



**MONTAJ HATTI İŞÇİ ATAMA VE DENGELEME PROBLEMİ İÇİN ÇOK AMAÇLI
GENETİK ALGORİTMA: BİR OTOMOTİV YAN SANAYİSİNDE UYGULAMA**

(Yüksek Lisans Tezi)

Gözde KURADA

Kütahya - 2023

T.C.
KÜTAHYA DUMLUPINAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**MONTAJ HATTI İŞÇİ ATAMA VE DENGELEME PROBLEMİ
İÇİN ÇOK AMAÇLI GENETİK ALGORİTMA: BİR OTOMOTİV
YAN SANAYİSİNDE UYGULAMA**

Danışman:
Dr. Öğr. Üyesi Derya DELİKTAŞ

Hazırlayan:
Gözde KURADA

Kütahya - 2023

Kabul ve Onay

KÜTAHYA DÜMLUPINAR ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Endüstri Mühendisliği Ana bilim dalında, 801921110111 öğrenci numaralı, Gözde KURADA'nın hazırlamış olduğu “*Montaj Hattı İşçi Atama ve Dengeleme Problemi İçin Çok Amaçlı Genetik Algoritma: Bir Otomotiv Yan Sanayisinde Uygulama*” başlıklı yüksek lisans tez çalışması ile ilgili tez savunma sınavı jüri tarafından yapılmış ve adayın tezinin OY BİRLİĞİ ile kabul edilmesine karar verilmiştir.

24/01/2023

Tez Jürisi	İmza	
	Kabul	Red
Dr. Öğr. Üyesi Derya DELİKTAŞ (Danışman)		
Prof. Dr. Özden ÜSTÜN		
Prof. Dr. Doğan AYDIN		

Doç. Dr. Arif KOLAY

Enstitü Müdürü

Bilimsel Etik Bildirimi

Yüksek Lisans tezi olarak hazırladığım “*Montaj Hattı İşçi Atama ve Dengeleme Problemi İçin Çok Amaçlı Genetik Algoritma: Bir Otomotiv Yan Sanayisinde Uygulama*” adlı çalışmanın öneri aşamasından sonuçlandığı aşamaya kadar geçen süreçte bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle uyduğumu, tez içindeki tüm bilgileri bilimsel ahlak ve gelenek çerçevesinde elde ettiğimi, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığımı, bu çalışmamda doğrudan veya dolaylı olarak yaptığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu beyan ederim.

17/02/2023

Gözde KURADA

Özgeçmiş

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Gözde KURADA

Eğitim Durumu

Yüksek Lisans Öğrenimi : Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Bölümü A.B.D (2020-2023)

Lisans Öğrenimi : Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü (2015-2019)

Lisans Öğrenimi : Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi- İşletme (2017-2023)

Lise Öğrenimi : Bahçeşehir Atatürk Anadolu Lisesi (2011-2015)

ÖZET

MONTAJ HATTI İŞÇİ ATAMA VE Dengeleme Problemi İçin Çok Amaçlı Genetik Algoritma: Bir Otomotiv Yan Sanayisinde Uygulama

KURADA, Gözde

Yüksek Lisans Tezi, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Derya DELİKTAŞ

Şubat, 2023, 100 sayfa

Yüksek miktardaki üretim adetleri ve endüstrileşme ile montaj hatları, imalat sektöründe oldukça önemli bir yere sahiptir. Montaj hattı tasarımında, temel problem, görevlerin ve işçilerin iş istasyonlarına uygun bir biçimde atanamamasıdır. Bu problem genellikle iki sınıfa ayrılır. Biri, belirli çevrim süresine ulaşmak için gerekli iş istasyonlarının en aza indirilmesidir; diğeri ise sınırlı işçilerle çevrim süresinin enküçüklenmesidir. Montaj hattı işçi atama ve dengeleme (MHİAD) problemi, gerçek montaj hatlarında ortaya çıkan ancak son zamanlarda akademik alanda popüler olan yeni bir montaj hattı dengeleme problem türüdür. Ayrıca, her işçinin iş yapabilme kabiliyeti ve performansı farklı olduğu için işçilerin görev süreleri de değişkenlik gösterebilmektedir.

