,74	446,50
18	M4	900	891	405	3600,00	%63	897	**391**	110,13	403,55
19		950	948	347	3600,00	%56	948	**346**	49,82	363,80
20		1000	997	327	3600,00	%55	993	**324**	96,89	335,05
21		800	793	645	3600,00	%59	793	**624**	127,03	647,10
22		850	838	596	3600,00	%54	848	**581**	87,23	600,35
23	M5	900	893	545	3600,00	%55	893	**544**	176,97	556,40
24		950	942	550	3600,00	%55	944	**503**	75,72	520,80
25		1000	997	532	3600,00	%54	993	**474**	130,68	495,50
26		800	793	534	3600,00	%52	793	**528**	101,39	544,15
27		850	850	501	3600,00	%55	848	**492**	38,86	502,25
28	M6	900	893	473	3600,00	%53	893	**458**	32,04	467,95
29		950	950	443	3600,00	%50	944	**427**	58,02	438,05
30		1000	993	429	3600,00	%51	993	**409**	52,59	416,00
31		800	793	800	3600,00	%68	793	**694**	176,44	785,55
32		850	842	645	3600,00	%63	848	**614**	31,79	666,90
33	M7	900	899	558	3600,00	%58	893	**551**	97,92	587,95
34		950	942	536	3600,00	%60	942	**506**	55,06	537,70
35		1000	993	471	3600,00	%54	993	**461**	61,54	477,60
36		800	778	387	3600,00	%39	778	**378**	38,77	380,60
37		850	808	378	3600,00	%36	844	**367**	98,42	368,75
38	M8	900	878	350	3600,00	%33	878	**349**	165,31	354,50
39		950	948	340	3600,00	%38	908	**339**	69,22	340,45
40		1000	978	**325**	3600,00	%36	978	**325**	99,61	330,55

5.3.2. T-YAK ve HM-YAK algoritmalarının karşılaştırılması

T-YAK ve HM-YAK algoritmalarının performanslarının detaylı bir şekilde karşılaştırılabilmesi için M1 veri setinin ilk problemi üzerinde her algoritmanın bir tekrarında elde edilen çözüm değerleri ve iterasyonlar sırasında geçen süre Şekil 5.3'te sunulmuştur. Yatay eksen, algoritma tarafından gerçekleştirilen iterasyon sayısını temsil etmektedir. Sütun grafikleri ilgili iterasyonun sonunda mevcut en iyi çözümün çevrim süresi değerlerini, çizgi grafikleri ise saniye cinsinden geçen süreyi göstermektedir. Yeşil ve mor çarpılar, algoritmaların elde ettikleri en başarılı çözüm değerlerine ilk kez ulaştıkları anları temsil etmektedir.

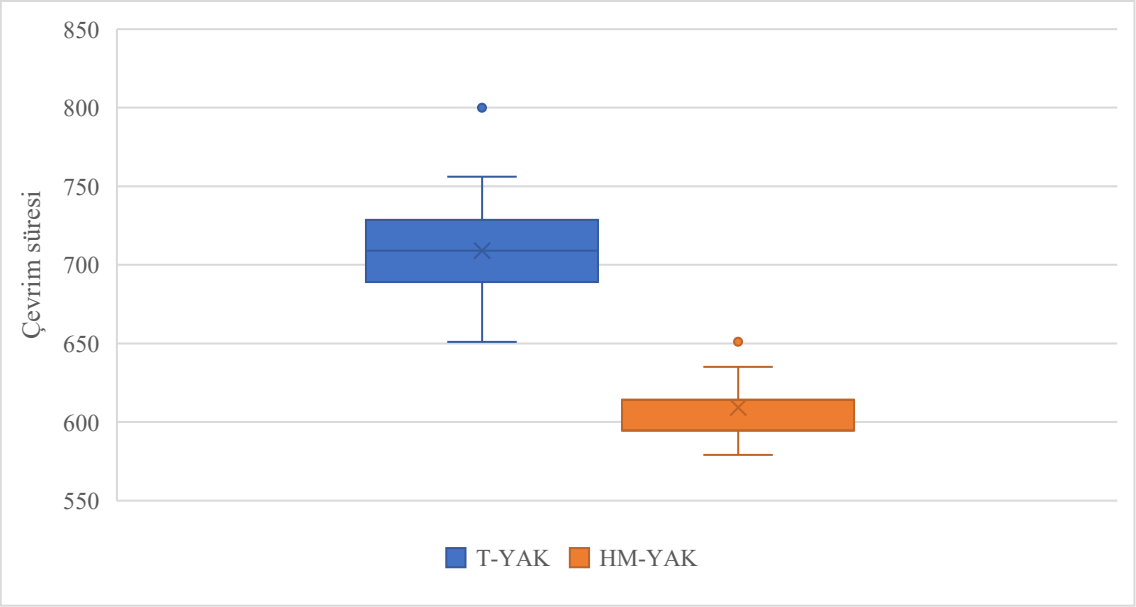


Şekil 5.3. T-YAK ve HM-YAK algoritmalarının birer tekrar bazında karşılaştırılması

Şekil 5.3'te gösterildiği gibi HM-YAK tüm iterasyonlar boyunca T-YAK algoritmasına kıyasla daha üstün performans göstermiştir. T-YAK algoritması en başarılı çevrim süresi değerine 5710. iterasyonda 900 saniyede ulaşmıştır. Bu iterasyonu takip eden 5000 iterasyon boyunca mevcut en iyi çözümü geliştiremediği için durma koşulu sağlanmış ve algoritma 10710. iterasyondan sonra 1685 saniyede sonlanmıştır. HM-YAK en başarılı çevrim süresi değerine 9793. iterasyonda 155 saniyede ulaşmış ve 14793. iterasyonda 233 saniyede durmuştur. HM-YAK, toplamda daha fazla iterasyon gerçekleştirmesine rağmen

durma koşuluna ulaşması için geçen süre, T-YAK'ın en başarılı çözümüne erişmesi için geçen süreden dahi kısadır. T-YAK algoritmasının elde ettiği en başarılı çözüm değeri 693 iken HM-YAK algoritmasınınki 585'tir.

İlk tekrarlar için sonuçların değerlendirilmesinin ardından, her iki algoritma 19 kez daha koşturulmuştur. Elde edilen amaç fonksiyonu değerlerinin dağılımı Şekil 5.4'te görülmektedir. Sonuçlar, HM-YAK algoritmasına dahil edilen ek özelliklerin kayda değer bir performans artışı sağladığını ortaya koymaktadır.



Şekil 5.4. T-YAK ve HM-YAK algoritmalarından elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Algoritmalar arasında kapsamlı bir karşılaştırma yapabilmek amacıyla türetilen test problemlerinin tamamı kullanılmış ve her iki algoritma, her bir problem örneği için 20 kez çalıştırılmıştır. T-YAK ve HM-YAK algoritmaları ile elde edilen sonuçlar Çizelge 5.10'da sunulmuştur. "Ort. CS" sütunları, ilgili veri seti için her bir bütçe değeri altında 20 tekrarın sonuçları arasındaki en başarılı çevrim süresi değerlerinin ortalamasını ifade etmektedir. Her bir veri seti için en başarılı sonuçlar kalın yazı tipiyle gösterilmiştir. "Ort. süre" sütunları ise algoritmaların farklı bütçeler altında elde ettikleri en başarılı çözümlere ulaşmak için geçen ortalama süreleri saniye cinsinden içermektedir.

Çizelge 5.10. T-YAK ve HM-YAK algoritmalarının elde ettiği sonuçların karşılaştırılması

Problem ailesi	Veri seti	Ort. CS		Ort. süre	
		T-YAK	HM-YAK	T-YAK	HM-YAK
Roszieg	R1	**63,40**	**63,40**	0,60	0,37
	R2	**68,80**	**68,80**	0,31	0,38
	R3	**61,00**	**61,00**	0,64	0,43
	R4	**57,00**	**57,00**	1,39	0,49
	R5	**66,20**	**66,20**	0,59	0,45
	R6	**55,60**	**55,60**	0,45	0,42
	R7	**83,40**	**83,40**	0,36	0,43
	R8	**40,80**	**40,80**	0,09	0,35
Buxey	B1	73,80	**72,60**	21,05	3,28
	B2	77,60	**76,40**	5,01	10,99
	B3	68,20	**67,80**	17,94	4,17
	B4	53,40	**53,20**	19,19	6,15
	B5	**83,40**	**83,40**	7,44	1,62
	B6	70,40	**70,20**	4,49	1,12
	B7	80,60	**80,00**	10,15	5,54
	B8	**57,00**	**57,00**	14,06	1,29
Wee-Mag	W1	264,60	**241,20**	255,24	313,35
	W2	294,80	**267,00**	867,57	468,50
	W3	246,20	**224,80**	181,65	76,29
	W4	240,80	**198,40**	494,20	126,77
	W5	283,40	**265,00**	381,04	161,46
	W6	237,60	**222,40**	425,38	137,31
	W7	359,00	**296,00**	288,52	89,03
	W8	163,40	**157,80**	296,39	73,69
Mukherje	M1	542,40	**492,00**	246,82	115,28
	M2	592,60	**526,20**	855,74	161,64
	M3	514,40	**469,40**	261,79	94,59
	M4	469,00	**391,00**	338,88	125,55
	M5	602,40	**545,20**	263,78	119,53
	M6	496,60	**462,80**	294,68	56,58
	M7	699,60	**565,20**	511,24	84,55
	M8	368,60	**351,60**	462,57	94,27

Bulgular, en küçük problemlere sahip Roszieg ailesi için her iki algoritmanın da kısa süreler içinde aynı çözüm değerlerini ürettiğini göstermiştir. Algoritmalar, her biri 5 farklı bütçe senaryosu altında test edilen ve 8 veri setini içeren problemlerin tamamında aynı amaç fonksiyonu değerlerini verdiğinden, ilgili veri setleri için ulaşılan ortalama değerler eşittir. Buxey ailesi için en başarılı amaç fonksiyonu değerleri açısından, HM-YAK 8 veri setinden 6 tanesi için T-YAK'tan daha iyi sonuçlar elde etmiş ve 2 veri setinde algoritmalar aynı çözüm değerlerine ulaşmıştır. Algoritmaların her ikisi de bu problemleri oldukça kısa süreler içinde çözmüştür. HM-YAK algoritmasının etkinliği, problem boyutu büyüdükçe daha belirgin hale gelmiştir. HM-YAK, büyük boyutlu Wee-Mag ve Mukherjee ailelerinin tüm veri setleri için T-YAK algoritmasından daha iyi performans göstermiştir. Her iki algoritma da makul süreler içinde çözüm elde etmeyi başarmıştır.