Bu çalışmada, çevrim süresini ve karesel yük atama amaçlarını birlikte ele alan çok amaçlı MHİAD Tip-2 problemi dikkate alınmıştır. Problemin çözümü için, ağırlıklı-toplam skalerleştirmeli genetik algoritma (GA) yaklaşımı önerilmiştir. Tez çalışması, kablo donanımları üreten bir otomotiv yan sanayisinde uygulanmıştır. Parametre değerlerinin uygun seçilmesi algoritmanın performansını etkileyeceğinden, parametre kalibrasyonu için tam faktöriyel deney tasarımı kullanılmıştır. Önerilen GA'nın parametreleri, **irace**'ten elde edilen sonuçlarla ve Mutlu, Polat ve Supciller (2013)'in aynı problem tipi için önerdikleri uygun GA parametreleri kullanılarak elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır. Tam faktöriyel deney tasarımı yöntemi ile daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ek olarak, amaçların farklı göreceli ağırlık değerlerinin sonuç üzerindeki etkisi incelenerek duyarlılık analizi yapılmıştır. Önerilen çok amaçlı modelin gerçek-hayat problemi için makul zamanda uygun çözümler üretebildiği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Genetik Algoritma, Montaj Hattı İşçi Atama ve Dengeleme, **irace**, Tam Faktöriyel Deney Tasarımı, Tip-2

ABSTRACT

MULTI-OBJECTIVE GENETIC ALGORITHM FOR THE ASSEMBLY LINE WORKER ASSIGNMENT AND BALANCING PROBLEM: A CASE STUDY IN THE AUTOMOTIVE SUPPLY INDUSTRY

KURADA, Gözde

Master Thesis, Department of Industrial Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Derya DELİKTAŞ

February, 2023, 100 pages

Assembly lines have a significant role in the manufacturing sector due to high production quantities and industrialisation. The primary problem in assembly line design is the improper allocation of tasks and workers to their respective workstations. This problem can generally be divided into two classes. The first one is to minimise the number of workstations required to achieve a specific cycle time, while the second is to minimise the cycle time with limited workers. The assembly line worker allocation and balancing (ALWAB) problem is a new type of assembly line balancing problem that has recently gained popularity in academic circles and arises in real assembly lines. Moreover, as the capability and performance of each worker may vary, the workers' task times can also be variable.

In this study, the multi-objective ALWAB Type-2 problem, which considers both cycle time and square load allocation objectives, is addressed. A weighted-sum scalarisation-based genetic algorithm (GA) approach is proposed to solve the problem. The thesis was applied in an automotive supplier industry that produces cable assemblies. Since the parameter values significantly affect the performance of the algorithm, a full factorial experimental design is employed for parameter calibration. The proposed GA parameters were compared with the results obtained from **irace** and the appropriate GA parameters proposed by Mutlu, Polat and Supciller (2013) for the same problem type. The full factorial experimental design method yielded better results. Additionally, a sensitivity analysis was performed by examining the effect of different relative weight values of the objectives on the results. The proposed multi-objective model has been demonstrated to generate reasonable solutions in a reasonable amount of time for a real-life problem.

Keywords: Genetic Algorithm, Assembly Line Worker Assignment and Balancing, **irace**, Full Factorial Experiment Design, Type-2

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca benden desteğini hiç esirgemeyen, beni her konuda sahip olduğu tecrübe ve bilgisiyle yönlendiren, tez çalışmamın her anında yanımda olan değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Derya DELİKTAŞ'a teşekkürü borç bilirim.

Bugünlere gelmemi sağlayan, aldığım her konuda beni destekleyen ve yapabileceğim konusunda beni hep cesaretlendiren, hayatımın her anında yanımda olup sevgilerini hep hissettiğim canım annem Kadriye KURADA'ya, canım babam Behçet KURADA'ya ve bir tanecik abim Erdi KURADA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu süreç boyunca desteklerini benden esirgemeyen tüm arkadaşlarıma ve değerli yöneticilerime teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
TABLOLAR LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xii
ŞİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
GİRİŞ	1

BİRİNCİ BÖLÜM

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

1.1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
1.1.1. Literatürde Montaj Hattı Dengeleme Problemi	4
1.1.2. Literatürde Montaj Hattı İşçi Atama ve Dengeleme Problemi	8
1.1.3. Literatürde Montaj Hattı İşçi Atama ve Dengeleme Problemi Genetik Algoritma Uygulamaları	14

İKİNCİ BÖLÜM

MATERYAL VE METOT

2.1. ÜRETİM.....	18
2.2. ÜRETİM SİSTEMİ TİPLERİ	19
2.2.1. Siparişe Göre Üretim.....	19
2.2.2. Parti Tipi Üretim	19
2.2.3. Proje Tipi Üretim	20
2.2.4. Seri Üretim (Akış Tipi)	20
2.3. MONTAJ HATLARI	22
2.3.1. Montaj Hatlarının Sınıflandırılması	23
2.3.1.1. Model Sayısına Göre Montaj Hattı	23
2.3.1.2. Otomasyon Seviyesine Göre Montaj Hattı	24
2.3.1.3. Taşıma Sistemlerine Göre Montaj Hattı.....	25
2.3.1.4. Kurulum Sıklığına Göre Montaj Hattı	25
2.3.1.5. İstasyon Yerleşimine Göre Montaj Hattı.....	26
2.4. MONTAJ HATTI DENGELEME.....	27
2.4.1. Montaj Hattı Dengelemenin Probleminin Amacı	28

2.4.2. Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinde Kullanılan Temel Kavramlar	28
2.4.3. Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinin Sınıflandırılması	32
2.4.4. Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinde Kullanılan Temel Kısıtlar	34
2.4.4.1. Temel Kısıtlar	34
2.4.4.2. Yan Kısıtlar.....	35
2.5. GENETİK ALGORİTMALAR.....	35
2.5.1. Genetik Algoritmada Kullanılan Temel Kavramlar.....	36
2.5.2. Genetik Algoritmaların Çalışma Prensibi	38
2.5.3. Genetik Gösterim	38
2.5.4. Başlangıç Popülasyonunun Oluşturulması	38
2.5.5. Uygunluk Fonksiyonu	39
2.5.6. Genetik Operatörler.....	39
2.6. PARAMETRE BELİRLEME	41
2.6.1. Otomatik Parametre Belirleme (Iterated F-Race Algorithm)	41
2.6.2. Deney Tasarımı.....	44

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

MONTAJ HATTI İŞÇİ ATAMA VE Dengeleme Problemi İçin Çok Amaçlı Genetik Algoritma: Bir Otomotiv Yan Sanayisinde Uygulama

3.1. PROBLEMİN TANIMI	48
3.2. ÖNERİLEN ÇOK AMAÇLI MATEMATİKSEL MODEL.....	53
3.3. ÇOK AMAÇLI GENETİK ALGORİTMA ÇÖZÜM ÖNERİSİ	57
3.3.1. Kromozom Gösterimi.....	59
3.3.2. Uyum Fonksiyonu.....	61
3.3.3. Turnuva Seçim Yöntemi.....	61
3.3.4. Genetik Operatörler.....	61
3.3.5. Genetik Algoritmalarda Parametre Seçimi.....	63

3.3.6. Karşılaştırmalı Analiz	67
3.3.7. Duyarlılık Analizi	70
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	72
KAYNAKÇA.....	74
DİZİN	84



TABLolar LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 1.1: Literatürde Montaj Hattı Dengeleme Problemi Çalışmaları Özeti	7
Tablo 1.2: Literatürde Montaj Hattı İşçi Atama ve Dengeleme Problemi Çalışmaları Özeti.....	13
Tablo 1.3: Literatürde Montaj Hattı İşçi Atama ve Dengeleme Problemi Genetik Algoritma Uygulamaları Çalışmaları Özeti	16
Tablo 2.1: Öncelik Matrisi	31
Tablo 3.1: Set Askısından İş İstasyonlarına Ortalama Yürüme Mesafesi.....	51
Tablo 3.2: Probleme Ait İşçi Bazlı İş Süreleri.....	52
Tablo 3.3: Jackson (1956) Modeli İş Süreleri	57
Tablo 3.4: Önerilen Algoritmanın Sözde (Pseudo) Kodu	58
Tablo 3.5: irace’de Kullanılan Parametre Aralıkları ve Elde Edilen En İyi Parametre Değerleri.....	64
Tablo 3.6: Faktör ve Faktörlerin Düzeyleri.....	65
Tablo 3.7: $w_1=0,5$ ve $w_2=0,5$ Amaç Ağırlıkları için Kullanılan Parametre Yöntemlerinden Elde Edilen Sonuçların ve Mevcut Durumun Karşılaştırılması.....	68
Tablo 3.8: Ele Alınan Parametre Belirleme Yöntemleri ve Mevcut Duruma Göre Elde Edilen Amaç Değerlerinin Karşılaştırılması	70