Derrac vd. (2011), stokastik arama algoritmalarının performanslarının karşılaştırılmasında parametrik olmayan testlerin kullanımını önermiştir. Bu doğrultuda, algoritmalar arasında anlamlı bir farkın bulunup bulunmadığını belirlemek amacıyla MATLAB yazılımı kullanılarak parametrik olmayan Wilcoxon işaretli sıralar testi yapılmıştır. Her bir problem ailesi için ulaşılan en başarılı ve ortalama amaç fonksiyonu değerlerine dayalı ayrı testler gerçekleştirilmiş ve tüm problemleri kapsayan genel bir test daha yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre algoritmalar arasında anlamlı bir fark olmadığını belirten sıfır hipotezi (H_0), en küçük boyutlu Roszieg problemleri için ortalama ve en başarılı değerler açısından reddedilememiştir. Ancak, diğer problem aileleri ve genel bazda yapılan testlerde, %95 güven seviyesinde T-YAK ve HM-YAK algoritmaları arasında anlamlı farklar tespit edilmiştir (Çizelge 5.11).

Çizelge 5.11. Wilcoxon işaretli sıralar testine ait sonuçlar

		CS_{eniyi} bazında		CS_{ort} bazında	
Problem ailesi	Problem sayısı	*p-değeri*	H_0 için karar	*p-değeri*	H_0 için karar
Roszieg	40	1,00	Reddedilemez	0,09	Reddedilemez
Buxey	40	0,00	Red	0,00	Red
Wee-Mag	40	0,00	Red	0,00	Red
Mukherje	40	0,00	Red	0,00	Red
Genel	160	0,00	Red	0,00	Red

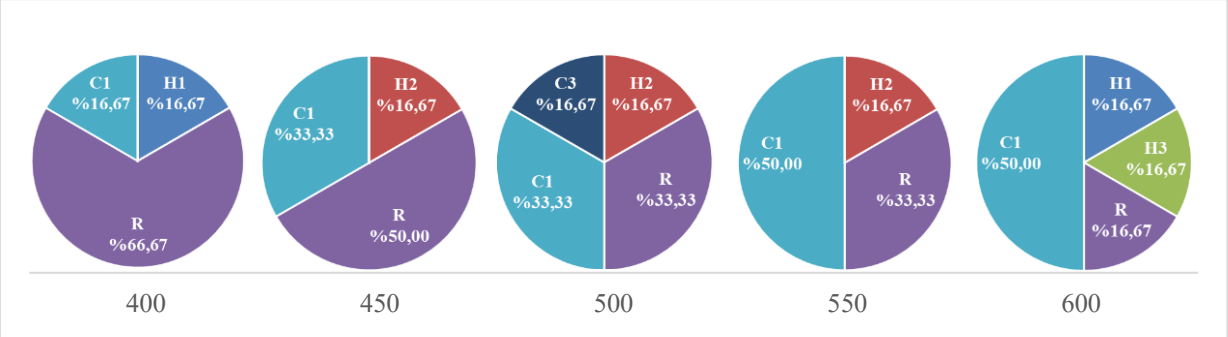
Sonuçlar değerlendirildiğinde, HM-YAK algoritmasının başarısı işgören atamaları için matematiksel modelleme kullanmasına bağlanabilir. Ayrıca, farklı özelliklere sahip problemleri çözerken çözüm kalitesini artırma potansiyeli daha yüksek olan komşuluk yapılarının seçim olasılıklarının daha yüksek olması, kaliteli çözümlere daha hızlı ulaşılmasını sağlamaktadır. Ek olarak, HM-YAK algoritmasında popülasyondaki en iyi değere sahip çözümlerin *limit* değeri aşılsa dahi bu çözümler terk edilmemektedir. Terk edilenlerin yerine, belirli bir olasılıkla ya popülasyondaki en iyi çözümün bir komşusu ya da sıfırdan üretilen yeni bir çözüm eklenmektedir. Bu yaklaşım, popülasyonda çeşitliliğin korunmasını sağlarken, genel çözüm kalitesinin artmasına da olanak tanımaktadır. Mevcut çözümden daha kötü komşuların belirli bir orana kadar kabul edilmesi ise ilerleyen iterasyonlarda iyileştirilebilecek çözümlerin popülasyonda tutulmasını sağlayarak algoritmanın yerel eniyiye takılmasını önlemektedir. Bulgular, matematiksel modelleme ile metasezgisel yöntemlerin güçlü yönlerinin bütünleştirilmesinin ve algoritmaya çeşitli mekanizmaların entegre edilmesinin performansı önemli ölçüde artırdığını göstermektedir.

5.3.3. Sonuçların değerlendirilmesi

İR-MHYD probleminde, farklı işgören türlerinin sunduğu avantajlardan yararlanmak temel odak noktasıdır. Farklı yetkinlik seviyelerine sahip işgörenler; işlem süreleri, maruz kalınan ergonomik risk düzeyleri ve maliyetler açısından farklı özelliklere sahip olup çeşitli bütçe senaryoları için alternatif oluşturmaktadır. En yetkin grup olan H1 işçileri, tüm görevleri gerçekleştirme kapasitesine sahiptir. Robotlar, ergonomik riskleri ortadan kaldırmaları ve düşük maliyetli olmaları nedeniyle önemli avantajlar sunarken; işçi-kobot iş birliği, daha yüksek bir maliyet gerektirse de görevleri en hızlı gerçekleştiren grup olarak öne çıkmaktadır. Türetilen test problemlerinde; farklı işgören türlerinin görev yeterliliği, işlem süresi, ergonomik risk ve maliyet açısından ödünleşmesi dikkate alınmıştır.

Matematiksel model kullanılarak Buxey ailesi için elde edilen optimal çözümler, bütçenin ve verileri türetmede kullanılan farklı katsayıların etkilerinin değerlendirilmesi için seçilmiştir. İşgören atamalarının bütçeye göre değişimini incelemek için Buxey ailesine ait B1 veri seti üzerinde elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

Şekil 5.5'te, B1 veri setinin 5 farklı bütçe değeri altında çözülmesiyle montaj hattına atanan işgörenlerin oranları gösterilmektedir. Burada H1, H2 ve H3 sırasıyla istasyonlarda tek başına çalışan birinci, ikinci ve üçüncü seviye işçileri; R robotları; C1, C2 ve C3 ise sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü seviye işçilerin kobotlar ile iş birliği yaptığı durumları temsil etmektedir.



Şekil 5.5. Farklı bütçe değerleri bazında B1 veri seti için işgören atamalarının oranları

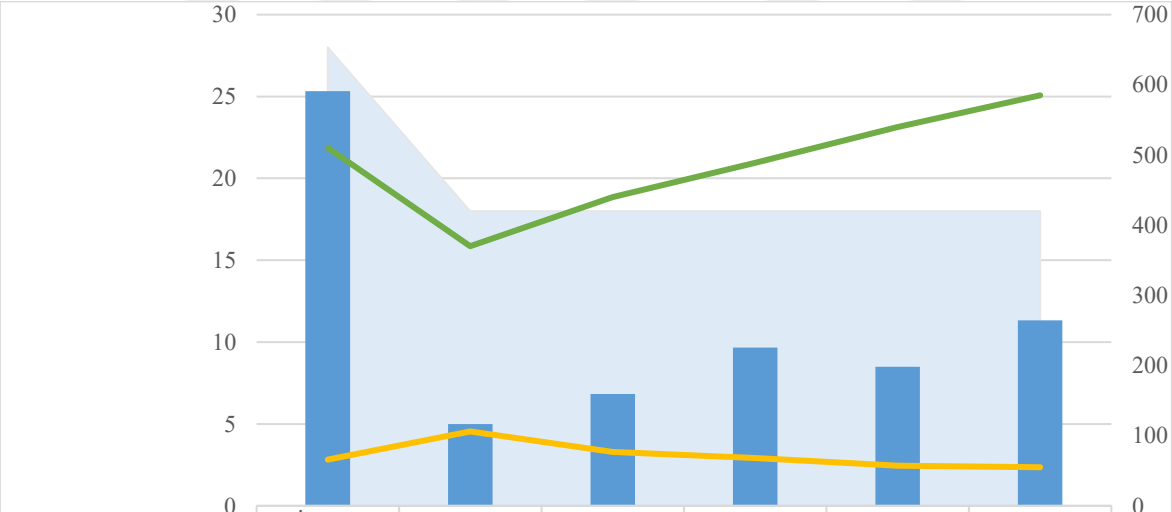
Bütçenin en düşük olduğu durumda, en yüksek oranda tercih edilen işgören türünün robotlar olduğu görülmüştür. Bu tercih, robotların maliyetinin diğer işgörenlerden düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Bütçe seviyesinin artmasıyla birlikte robot kullanım oranı azalırken, kobotların kullanımında artış yaşanmış ve iş birliği ağırlıklı olarak H1 işçileri ile gerçekleştirilmiştir. Her bir bütçe senaryosunda, en az bir işçinin hatta atandığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, bütçe düzeylerindeki değişimlerin işgören atamalarını doğrudan etkilediğini göstermiştir. Karar vericilerin bütçe planlaması yaparken bu çok boyutlu etkiyi dikkate almaları gerekmektedir.

İR-MHYD probleminde, iş birlikçi bir sisteme geçiş yaparak hattın ergonomik riskini belirli bir değerin altında tutabilmek amaçlanmaktadır. Şekil 5.6, Buxey ailesine ait yalnızca işçilerin görev aldığı manuel hattın ve B1 veri setine ait iş birlikçi sisteme geçilmiş durumun istasyonlarının ortalama riskinin değişimini göstermektedir. Grafikte ilk sütun, başlangıç durumdaki hattın istasyonlarının ortalama risk değerini yansıtırken, takip eden beş sütun ise farklı bütçe seviyelerine göre hattın robotları ve kobotları da içerecek şekilde yeniden dengelendiği durumlarda istasyonların ortalama risk düzeylerini ifade etmektedir. Açık mavi ile taralı alan, hattın başlangıç ve yeniden dengelendiği durumlarda her istasyon için izin

verilen risk sınırına karşılık gelmektedir. Yalnızca işçilerin çalıştığı durumda, iş birlikçi sistemlere geçiş için belirlenen risk sınır değerini sağlamak mümkün olmamıştır.