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1: Üretim Sistemini Oluşturan Temel Veriler	18
Şekil 2.2: Akış Hatlarının Sınıflandırılması	22
Şekil 2.3: Montaj Hatlarının Sınıflandırılması.....	23
Şekil 2.4: Model Sayısına Göre Montaj Hattı Gösterimleri	24
Şekil 2.5: Düz Montaj Hattı	26
Şekil 2.6: U Tipi Montaj Hattı	26
Şekil 2.7: Paralel Montaj Hattı.....	27
Şekil 2.8: Teknolojik Öncelik Diyagramı.....	30
Şekil 2.9: Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinin Sınıflandırılması	32
Şekil 2.10: Genetik Algoritma Akış Diyagramı.....	36
Şekil 2.11: Popülasyon, Kromozom ve Gen Yapısı.....	37
Şekil 2.12: Deney Tasarımı Adımları.....	45
Şekil 3.1: Şirket Örnek Montaj Masası Çizimi	49
Şekil 3.2: Şirket Örnek Hat Çizimi	50
Şekil 3.3: Üretimi Yapılacak Referansların Pareto Analizi	51
Şekil 3.4: Ürün-1'in Tavan Tesisat Donanımına Ait Öncelik İlişki Diyagramı	52
Şekil 3.5: Jackson (1956) Probleminin Öncelik Diyagramı ve İşlem Süreleri	56
Şekil 3.6: Örnek Başlangıç Kromozomu	60
Şekil 3.7: Örnek İşçi Ataması	60
Şekil 3.8: Çaprazlama Operatörünün Gösterimi	62
Şekil 3.9: Mutasyon Operatörünün Gösterimi	63
Şekil 3.10: $w_1=0,5$ ve $w_2=0,5$ Amaç Ağırlıkları İçin Yakınsama Grafiği.....	65
Şekil 3.11: GA Parametreleri İçin Varyans Analizi Sonuç Tablosu	66
Şekil 3.12: 31 Çalıştırılma Sonucu $w_1=0,5$ ve $w_2=0,5$ Amaç Ağırlıklarından Elde Edilen Ortalama Sonuçlar İçin A) Ana Etkiler Grafiği B) Bileşik Etki Grafiği	66
Şekil 3.13: Üç farklı parametre belirleme yöntemi için ağırlıklı-toplam skalerleştirme yöntemine dayanan GA'nın 31 çalıştırmasından elde edilen ortalama normalize edilmiş uygunluk değerlerine ait kutu grafikleri.....	68
Şekil 3.14: Farklı Amaç Ağırlıkları İçin Parametre Belirleme Yöntemlerinin Karşılaştırma Grafiği	71

SİMGELER VE KISALTMALAR

BMHD	Basit Montaj Hattı Dengeleme
CHeSC	Cross-domain Heuristic Search Challenge
<i>Coram</i>	Çaprazlama oranı
ÇS	Çevrim Süresi
ÇAGA	Çok Amaçlı Genetik Algoritma
Dİ	Düzgünlük İndeksi
D_i	<i>i</i> . İş İçin Öncelik Matrisindeki Öncelikli İşler Kümesi
DK	Denge Kaybı
DKİ	Değişken Komşu İniş
DT	Deney Tasarımı
GA	Genetik Algoritma
GGA	Geliştirilmiş Genetik Algoritma
GMHD	Genel Montaj Hattı Dengeleme
GYAK	Genelleştirilmiş Yapay Arı Koloni
HGA	Hibrit Genetik Algoritma
HSA	Hibrit Sürüş Algoritması
KE	Kurumsal Etkinlik
KTP	Karma Tamsayı Programlama
KTDP	Karma Tamsayı Doğrusal Planlama