İş birlikçi sisteme geçildiğinde, her bir istasyonun toplam riskinin belirlenen sınır değerin altında tutulması sağlanmış, robotların görev aldığı istasyonlarda risk düzeyi sıfıra indirilmiştir. Bu durum, robotların yalnızca iş gücünü ikame eden araçlar olmanın ötesinde, ergonomik riskleri azaltmada da etkili bir unsur olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. İlgili grafikte yer alan yeşil çizgi, her bir senaryoda hatta atanan işgörenlerin toplam maliyetini, sarı çizgi ise hattın çevrim süresini temsil etmektedir. Bu değişkenlere ilişkin değerler, grafiğin ikincil y ekseni üzerinde yer almaktadır.

Başlangıç durum ile kıyaslandığında, yeni durumda daha düşük bütçe seviyeleriyle dahi istasyon risklerinin azaltılabildiği görülmüştür. Sonuçlar; bütçe, ergonomik risk ve çevrim süresi arasında sağlanacak dengenin, iş birlikçi sistemlerin sağladığı avantajlardan faydalanmak açısından kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır.



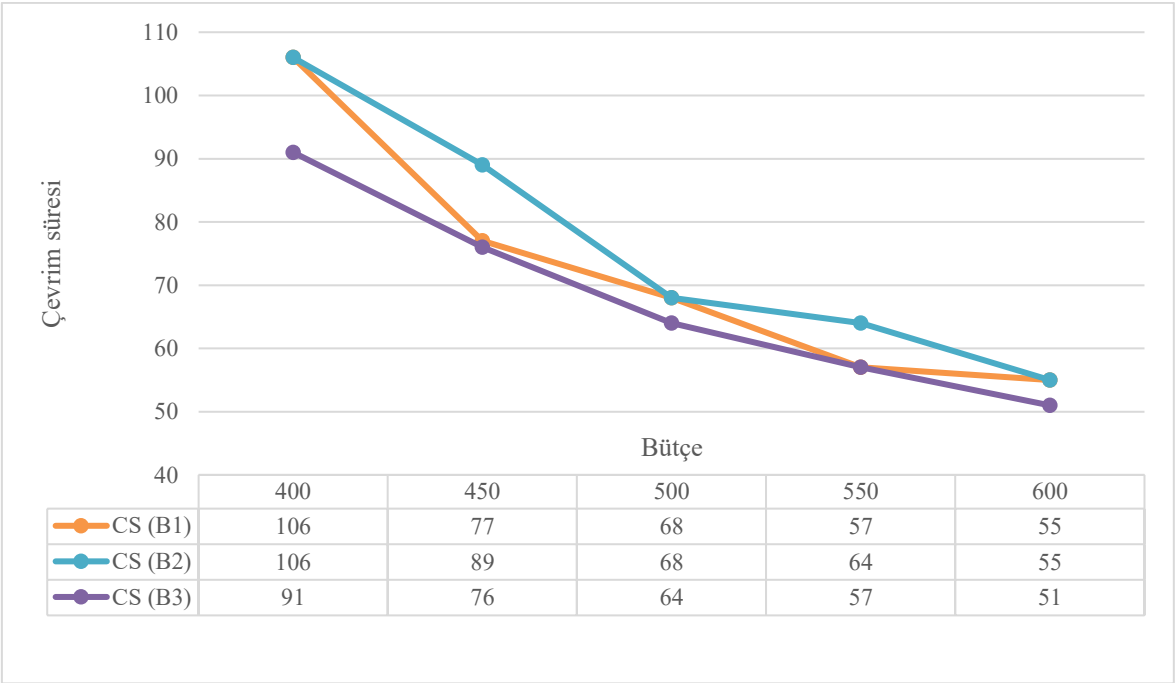
	İlk hat	1	2	3	4	5
Risk sınırı	28	18	18	18	18	18
Ortalama risk	25	5	7	10	9	11
Toplam maliyet	510	370	440	489	540	585
Çevrim süresi	66	106	77	68	57	55

Şekil 5.6. Farklı bütçe değerleri bazında B1 veri seti için elde edilen sonuçlar

Buxey ailesinin veri setlerinden elde edilen sonuçlar, maliyetlerin veya işlem sürelerinin farklı olduğu durumlarda amaç fonksiyonu değerindeki değişimleri incelemek için kullanılmıştır. Şekil 5.7; B1, B2 ve B3 veri setlerinin farklı bütçe seviyelerinde elde edilen çözümlerine ait çevrim süresi değerlerini göstermektedir. Bu veri setleri, işlem süreleri açısından aynı iken robot ve kobot maliyetleri açısından farklıdır. Bütçenin 400 birim olduğu durumda, ana veri seti olan B1 ile maliyetlerin daha yüksek olduğu B2 veri setlerinde, aynı işgören atamaları gerçekleştirilebildiği için çevrim süresi değerleri eşittir. Bu durumda, toplam işgören maliyeti B2 veri seti için daha yüksek olmasına rağmen bütçe düzeyi B1 ile aynı işgören atamalarının yapılmasına olanak tanımıştır. Maliyetlerin daha düşük olduğu B3 veri setinin çözümünde B1'e göre işgören atamaları değişmiştir. Bu durum, diğer veri setlerinden daha düşük bir çevrim süresinin elde edilmesini sağlamıştır. Genel çerçevede, maliyetlerin yüksek olduğu durumlarda daha yüksek; düşük olduğu durumlarda ise daha düşük çevrim süresine ulaşılabildiği görülmüştür.

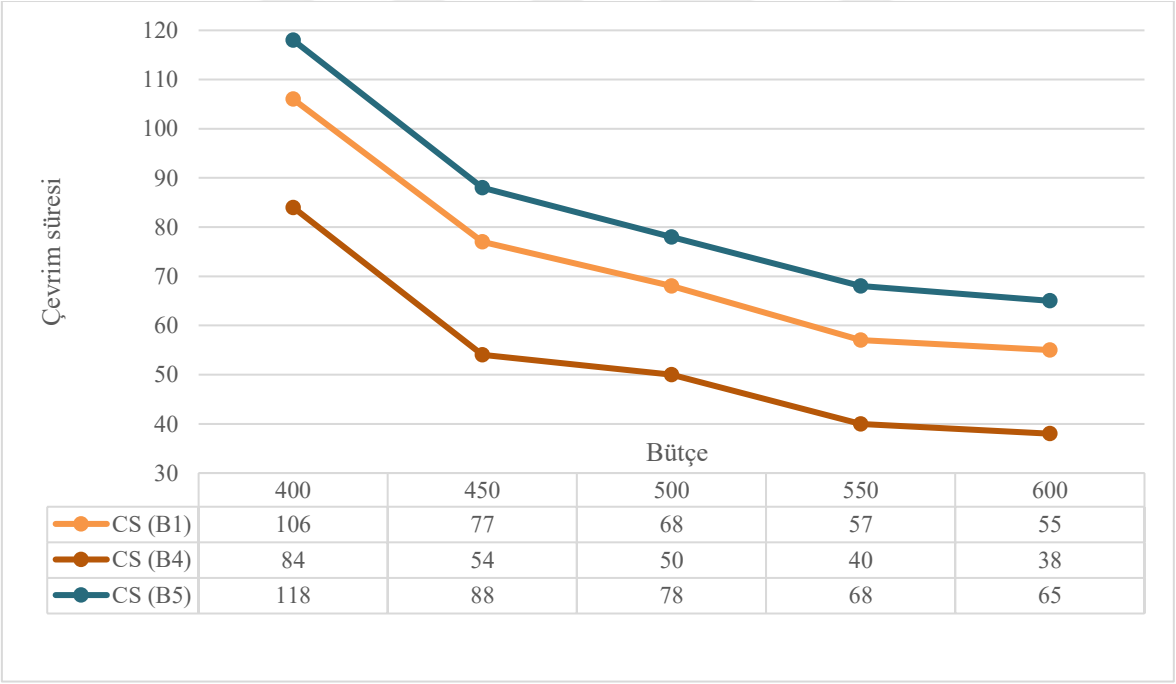
Şekil 5.8; B1, B4 ve B5 veri setleri için elde edilen çözümlere ait çevrim süresi değerlerini ifade etmektedir. Bu veri setleri, maliyetler açısından aynı iken kobotların işlem süreleri açısından farklıdır. Eşit bütçe seviyelerinde, bu veri setleri için ulaşılan çevrim süresi değerleri farklılık göstermektedir. Kobotların B1'dekinden daha hızlı olduğu B4 veri seti için daha düşük, daha yavaş olduğu B5 veri seti için daha yüksek çevrim süresi değerlerine erişilmiştir. Kobotların işlem süreleri ve bütçe, çevrim süresini etkilemektedir.

Şekil 5.9; B1, B6, B7 ve B8 veri setleri için farklı bütçe seviyeleri altında elde edilen çevrim süresi değerlerini göstermektedir. Bu veri setleri maliyetler açısından aynı olmakla birlikte, robotların işlem süreleri açısından farklılık göstermektedir. Robotlar; B1, B6 ve B7 veri setlerinde işçilere göre daha yavaş çalışmakta iken B8 veri setinde H3 işçileri ve kobotun iş birliğinin hızına eşit performans göstermektedir. Robotların en yavaş olduğu B7 veri setinde, tüm bütçe seviyeleri için diğer veri setlerine kıyasla daha yüksek çevrim süresi değerleri elde edilmiştir. Buna karşılık, robotların hızının en yüksek olduğu B8 veri seti için çevrim süresi değerleri daha düşüktür. Diğer veri setleri için elde edilen sonuçlar, robotların hızı ile tutarlıdır. Tüm veri setlerinde bütçenin artması çevrim süresinin düşmesini sağlamıştır.



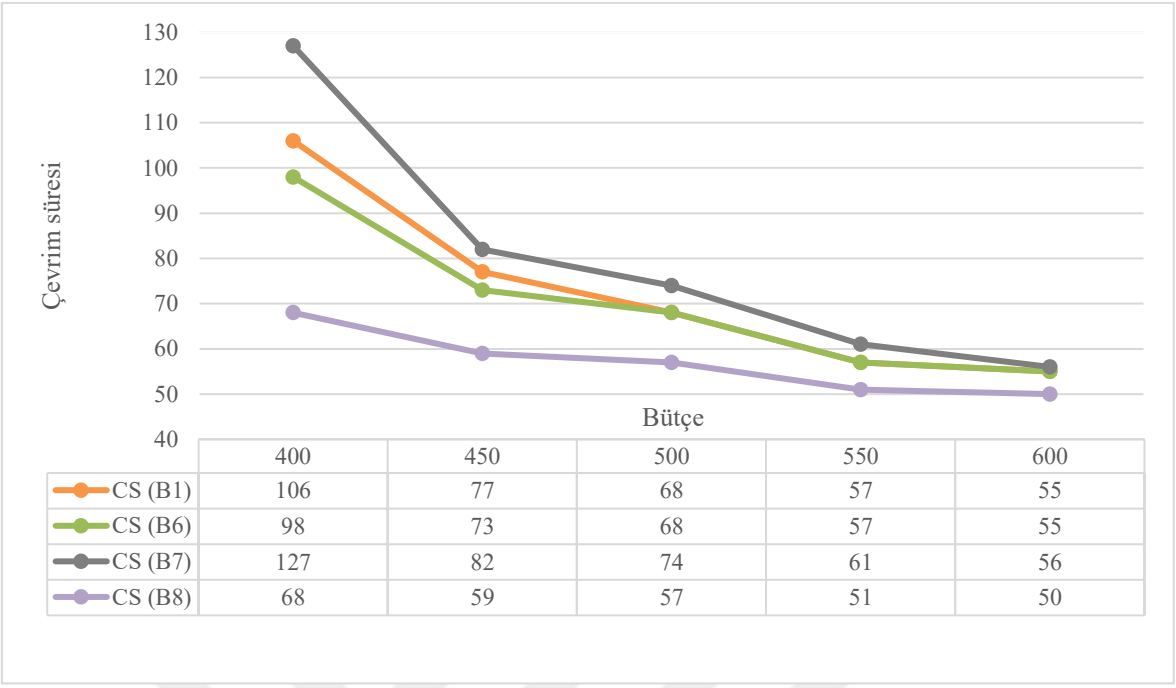
	400	450	500	550	600
CS (B1)	106	77	68	57	55
CS (B2)	106	89	68	64	55
CS (B3)	91	76	64	57	51

Şekil 5.7. B1, B2 ve B3 için elde edilen sonuçların karşılaştırılması



	400	450	500	550	600
CS (B1)	106	77	68	57	55
CS (B4)	84	54	50	40	38
CS (B5)	118	88	78	68	65

Şekil 5.8. B1, B4 ve B5 için elde edilen sonuçların karşılaştırılması



	400	450	500	550	600
CS (B1)	106	77	68	57	55
CS (B6)	98	73	68	57	55
CS (B7)	127	82	74	61	56
CS (B8)	68	59	57	51	50

Şekil 5.9. B1, B6, B7 ve B8 için elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Bulgular incelendiğinde, robotların ve kobotların sahip oldukları farklı maliyet ve işlem süresi karakteristiklerinin montaj hattının çevrim süresi üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Düşük bütçeli senaryolarda, atanabilecek işgören alternatiflerinin sayıca sınırlı olması nedeniyle, görece daha düşük maliyetli ancak işlem süresi bakımından daha yavaş olan robotların atanma oranı artmaktadır. Bu durum, çevrim süresinin yükselmesine neden olmaktadır. Öte yandan, bütçenin daha yüksek olduğu senaryolarda, maliyeti daha fazla ancak işlem süresi daha kısa olan insan-kobot iş birliği alternatifine yönelim artmaktadır. Bu durum, çevrim süresinin kayda değer biçimde düşmesini mümkün kılmaktadır. Bütçe ve çevrim süresi arasındaki ilişki, üretim süreçlerinde verimlilik hedefleri ile maliyet kısıtları arasında kurulması gereken hassas dengeyi ortaya koymaktadır.

İR-MHYD probleminin farklı bütçe seviyeleri altında çözülmesi; mevcut kaynaklar doğrultusunda en uygun işgören atama stratejilerini geliştirmeye olanak tanırken, aynı zamanda bütçedeki olası değişimlerin çevrim süresi üzerindeki etkilerini öngörebilme imkanı sunar. Bu kapsamda geliştirilen model, karar vericilerin belirli bir üretim dönemi için ayrılabilecek işgören bütçesini daha nesnel ve rasyonel bir biçimde planlamalarına katkıda bulunur. Böylece; üretim çıktısı, zaman, maliyet ve ergonomi gibi çok boyutlu performans ölçütleri arasında optimum denge gözetilerek sürdürülebilir bir yönetim sağlanabilir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Emek yoğun montaj hatlarında, işçilerin kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarıyla karşı karşıya kaldığı ve bu durumun hem insan sağlığını hem de sistemin verimliliğini olumsuz yönde etkilediği bilinmektedir. Günümüzde, üretim süreçlerinde robotların kullanılması sayesinde meslek hastalıklarının yanı sıra dikkat eksikliği veya tecrübesizlik kaynaklı üretim hatalarının önlenmesi mümkün olabilmektedir. Bununla birlikte, sunduğu avantajlara karşın robotlar öngörülemeyen durumlar ve değişiklikler karşısında insanlar kadar esnek değildir. Bu durum, Endüstri 5.0 çerçevesinde insan merkezli üretim ortamlarının önem kazanmasına ve insanların ve robotların güçlü yönlerinden birlikte yararlanmayı hedefleyen iş birlikçi sistemlerin ortaya çıkmasına zemin hazırlamıştır.

Hat dengeleme literatüründe iş birliği ile çalışan sistemlerin ele alındığı çalışmalarda, hatların kurulum esnasında ilk kez dengelenmesine odaklanılmıştır. Ancak, üretim süreçlerinde değişimlerin meydana gelmesi sebebiyle hatların yeniden dengelenmesi, pratikte daha sık karşılaşılan bir durumdur.

Bu tez çalışmasında, literatürdeki boşluğu doldurmak amacıyla mevcut durumda manuel olarak işletilen sistemlerin iş birlikçi yapıya geçişini ele alan İR-MHYD problemi önerilmiştir. İR-MHYD problemi, literatürde bilinen İR-MHD ve MHYD problemlerinin bütünleştirilmesinden meydana gelmektedir.

Temel hat dengeleme kısıtlarına ek olarak bütçe, ergonomik risk ve ilk hat benzerliği kısıtlarının da dikkate alındığı bu çalışmada, problemin çözümü için bir matematiksel modelleme yaklaşımı ve HM-YAK isimli bir hiper-matsezgisel algoritma önerilmiştir. HM-YAK algoritması, kesin ve yaklaşık çözüm yöntemlerinin özelliklerini barındırmaktadır.

Literatürden uyarlanan karşılaştırma problemleri üzerinde gerçekleştirilen testlere ilişkin sonuçlar, HM-YAK algoritmasının çözüm kalitesi ve çözüm süresi açısından geliştirilen matematiksel modelden ve YAK algoritmasının temel versiyonundan üstün performans sergilediğini göstermiştir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular ışığında aşağıdaki yönetsel çıkarımlar ortaya konmuştur:

- İş birlikçi sistemlerin yüksek potansiyelinden etkin biçimde yararlanılabilmesi için montaj hatlarında görev alacak işgören türlerinin farklı özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır. İnsan-robot iş birliğinin başarısı, sadece teknolojik entegrasyonla değil, aynı zamanda bu çeşitliliğe uygun atama stratejilerinin geliştirilmesiyle mümkündür.
- Montaj hattının performansını sürdürülebilir bir seviyede tutmak için her istasyona en uygun işgören türünün tahsis edilmesi, operasyonel verimliliğin yanı sıra ergonomik iyileşme ve iş güvenliği açısından da kritik bir öneme sahiptir. Yanlış işgören atama kararları, yalnızca çevrim süresini olumsuz etkilemekle kalmayıp, iş kazaları riskini ve çalışan memnuniyetsizliğini de artırabilir.
- İşgören atamalarına ayrılabilecek bütçe, sadece ekonomik bir kısıt değil; sistem performansını çok boyutlu olarak etkileyen belirleyici bir faktördür. Bütçe düzeyi; hattın çevrim süresi, ergonomik risklerin azaltılması ve iş gücü çeşitliliğinin etkin kullanımı üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Bu nedenle, karar vericilerin bütçeyi yalnızca bir maliyet kontrolü aracı olarak değil, üretim kalitesini ve iş sağlığını ve güvenliğini optimize etmeye yönelik stratejik bir araç olarak değerlendirmeleri gerekmektedir.
- İş birlikçi sistemlerin devreye alınması, yalnızca verimlilik değil; iş güvenliği ve ergonomi açısından da önemli kazanımlar sağlayabilmektedir. Yüksek riskli ve zorlayıcı görevlerde kobotların desteği sayesinde işçilerin kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Bu durum, çalışan sağlığını korumanın ötesinde, iş gücü devrini azaltmakta ve üretkenliği artırmaktadır. Ayrıca, ergonomik risklerin dengeleme sürecine entegre edilmesi, daha bütüncül ve insan odaklı sistemlerin kurulmasına olanak sağlamaktadır.
- Mevcut sistemleri tamamen kaldırmak yerine iş birlikçi bileşenlerle yapılacak yeniden yapılandırmalar, maliyet etkinliği ve kaynak verimliliği açısından daha uygulanabilir bir yaklaşım sunmaktadır. Endüstri 5.0'a uygun olarak mevcut sistemleri dönüştürmeye yönelik yeniden yapılandırma stratejilerinin benimsenmesi, teknolojik geçiş sürecini kolaylaştırmakta ve uzun vadede rekabet gücünü artırmaktadır.

Bu tez çalışması, yeni bir MHD problemi türünü tanıtması ve gelişmiş özelliklere sahip bir çözüm yaklaşımı geliştirmesi açısından literatüre katkı sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, insanların ve robotların montaj sistemlerinde sundukları farklı avantajlardan yararlanabilmek amacıyla belirli bir dönemde montaj hattına atanacak işgörenler için ayrılacak bütçenin çevrim süresi üzerindeki etkisi ile ilgili fikir sunması, çeşitli özelliklere sahip işgörenlerin birlikte çalışmasına yönelik stratejilerin değerlendirilmesi ve mevcut sistemlerin değişen koşullara uyum sağlayacak şekilde yeniden yapılandırılmasına ilişkin destek sunması bakımından endüstriyel uygulayıcılara hem stratejik hem de operasyonel düzeyde karar süreçlerinde rehberlik etme kapasitesine sahiptir.