SİMGELER VE KISALTMALAR (Devamı)

MCS	Monte Carlo Simülasyonu
MHD	Montaj Hattı Dengeleme
MHİAD	Montaj Hattı İşçi Atama ve Dengeleme
M_{oran}	Mutasyon oranı
NSGA-II	Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritma II
OCRA	Operational Competitiveness RAting
P_{ij}	j . İşçiye i . İşin Atanması Durumunda Gereken Süre
R_s	s . İstasyondaki Kablo Taşıma Süresi
s	İstasyon Sayısı
S	İş İstasyonu Kümesi
T	Toplam Süre
TP	Tamsayılı Programlama
UD_{Enb}	En büyük Uyum Değeri
ÜS	Üretilmesi Gereken Ürün Sayısı
YAK	Yapay Arı Algoritması
YGA	Yinelemeli Genetik Algoritma
WMX	Two-Point Based Weight Mapping Crossover



TEZ METNİ

GİRİŞ

İşletmelerde artan üretim adetleri, hedeflenen verimlilik artışları ve maliyetlerin düşürülmesi için akış tipi üretim sistemleri önem kazanmıştır. Yüksek üretim adetlerini karşılayabilmek amacıyla kurulan montaj hatları üretim sistemlerinin temelini oluşturmuştur. Montaj hatları iş istasyonlarından oluşurken her iş istasyonunda tanımlı olan görevler bulunmaktadır. Bu görevler arasında öncelik ilişkisi gibi kısıtlamalar dikkate alınarak iş istasyonlarına atanmaktadır. İş istasyonunun başından mamul, yarı mamul olarak giren ürün son istasyondan ürün olarak çıkmaktadır. Montaj hatlarında oluşturulan akış sistemiyle hat dengeleme çalışmaları büyük önem kazanmıştır. Hat dengeleme yapılırken gerçek hayatta her işçinin becerileri, fiziksel durumları, iş yapabilme kapasiteleri farklı olduğu göz önünde bulundurulması gerekmektedir. İşçiler arasındaki performans farklılıkların dikkate alınarak hat dengeleme ile işçi atamalarının da yapılması problemine MHİAD (Montaj Hattı İşçi Atama ve Dengeleme) problemi denilmektedir.

Montaj hattı dengelemenin (MHD) genişletilmesi, tanımlı işler için işçiye bağlı sürelerin farklılık göstermesi ve işçi atama kararının problem içinde iş istasyonlarıyla bütünleşmiş bir şekilde ele alınması MHD problemleri çözümünün imalat sektörlerinde uygulanmasını daha da kolaylaştırmaktadır (Çengil, 2018). MHİAD problemlerinde hat dengelemenin yanında görevin kimin tarafından yerine getireceğine dair de bir karar verilmektedir (Okuy, 2018). İşletmelerde yüksek hacim, düşük maliyet hedeflendiği için hat dengeleme, iş yükü dengeleme, işçi atama çalışmaları çok önem kazanmıştır. Özer vd. (2021) yapmış oldukları çalışmada erişilebilen literatür çalışmalarını incelediklerini ve MHD yapılırken işçi atamanın da dikkate alındığı problemlerin birlikte incelendiği çok az çalışma olduğundan bahsetmişlerdir. Yapılan incelemeler sonucunda işçiler arasındaki farklar göz önünde bulundurularak montaj hattı dengeleme ve işçi atama problemi ele alınmıştır.

Bu tez çalışmasında kablo donanımları üreten bir otomotiv yan sanayisinde gerçek hayat problemi üzerine çalışılmıştır. Çalışma yapılan işletmede yüksek üretim adetlerine hızlı tepki verebilmek ve eldeki kaynakların verimli bir şekilde kullanılabilmesi için montaj hattında hat dengeleme ve işçi atama çalışması yapılmıştır. Montaj hattında her bir operatöre eşit miktarda iş yükü atanarak hattın en düzgün şekilde dengelenmesi hedeflenmiştir. Bu hedef karesel iş yükünün en küçüklenecek sağlanması

beklenmektedir. İşletmede çalışan işçilerin hepsinin iş yapabilme performanslarının birbirinden farklı olduğu için işçi atama yaparken her işçinin performansı gerçek durumu yansıtacak şekilde ele alınmıştır.