Önerilen çözüm yaklaşımları, yalnızca bir optimizasyon yöntemi sunmakla kalmayıp, aynı zamanda karar vericilere montaj hattı tasarımı ve yeniden yapılandırma süreçlerinde yol gösterebilecek bir karar destek sistemi altyapısının temelini oluşturmaktadır. İşgörenler bazında yeniden yapılandırma süreci, artan sistem karmaşıklığı nedeniyle atama stratejilerinin titizlikle planlanmasını gerektirmektedir. Bu bağlamda, yöneticilerin sadece fiziksel entegrasyonu değil, operasyonel karmaşıklığı da etkin biçimde yönetebilecek model tabanlı karar destek sistemlerini dikkate alması büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, geliştirilen yöntemlerin dijital ikiz sistemleriyle entegre edilerek kullanıcı dostu bir arayüzle desteklenen platformlara dönüştürülmesi, pratik uygulamalar açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır.

Gelecek çalışmalarda, İR-MHYD probleminin U-tipi, çift taraflı, karma veya çok modelli hatları ele alan farklı versiyonları önerilebilir. Endüstriyel uygulamalara daha gerçekçi bir bakış sunmak amacıyla problemin işlem süreleri açısından stokastik ve bulanık türlerinin çalışılması faydalı olabilir. Ayrıca, ergonomik faktörlerin daha ayrıntılı incelendiği çalışmalar, örneğin işçilerin zorlanma derecelerini gösteren kapsamlı benzetim modelleri veya biyomekanik analizlerin entegre edildiği yaklaşımlar geliştirilerek, çözüm sürecine daha derinlemesine dahil edilebilir. Yeni çözüm yöntemleri geliştirilerek önerilen yaklaşımların performansı çeşitli karşılaştırma örnekleri ve gerçek hayat problemleri üzerinde sınanabilir. Bu çalışmada geliştirilen yöntemlerin; gerçek zamanlı izleme ve yeniden yapılandırma yeteneklerine sahip bir karar destek sistemine dönüştürülmesi, dijital dönüşüm süreçleri açısından gelecek çalışmalara önemli katkılar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Aaltonen, I., & Salmi, T. (2019). *Experiences and expectations of collaborative robots in industry and academia: Barriers and development needs*. Proceedings of the 29th International Conference on Flexible Automation and Intelligent, Ireland, 38, 1151-1158. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.204

ABB Robotics UK (2016). *Why the Time is Right to Consider Robots for Low Volume Processes*. Erişim: https://www.linkedin.com/pulse/why-time-right-consider-robots-low-volume-processes-abb-robotics-uk, Erişim tarihi: 23.10.2019.

Adeppa, A. (2015). *A study on basics of assembly line balancing*. International Journal on Emerging Technologies, 6(2), 294-297.

Ağpak, K. (2010). *An approach to find task sequence for re-balancing of assembly lines*. Assembly Automation, 30(4), 378-387. https://doi.org/10.1108/01445151011075834

Ağpak, K., Gökçen, H., Saray, N. N., Özel, S. (2002). *Stokastik görev zamanlı tek modelli U tipi montaj hattı dengeleme problemleri için bir sezgisel*. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 17(4), 115-124.

Akpınar, Ş. (2017). *Tip-II montaj hattı dengeleme problemi için büyük komşuluk arama algoritması*. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23(4), 444-450. https://doi.org/10.5505/pajes.2016.75975

Aksoy, S. (2017). *Değişen teknolojiler ve Endüstri 4.0: Endüstri 4.0'ı anlamaya dair bir giriş*. SAV Katkı, (4), 34-44.

Archetti, C., & Speranza, M. G. (2014). *A survey on matheuristics for routing problem*s. EURO Journal on Computational Optimization, 2(4), 223-246. https://doi.org/10.1007/s13675-014-0030-7

Asadi, N., Jackson, M., & Fundin, A. (2017). *Linking product design to flexibility in an assembly system: A case study*. Journal of Manufacturing Technology Management, 28(5), 610-630. https://doi.org/10.1108/JMTM-10-2016-0144

Avrupa Komisyonu (2012). *Innovating for sustainable growth: A bioeconomy for Europe*. Erişim: Publications Office of the European Union: https://data.europa.eu/doi/10.2777/6462

Avrupa Komisyonu (2021). *Industry 5.0 – Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*. Erişim: Publications Office of the European Union: https://data.europa.eu/doi/10.2777/308407

KAYNAKLAR DİZİNİ

Barravecchia, F., Mastrogiacomo, L., & Franceschini, F. (2023). *A general cost model to assess the implementation of collaborativerobots in assembly processes*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 125, 5247-5266. https://doi.org/10.1007/s00170-023-10942-z

Bartholdi, J. J. (1993). *Balancing two-sided assembly lines: A case study*. International Journal of Production Research, 31(10), 2447-2461. https://doi.org/10.1080/00207549308956868

Battaïa, O, & Dolgui, A. (2013). A *taxonomy of line balancing problems and their solution approaches.* International Journal of Production Economics, 142, 259-277. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.10.020

Bauer, W., Bender, M., Braun, M., Rally, P., & Scholtz, O. (2016). *Lightweight robots in manual assembly - best to start simply*. Erişim: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO): https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/961b5036-c442-47db-84a6-b5334b4c1221/content

Baybars, I. (1986). *A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem*. Management Science, 32(8), 909-932. https://doi.org/10.1287/mnsc.32.8.909

Baykasoğlu, A., Demirkol Akyol, Ş. (2014). *Ergonomik montaj hattı dengeleme*. Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 29(4), 785-792. https://doi.org/10.17341/gummfd.00296

Becker, C., & Scholl, A. (2006). *A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing*. European Journal of Operational Research, 168(3), 694-715. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.023

Bekdemir, P., & Özmehmet Taşan, S. (2024). *Cost-based assembly line balancing and worker-cobot assignment problem under ergonomic constraints*. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 39(1), 461-472. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1182311

Belassiria, I., Mazouzi, M., ELfezazi, S., Cherrafi, A., & ELMaskaoui, Z. (2018). *An integrated model for assembly line re-balancing problem*. International Journal of Production Research, 56(16), 5324-5344. https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1467061

Borg, G. (1990). *Psychophysical scaling with applications in physical work and the perception of exertion*. Scandinavian Journal of Work, Environment & Health, 16, 55-58. https://doi.org/10.5271/sjweh.1815

KAYNAKLAR DİZİNİ

Boschetti, M. A., & Maniezzo, V. (2022). *Matheuristics: using mathematics for heuristic design*. 4OR, 20(2), 173-208. https://doi.org/10.1007/s10288-022-00510-8

Boschetti, M.A., & Maniezzo, V. (2024). *Contemporary approaches in matheuristics an updated survey*. Annals of Operations Research, 343, 663-700. https://doi.org/10.1007/s10479-024-06302-z

Bowman, E. H. (1960) *Assembly-line Balancing by linear programming*. Operations Research, 8(3), 385-389. https://doi.org/10.1287/opre.8.3.385

Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl, A. (2006). *A classification of assembly line balancing problems*. European Journal of Operational Research, 183(2), 674-693. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.10.010

Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl, A. (2008). *Assembly line balancing: Which model to use when*. International Journal of Production Economics, 111(2), 509-528. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.02.026

Bryton, B. (1954). *Balancing of a continuous production line*, M.Sc. Thesis, Northwestern University, 132 p. (unpublished).

Budak, G., & Chen, X. (2020). *Pace making and worker reassignment for assembly line rebalancing*. SN Applied Sciences, 2(9), 1-15. https://doi.org/10.1007/s42452-020-03368-9

Burke, E. K., Gendreau, M., Hyde, M., Kendall, G., Ochoa, G., Özcan, E., & Qu, R. (2013). *Hyper-heuristics: A survey of the state of the art*. Journal of the Operational Research Society, 64, 1695-1724. https://doi.org/10.1057/jors.2013.71

Burke, E. K., Hyde, M., Kendall, G., Ochoa, G., Özcan, E., & Woodward, J. R. (2010). *A classification of hyper-heuristic approaches. In M. Gendreau & J.Y. Potvin (Eds.), Handbook of Metaheuristics* (2nd ed., pp. 449-468). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1665-5_15

Burke, E., Kendall, G., Newall, J., Hart, E., Ross, P., & Schulenburg, S. (2003). *Hyper-Heuristics: An emerging direction in modern search technology. In F. Glover & G.A. Kochenberger (Eds.), Handbook of Metaheuristics* (1st ed., pp. 457-474). Springer. https://doi.org/10.1007/0-306-48056-5_16

Cai, M., Wang, G., Luo, X., & Xu, X. (2025). *Task allocation of human-robot collaborative assembly line considering assembly complexity and workload balance*. International Journal of Production Research. Erken çevrimiçi yayın. https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2442546

KAYNAKLAR DİZİNİ

Can, E., & Öner, A. (2021). *Analysis and balancing of assembly line in a machine molding factory*. International Advanced Researches and Engineering Journal, 5(1), 87-96. https://doi.org/10.35860/iarej.772678

Chander, B., Pal, S., De, D., & Buyya, R. (2022). *Artificial intelligence-based internet of things for Industry 5.0. In S. Pal., D. De & R. Buyya (Eds.), Artificial Intelligence-based Internet of Things Systems* (1st ed., pp. 3-45). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87059-1_1

Chutima, P. (2020). *A comprehensive review of robotic assembly line balancing problem*. Journal of Intelligent Manufacturing, 33(1), 1-34. https://doi.org/10.1007/s10845-020-01641-7

Chutima, P., & Khotsaenlee, A. (2022). *Multi-objective parallel adjacent U-shaped assembly line balancing collaborated by robots and normal and disabled workers*. Computers & Operations Research, 143, Article 105775. https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105775

Corominas, A., Pastor, R., & Plans, J. (2008). *Balancing assembly line with skilled and unskilled workers*. Omega, 36(6), 1126-1132 https://doi.org/10.1016/j.omega.2006.03.003

Correia Simões, A., Lucas Soares, A., & Barros, A. C. (2020). *Factors influencing the intention of managers to adopt collaborative robots (cobots) in manufacturing organizations*. Journal of Engineering and Technology Management, 57, Article 101574. https://doi.org/10.1016/j.jengtecman.2020.101574

Cowling, P., Kendall, G., & Soubeiga, E. (2001). *A hyperheuristic approach to scheduling a sales summit*. Proceedings of the 3rd International Conference on Practice and Theory of Automated Timetabling, Germany, 2079(47), 176-190. https://doi.org/10.1007/3-540-44629-x_11

Çavdar, S. S. (2019). *Endüstri 4.0 ve işgücü piyasasına yansımaları* [Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp

Çelik, E., Kara, Y., & Atasagun, Y. (2014). *A new approach for rebalancing of U-lines with stochastic task times using ant colony optimisation algorithm*. International Journal of Production Research, 52(24), 7262-7275. https://doi.org/10.1080/00207543.2014.917768

Çil, Z. A., Li, Z., Mete, S., & Özceylan, E. (2020). *Mathematical model and bee algorithms for mixed-model assembly line balancing problem with physical human–robot collaboration*. Applied Soft Computing Journal, 93, Article 106394. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106394

KAYNAKLAR DİZİNİ

Çimen, T., Baykasoğlu, A., & Akyol, Ş. D. (2022). *Assembly line rebalancing and worker assignment considering ergonomic risks in an automotive parts manufacturing plant*. International Journal of Industrial Engineering Computations, 13(3), 363-384. https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2022.2.001

Dalle Mura, M., & Dini, G. (2019). *Designing assembly lines with humans and collaborative robots: A genetic approach*. CIRP Annals, 68(1), 1-4. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.006

Dalle Mura, M., & Dini, G. (2022). *Job rotation and human–robot collaboration for enhancing ergonomics in assembly lines by a genetic algorithm*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 118, 2901-2914. https://doi.org/10.1007/s00170-021-08068-1

Dalle Mura, M., & Dini, G. (2023). *Improving ergonomics in mixed-model assembly lines balancing noise exposure and energy expenditure*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 40, 44-52. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.11.005

Davila Delgado, J. M., Oyedele, L., Ajayi, A., Akanbi, L., Akinade, O., Bilal, M., & Owolabi, H. (2019). *Robotics and automated systems in construction: Understanding industry-specific challenges for adoption*. Journal of Building Engineering, 26, Article 100868. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100868

Demir, K. A., Döven, G., & Sezen, B. (2019). I*ndustry 5.0 and human-robot co-working*. Proceedings of the 3rd World Conference on Technology, Innovation and Entrepreneurship, Türkiye, 158, 688-695. https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.104

Demir, K. A., & Cicibaş, H. (2019). *The next industrial revolution: Industry 5.0 and discussions on Industry 4.0*. Proceedings of the 4th International Management Information Systems Conference: Industry 4.0, Türkiye, 247-260.

Denzinger, J., Fuchs, M., & Fuchs, M. (1997). *High performance ATP systems by combining several AI methods*. Proceedings of the 15th International Joint Conference on Artifical Intelligence, Japan, 1, 102-107. https://doi.org/10.22028/D291-41582

Derrac, J., García, S., Molina, D, & Herrera, F. (2011). A *practical tutorial on the use of nonparametric statistical tests as a methodology for comparing evolutionary and swarm intelligence algorithms*. Swarm and Evolutionary Computation, 1, 3-18. https://doi.org/10.1016/j.swevo.2011.02.002

Derya, H. (2018). *Endüstri devrimleri ve Endüstri 4.0*. G.Ü. İslahiye İİBF Uluslararası E-Dergi*,* 2(2), 1-20. https://dergipark.org.tr/tr/pub/iiibfud/issue/39908/457467

KAYNAKLAR DİZİNİ

Dimény, I., & Koltai, T. (2022). *Minimising workers' workload in partially automated assembly lines with human-robot collaboration*. IFAC-PapersOnLine, 55, 1734-1739. https://doi.org/10.1016/j.ifacol. 2022.09.648

Dimény, I., Koltai, T., Sepe, C., Murino, T., Gallina, V., & Komenda, T. (2021). *MILP model to decrease the number of workers in assembly lines with human-robot collaboration*. IFAC-PapersOnLine, 54(1), 169-174. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.019

Dökeroğlu, T., Küçükyılmaz, T., & Talbi, E. G. (2024). *Hyper-heuristics: A survey and taxonomy*. Computers & Industrial Engineering, 187, Article 109815. https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109815

Drake, J. H., Kheiri, A., Özcan, E., & Burke, E. K. (2020). *Recent advances in selection hyper-heuristics*. European Journal of Operational Research, 285(2), 405-428. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.07.073

Erel, E., & Sarin, S. (1998). *A survey of the assembly line balancing procedures*. Production Planning and Control, 9(5), 414-434. https://doi.org/10.1080/095372898233902

Falkenauer, E. (2005). *Line balancing in the real world*. Proceedings of the 2nd International Conference on Product Lifecycle Management, France, 5, 360-370.

Fan, G., Zheng, H., Jiang, Z., Liu, J., & Lou, S. (2024). *Multi-objective assembly line rebalancing problem based on complexity measurement in green manufacturing*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 132, Article 107884. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.107884

Gamberini, R., Gebennini, E., Grassi, A., & Regattieri, A. (2009). *A multiple single-pass heuristic algorithm solving the stochastic assembly line rebalancing problem*. International Journal of Production Research, 47(8), 2141-2164. https://doi.org/10.1080/00207540802176046

Gamberini, R., Grassi, A., & Rimini, B. (2006). *A new multi-objective heuristic algorithm for solving the stochastic assembly line re-balancing problem*. International Journal of Production Economics, 102(2), 226-243. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2005.02.013

Ghosh, S., & Gagnon, R. J. (1989). *A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems*. International Journal of Production Research, 27(4), 637-670. https://doi.org/10.1080/00207548908942574

Girit, U., & Azizoğlu, M. (2021). *Rebalancing the assembly lines with total squared workload and total replacement distance objectives*. International Journal of Production Research, 59(22), 6702-6720. https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1823027

KAYNAKLAR DİZİNİ

Grangeon, N., Leclaire, P., & Norre, S. (2011). *Heuristics for the re-balancing of a vehicle assembly line*. International Journal of Production Research, 49(22), 6609-6628. https://doi.org/10.1080/00207543.2010.539025

Gökçen, H., Ağpak, K., & Benzer, R. (2006). *Balancing of parallel assembly lines*. International Journal of Production Economics, 103(2), 600-609. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2005.12.001

Güdek, B. (2023). *Endüstriyel dönüşüm ve Endüstri 5.0*. Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 16(4), 1129-1142. https://doi.org/10.25287/ohuiibf.1331731

Hashemi-Petroodi, S. E., Dolgui, A., Kovalev, S., Kovalyov, M. Y., & Thevenin, S. (2021). *Workforce reconfiguration strategies in manufacturing systems: A state of the art*. International Journal of Production Research, 59(22), 6721-6744. https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1823028

Hou, W., Wu, C., & Zhang, S. (2024). *Assembly line balancing and optimal scheduling for flexible manufacturing workshop*. Journal of Mechanical Science and Technology, 38(6), 2757-2772. https://doi.org/10.1007/s12206-024-2206-2

Hu, X., Wu, C., & Zhang, Y. (2020). *A heuristic method for two-sided assembly line reconfiguration in IoT environment*. Journal of Internet Technology, 21(5), 1491-1502. https://doi.org/10.3966/160792642020092105022

Huang, Y., Sheng, B., Luo, R., Lu, Y., Fu, G., & Yin, X. (2024*). Solving human-robot collaborative mixed-model two-sided assembly line balancing using multi-objective discrete artificial bee colony algorithm*. Computers & Industrial Engineering, 187, Article 109776. https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109776

Kağnıcıoğlu, H. (2012). *İşletmelerde Üretim Yönetimi ve Sistemi 1. Cilt. C. H. Kağnıcıoğlu (Ed.), Üretim Yönetimi içinde* (s. 3-30). Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi Yayınları.

Kalender, F. Y., Yılmaz, M., Türkbey, O. (2013). *Montaj hattı dengeleme problemine bulanık bir yaklaşım.* Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 23(1), 1-12.

Karaboğa, D. (2005). *An idea based on honey bee swarm for numerical optimization*, (Technical Report-TR06). Erişim: Erciyes University Department of Computer Engineering Intelligent Systems Research Group website: https://abc.erciyes.edu.tr/pub/tr06_2005.pdf

KAYNAKLAR DİZİNİ

Karaş, A. (2020). *Montaj hattı işçi atama ve yeniden dengeleme problemi için bir yapay arı kolonisi algoritması* [Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp

Karaş, A., & Özçelik, F. (2021). *Assembly line worker assignment and rebalancing problem: A mathematical model and an artificial bee colony algorithm*. Computers & Industrial Engineering, 156, Article 107195. https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107195

Karaş, Çelik, A., Özçelik, F. (2024). *Hiyerarşik işçi ataması ile tip-II montaj hattı dengeleme problemi için bir matematiksel model*. Endüstri Mühendisliği, 35(1), 1-21. https://doi.org/10.46465/endustrimuhendisligi.1333382

Karaulova, T., Andronnikov, K., Mahmood, K., & Shevtshenko, E. (2019). *Lean automation for low-volume manufacturing environment*. Proceedings of the 30th International Danube Adria Association for Automation & Manufacturing Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, Austria, 59-68. https://doi.org/10.2507/30th.daaam.proceedings.008

Katiraeea, N., Calzavara, M. Finco, S. Battaïa, & O., Battini, D. (2023). *Assembly line balancing and worker assignment considering workers' expertise and perceived physical effort*. International Journal of Production Research, 61(20), 6939-6959. https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2140219

Keshvarparast, A., Battaia, O., Pirayesh, A., & Battini, D. (2022). *Considering physical workload and workforce diversity in a collaborative assembly line balancing (CALB) optimization model*. IFAC-PapersOnLine, 55(10), 157-162. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.383

Keshvarparast, A., Katiraee, N., Finco, S. & Calzavara, M. (2025). *Integrating collaboration scenarios and workforce individualization in collaborative assembly line balancing*. International Journal of Production Economics, 279, Article 109450. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2024.109450

Keshvarparast, A., Katiraee, N., Pirayesh, A., Battini, D., & Berti, N. (2023*). Integrated resource optimization in a multi-product separated line collaborative assembly line balancing problem (MPSLC-ALBP)*. IFAC-PapersOnLine, 56(2), 713-718. https://doi.org /10.1016/j.ifacol.2023.10.1650

Kheirabadi, M., Keivanpour, S., Frayret, J. M., & Chinniah, Y. (2025). *Safety-driven optimisation of human–robot collaborative assembly line balancing*. International Journal of Production Research. Erken çevrimiçi yayın. https://doi.org/10.1080/00207543.2025.2469288

KAYNAKLAR DİZİNİ

Kılıç, R. (2023). *Sanayi devrimlerinin serüveni: Endüstri 1.0'dan Endüstri 5.0'a*. Takvim-I Vekayi, 11(2), 276-291. https://dergipark.org.tr/tr/pub/takvim/issue/80114/1409937

Kiraz, B., Etaner Uyar, A. S., & Özcan, E. (2013). *Selection hyper-heuristics in dynamic environments*. Journal of the Operational Research Society, 64(12), 1753-1769. https://doi.org/10.1057/jors.2013.24

Koltai, T., Dimény, I., Gallina, V., Gaal, A., & Sepe, C. (2021). *An analysis of task assignment and cycle times when robots are added to human-operated assembly lines, using mathematical programming models*. International Journal of Production Economics, 242, Article 108292. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108292

Krüger, J., Lien, T. K., & Verl, A. (2009). *Cooperation of human and machines in assembly lines*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 58(2), 628-646. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.09.009

Leventer, G., Altun Ada, A. (2023). *Sanayi devrimleri tarihinde kadın istihdamı ve iktisadi gelişim süreci*. Aksaray Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 15(3), 279-302. https://doi.org/10.52791/aksarayiibd.1325208

Li, Y. (2017). *The type-II assembly line rebalancing problem considering stochastic task learning*. International Journal of Production Research, 55(24), 7334-7355. https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1346316

Li, Z., Janardhanan, M. N., & Tang, Q. (2021a). *Multi-objective migrating bird optimization algorithm for cost-oriented assembly line balancing problem with collaborative robots*. Neural Computing and Applications, 33(14), 8575-8596. https://doi.org/10.1007/s00521-020-05610-2

Li, Z., Janardhanan, M., Tang, Q., & Zhang, Z. (2023). *Models and algorithms for U-shaped assembly line balancing problem with collaborative robots*. Soft Computing, 27(14), 9639-9659. https://doi.org/10.1007/s00500-023-08130-y

Li, Y., Li, Z., & Saldanha-da-Gama, F. (2021b). *New approaches for rebalancing an assembly line with disruptions*. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 35(10-11), 1059-1076. https://doi.org/10.1080/0951192X.2021.1925967

Li, Y., Liu, M., Saldanha-da-Gama, F., & Yang, Z. (2024). *Risk-averse two-stage stochastic programming for assembly line reconfiguration with dynamic lot sizes*. Omega, 127, Article 103092. https://doi.org/10.1016/j.omega.2024.103092

Li, Y. C., & Wang, X. (2024). *Human-robot collaboration assembly line balancing considering cross-station tasks and the carbon emissions*. Advances in Production Engıneering & Management, 19(1), 31-45. https://doi.org/10.14743/apem2024.1.491

KAYNAKLAR DİZİNİ

Maddikunta, P. K. R., Pham, Q. V., Prabadevi, B., Deepa, N., Dev, K., Gadekallu, T. R., Ruby, R., & Liyanage, M. (2022). *Industry 5.0: A survey on enabling technologies and potential applications*. Journal of Industrial Information Integration, 26, Article 100257. https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100257

Mahbub, R. (2008). *An investigation into the barriers to the implementation of automation and robotics technologies in the construction industry* [Doctoral dissertation, Queensland University of Technology]. QUT ePrints. https://eprints.qut.edu.au/26377

Makssoud, F., Battaïa, O., Dolgui, A., Mpofu, K., & Olabanji, O. (2015). *Re-balancing problem for assembly lines: New mathematical model and exact solution method*. Assembly Automation, 35(1), 16-21. https://doi.org/10.1108/aa-07-2014-061

Malik, A. A., & Bilberg, A. (2019). *Collaborative robots in assembly: A practical approach for tasks distribution*. Proceedings of the 52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems, Slovenia, 81, 665-670. https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.173

Mao, Z., Sun, Y., Fang, K., Huang, D., & Zhang, J. (2024a). *Balancing and scheduling of assembly line with multi-type collaborative robots*. International Journal of Production Economics, 271, Article 109207. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2024.109207

Mao, Z., Sun, Y., Fang, K., Huang, D., & Zhang, J. (2024b). *Model and metaheuristic for human-robot collaboration assembly line worker assignment and balancing problem*. Computers & Operations Research, 165, Article, 106605. https://doi.org/10.1016/j.cor.2024.106605

Mao, Z., Zhang, J., Fang, K., Huang, D., & Sun, Y. (2023). *Balancing U-type assembly lines with human–robot collaboration*. Computers & Operations Research, 159, Article 106359. https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106359

Mao, Z., Zhang, J., Sun, Y., Fang, K., & Huang, D. (2024c*). Balancing parallel assembly lines with human-robot collaboration: Problem definition, mathematical model and tabu search approach*. International Journal of Production Research, 63(1), 51-85. https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2356627

Ma'ruf, A., Nugraha, R. C., Cakravastia, A., & Halim, A. H. (2024). *A mathematical model and ant colony algorithm for assembly line balancing problem with human-robot collaboration and alternative subgraphs*. IEEE Access, 12, 107516-107528. https://doi.org/10.1109/access.2024.3437410

Michels, A. S., & Costa, A., M. (2022). *Conserving workforce while temporarily rebalancing assembly lines under demand disruption*. International Journal of Production Research, 60(21), 6616-6636. https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1998694

KAYNAKLAR DİZİNİ

Miltenburg, J., & Wijngaard, J. (1994). *The U-line line balancing problem*. Management Science, 40(10), 1378-1388. https://doi.org/10.1287/mnsc.40.10.1378

Montini, E., Daniele, F., Agbomemewa, L., Confalonieri, M., Cutrona, V., Bettoni, A., Rocco, P., & Ferrario, A. (2024). *Collaborative robotics: A survey from literature and practitioners perspectives*. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 110, Article 117. https://doi.org/10.1007/s10846-024-02141-z

Ngoo, C. M., Goh, S. L., Sze, S. N., Sabar, N. R., Hijazi, M. H. A., & Kendall, G. (2024). *A survey of matheuristics for combinatorial optimisation problems: Variants, trends and opportunities*. Applied Soft Computing, 164, Article 111947. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111947

Nikkerdar, M., & ElMaraghy, W. (2025). Smart adaptable assembly line rebalancing and maintenance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Erken çevrimiçi yayın. https://doi.org/10.1007/s00170-025-15379-0

Nilakantan, J. M., & Ponnambalam, S. G. (2016). *Robotic U-shaped assembly line balancing using particle swarm optimization*. Engineering Optimization, 48(2), 231-252. https://doi.org/10.1080/0305215x.2014.998664

Nourmohammadi, A., Fathi, M., Arbaoui, T., & Slama, I. (2024a). *Multi-objective optimization of cycle time and robot energy expenditure in human-robot collaborated assembly lines*. Proceedings of the 5th International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing, Portugal, 232, 1279-1288. https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.01.126

Nourmohammadi, A., Fathi, M., & Ng, A. H. C. (2022a). *Balancing and scheduling assembly lines with human-robot collaboration tasks*. Computers and Operations Research, 140, Article 105674. https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105674

Nourmohammadi, A., Fathi, M., & Ng, A. H. C. Mahmoodi, E. (2022b). *A genetic algorithm for heterogenous human-robot collaboration assembly line balancing problems*. Proceedings of the 55th CIRP Conference on Manufacturing Systems, Switzerland, 107, 1444-1448. https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.172

Nourmohammadi, A., Fathi, M., & Ng, A. H. C. (2024b). *Balancing and scheduling human-robot collaborated assembly lines with layout and objective consideration*. Computers & Industrial Engineering, 187, Article 109775. https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109775

Nourmohammadi, A., Fathi, M., Zandieh, M., &, Ghobakhloo, M. (2019). *A water-flow like algorithm for solving U-shaped assembly line balancing problems*. IEEE Access, 7, 129824-129833. https://doi.org/10.1109/access.2019.2939724

KAYNAKLAR DİZİNİ

Nousala, S., Metcalf, G., & Ing, D. (Ed.). (2024). *Industry 4.0 to Industry 5.0: Explorations in the transition from a techno-economic to a socio-technical future (1st Ed.)*. Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-99-9730-5

Oliveira, F.S., Vittori, K., Rusell, R.M.O., & Travassos, X.L. (2012). *Mixed assembly line re-balancing: A binary integer approach applied to real world problems in the automotive industry*, International Journal of Automotive Technology, 13(6), 933-940, https://doi.org/10.1007/s12239-012-0094-4

Otto, A., & Li, X. (2020). *Product sequencing in multiple-piece-flow assembly lines*. Omega, 91, Article 102055. https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.03.013

Özcan, E., Bilgin, B., & Korkmaz, E. E. (2008). *A comprehensive analysis of hyper-heuristics*. Intelligent Data Analysis, 12(1), 3-23. https://doi.org/10.3233/ida-2008-12102

Özcan, U., Gökçen, H., & Toklu, B. (2010). *Balancing parallel two-sided assembly lines*. International Journal of Production Research, 48(16), 4767-4784. https://doi.org/10.1080/00207540903074991

Pazar Araştırma Raporu (2018). *Collaborative robot market by payload capacity (up to 5 kg, between 5 and 10 kg, above 10 kg), industry (automotive, electronics, metals & machining, plastics & polymers, food & beverages, healthcare), application, and geography - global forecast to 2025* (SE 4480). Erişim: Markets and Markets research platform: https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/collaborative-robot-market-194541294.html

Pazar Araştırma Raporu (2024). *Collaborative robot market size, share, statistics, and industry grwoth analysis by payload (up to 5 kg, 5-10 kg, 10-25 kg, & more than 25 kg), industry (automotive, electronics, metals & machining), region – global growth driver and industry forecast to 2030* (SE 4480). Erişim: Markets and Markets research platform: https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/collaborative-robot-market-194541294.html

Perez-Wheelock, R. M., Ou, W., Yenradee, P., & Huynh, V. N. (2022). *A demand-driven model for reallocating workers in assembly lines*. IEEE Access, 10, 80300-80320. https://doi.org/10.1109/access.2022.3194658

Rabbani, M., Behbahan, S. Z. B., & Farrokhi-Asl, H. (2020). *The collaboration of human-robot in mixed-model four-sided assembly line balancing problem*. Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications, 100(1), 71-81. https://doi.org/10.1007/s10846-020-01177-1

KAYNAKLAR DİZİNİ

Rahman, H. F., Janardhanan, M. N., & Ponnambalam, S. G. (2023). *Energy aware semiautomatic assembly line balancing problem considering ergonomic risk and uncertain processing time*. Expert Systems with Applications, 231, Article 120737. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120737

Rajwar, K., Deep, K., & Das, S. (2023). *An exhaustive review of the metaheuristic algorithms for search and optimization: taxonomy, applications, and open challenges*. Artificial Intelligence Review, 56, 13187-13257. https://doi.org/10.1007/s10462-023-10470-y

Sadrfaridpour, B., Saeidi, H., & Wang, Y. (2016). *An integrated framework for human-robot collaborative assembly in hybrid manufacturing cells*. Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, USA, 462-467. https://doi.org/10.1109/COASE.2016.7743441

Saif, U., Guan, Z., Wang, B., Mirza, J., & Huang, S. (2014). *A survey on assembly lines and its types*. Frontiers of Mechanical Engineering, 9(2), 202-216. https://doi.org/10.1007/s11465-014-0302-1

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

Samadhi, T. M. A. A., & Sumihartati, A. (2016). *Model for assembly line re-balancing considering additional capacity and outsourcing to face demand fluctuations*. Proceedings of the 2nd International Manufacturing Engineering Conference / 3rd Asia-Pacific Conference on Manufacturing Systems, Malaysia, 114. https://doi.org/10.1088/1757-899X/114/1/012092

Samouei, P., & Ashayeri, J. (2019). *Developing optimization & robust models for a mixed-model assembly line balancing problem with semi-automated operations*. Applied Mathematical Modelling, 72, 259-275. https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.02.019

Sancı, E., & Azizoğlu, M. (2017). *Rebalancing the assembly lines: exact solution approaches*. International Journal of Production Research, 55(20), 5991-6010. https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1319583

Scholl, A., & Becker, C. (2006). *State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing*. European Journal of Operational Research, 168(3), 666-693. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.022

Serin, F., Mete, S., & Çelik, E. (2019). *An efficient algorithm for U-type assembly line re-balancing problem with stochastic task times*. Assembly Automation, 39(4), 581-595. https://doi.org/10.1108/AA-07-2018-106

KAYNAKLAR DİZİNİ

Sikora, C. G. S., & Weckenborg, C. (2022). *Balancing of assembly lines with collaborative robots: Comparing approaches of the Benders' decomposition algorithm*. International Journal of Production Research, 61(15), 5117-5133. https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2093684

Sivasankaran, P., & Shahabudeen, P. (2014). *Literature review of assembly line balancing problems*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 74(9-12), 1665-1694. https://doi.org/10.1007/s00170-014-5944-y

Slama, I., Arbaoui, T., Nourmohammadi, A., & Fathi, M. (2023). *Assembly line balancing with collaborative robots under uncertainty of human processing times*. Proceedings of the 9th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, Italy, 2649-2653. https://doi.org/10.1109/CoDIT58514.2023.10284282

Stecke, K. E., & Mokhtarzadeh, M. (2022). *Balancing collaborative human–robot assembly lines to optimise cycle time and ergonomic risk*. International Journal of Production Research, 60(1), 25-47. https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1989077

Stief, P., Dantan, J. Y., Etienne, A., & Siadat, A. (2018). *A new methodology to analyze the functional and physical architecture of existing products for an assembly oriented product family identification*. Proceedings of the 28th CIRP Design Conference, France, 70, 47-52. https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.02.026

Sungur, B., & Yavuz, Y. (2015). *Assembly line balancing with hierarchical worker assignment*. Journal of Manufacturing Systems, 37, 290-298. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.08.004

Şentürk, G., Büber, H. (2023). *Endüstriyel değişim sürecinin insan kaynakları yönetimi uygulamalarına etkisi üzerine nitel bir çalışma*. Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 66, 65-74. https://doi.org/10.18070/erciyesiibd.1297142

Taguchi, G., Chowdhury, S., & Wu, Y. (2005). *Taguchi's quality engineering handbook*. Wiley.

Teoman, S. (2024). *Endüstri 5.0 kapsamında insan merkezli tedarik zinciri yapılandırmasına yönelik stratejik ve teknolojik çerçeve analizi*. Doğuş Üniversitesi Dergisi, 25(2), 375-387. https://doi.org/10.31671/doujournal.1372249

Thomopoulos, N.T. (2014). *Assembly Line Planning and Control* (1st ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-01399-2

KAYNAKLAR DİZİNİ

Tian, B., Janardhanan, M., & Marinelli, M. (2024a). *A systematic investigation of the barriers to effective implementation of human-robot assembly line: An integrated multi-criteria decision-making approach*. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 37(1-2), 198-223. https://doi.org/10.1080/0951192X.2023.2278114

Tian, B., Kaul, H., & Janardhanan, M. (2024b). *Balancing heterogeneous assembly line with multi-skilled human-robot collaboration via adaptive cooperative co-evolutionary algorithm*. Swarm and Evolutionary Computation, 91, Article 101762. https://doi.org/10.1016/j.swevo.2024.101762

Verma, D. (2024). *Industry 5.0: A human-centric and sustainable approach to industrial development*. International Journal of Social Relevance & Concern, 12(5), 17-21. https://doi.org/10.26821/IJSRC.12.5.2024.120507

Weckenborg, C., Kieckhäfer, K., Müller, C., Grunewald, M., & Spengler, T. S. (2020). *Balancing of assembly lines with collaborative robots*. Business Research, 13(1), 93-132. https://doi.org/10.1007/s40685-019-0101-y

Weckenborg, C., & Spengler, T. S. (2019). *Assembly line balancing with collaborative robots under consideration of ergonomics: A cost-oriented approach*. IFAC-PapersOnLine, 52(13), 1860-1865. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.473

Weckenborg, C., Thies, C., & Spengler, T. S. (2022). *Harmonizing ergonomics and economics of assembly lines using collaborative robots and exoskeletons*. Journal of Manufacturing Systems, 62, 681-702. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.02.005

Yang, H. (2024). *Balance of mixed flow assembly line based on industrial engineering mathematics and simulated annealing improved algorithm*. Results in Engineering, 22, Article 102071. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102071

Yang, C., Gao, J., & Sun, L. (2013). *A multi-objective genetic algorithm for mixed-model assembly line rebalancing*. Computers & Industrial Engineering, 65(1), 109-116. https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.11.033

Yaphiar, S., Nugraha, C., & Ma'ruf, A. (2020). *Mixed model assembly line balancing for human-robot shared tasks*. Computers & Operations Research, 140, 245-252. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0950-6_38

Yelles-Chaouche, A. R., Gurevsky, E., Brahimi, N., & Dolgui, A. (2021). *Reconfigurable manufacturing systems from an optimisation perspective: A focused review of literature*. International Journal of Production Research, 59(21), 6400-6418. https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1813913

Yıldız Tonga, M., Tonga, M. (2022). *Endüstri 4.0'a genel bir bakış: Sanayinin geleceği*. G.Ü. İslahiye İİBF Uluslararası E-Dergi, 6(6), 40-60.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Yılmaz, E., Erol, R. (2005). *Montaj hatlarının değişen koşullar altında yeniden dengelenmesi*. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 20(1), 213-228.

Zacharia, P. T., Xidias, E. K., & Nearchou A. C. (2024). *The fuzzy human-robot collaboration assembly line balancing problem*. Computers & Industrial Engineering, 187, Article 109774. https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109774

Zha, J., & Yu, J. J. (2014). *A hybrid ant colony algorithm for U-line balancing and rebalancing in just-in-time production environment*. Journal of Manufacturing Systems, 33(1), 93-102. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2013.08.002

Zhang, X., Fathollahi-Fard, A. M., Tian, G., Yaseen, Z. M., Pham, D. T., Zhao, Q., & Wu, J. (2024). *Human-robot collaboration in mixed-flow assembly line balancing under uncertainty: An efficient discrete bees algorithm*. Journal of Industrial Information Integration, 41(11), Article 100676. https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100676

Zhang, Y., Hu, X., & Wu, C. (2018). *A modified multi-objective genetic algorithm for two-sided assembly line re-balancing problem of a shovel loader*. International Journal of Production Research, 56(9), 3043-3063. https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1402136

Zhang, Y., Hu, X., & Wu, C. (2019). *Improved imperialist competitive algorithms for rebalancing multi-objective two-sided assembly lines with space and resource constraints*. International Journal of Production Research, 58(12), 3589-3617. https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1633023

Zheng, C., Li, Z., Janardhanan, M., Zhang, Z., &, Zhang, L. (2025a). *Improved swarm-based metaheuristics for optimizing human–robot collaborative assembly lines with multi-type collaborative robots*. Flexible Services and Manufacturing Journal. Erken çevrimiçi yayın. https://doi.org/10.1007/s10696-024-09582-6

Zheng, C., Li, Z., Janardhanan, M., Zhang, Z., &, Zhang, L. (2025b). *Balancing and scheduling human-robot collaborative assembly lines with heterogeneous robots and limited resources: Constraint programming approach and fruit fly optimization algorithm*. Computers & Industrial Engineering. 203, Article 111046. https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.111046

Zhu, X., Xu, Z., Wang, J., & Yang, X. (2024). *An improved variable neighborhood search for the reconfigurable assembly line reconfiguring problem*. Applied Sciences, 14(19), Article 9130. https://doi.org/10.3390/app14199130

Zizic, M. C., Mladineo, M., Gjeldum, N., & Celent, L. (2022). *From Industry 4.0 towards Industry 5.0: A review and analysis of paradigm shift for the people, organization and technology*. Energies, 15(14), Article 5221. https://doi.org/10.3390/en15145221