Çalışmanın literatürdeki diğer çalışmalardan farkı, işçi özelliklerine göre işçi atama yaparken aynı zamanda karesel yük atama ile iş yükü dengelemenin amaçlanmasıdır. Ayrıca, erişilen çalışmalar incelendiğinde, yürüme ve taşıma gibi sürelerin problemlerde göz ardı edilmesi reel durumu yansıtmadığı düşünülerek bu çalışmada işçilerin kablo alma arama ve getirme süresi istasyon bazlı ayrı olarak değerlendirilmiştir.

Bu tez çalışmasında çözüm yöntemi olarak çok amaçlı matematiksel model geliştirilmiştir. Önerilen matematiksel modelde ilk amaç olarak çevrim süresinin en küçüklenmesi hedeflenirken ikinci amaç olarak minimum karesel yük atama ile işlerin dengeli bir şekilde dağıtılması amaçlanmıştır. Önerilen matematiksel model küçük boyutlu bir örnek üzerinde Lingo 11.0 programında çalıştırılmıştır. Ele alınan MHİAD problemi NP-zor yapıda bir problem tipidir (Karp, 1972; Doğan ve Sakallı, 2016). Bu nedenle, büyük boyutlu problemlerin çözümü için bir Genetik Algoritma (GA) çözüm yöntemi önerilmiştir. Algoritmaların en uygun çözüme ulaşmasında kullanılan parametrelerin büyük önemi vardır. Bu çalışmada algoritmaların parametre kontrol ve kalibrasyonu için tam faktöriyel deney tasarımı kullanılmıştır. **irace** kullanılarak da uygun parametreler belirlenmiş ve problem çözülmüştür. Ek olarak algoritma, literatürde MHİAD problemi için Mutlu, Polat ve Supciller (2013)'in çalışmalarında GA için önerdikleri parametrelerle de çalıştırılmıştır ve elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Amaçların farklı göreceli ağırlık değerlerinin sonuç üzerindeki etkisi incelenmek için duyarlılık analizi yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında; birinci bölümde incelenen literatür çalışmaları yer almaktadır. İkinci bölümde tezde kullanılan materyal ve metotlar olan montaj hatları, genetik algoritma ve parametre belirleme yöntemleri ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Çalışmanın üçüncü bölümünde çalışmanın yapıldığı işletme tanıtılmış, MHİAD problemi tanımlanmış ve önerilen matematiksel model sunulmuştur. İşletmede yapılacak olan MHİAD problemi NP-zor problem olmasından dolayı önerilen çok amaçlı genetik algoritma yöntemi anlatılmıştır. Parametre belirleme yöntemleri kullanılarak, sonuçlar arasında karşılaştırma yapılmıştır. Çalışmanın son bölümünde de sonuçlar ve öneriler kısmı yer almaktadır.



BİRİNCİ BÖLÜM
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

1.1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu tez çalışmasında ele alınan konu ile ilgili detaylı literatür çalışması yapılmıştır. Yapılan literatür çalışması, literatürdeki montaj hattı dengeleme problemi ile ilgili olan çalışmalar, montaj hattı dengeleme problemine ek olarak işçi atama ile ilgili olan çalışmalar ve literatürde montaj hattı işçi atama ve dengeleme problemi genetik algoritma uygulamaları olmak üzere 3 ana başlıkta incelenmiştir. İncelenen çalışmalar aşağıdaki bölümlerde gösterilmiştir.

1.1.1. Literatürde Montaj Hattı Dengeleme Problemi

Literatürdeki Montaj Hattı Dengeleme (MHD) problemlerinin çalışmaları ilk olarak 1954'te Bryton tarafından ele alınmış ve günümüze kadar MHD ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır (Doğan ve Sakallı, 2016). Bu çalışmada, MHD problemleri ile ilgili incelenen çalışmalara aşağıdaki kısımda yer verilmiştir.

Karsu ve Azizoğlu (2014a), ajanların her bir dönem için sınırlı süreleri vardır ve işin gerektirdiği süre atandığı ajana göre değişmektedir. Önerilen modelde kapasite kısıtı da olduğu için ajanlar sınırlı sayıda işte çalışabilmektedir. Küçük boyutlu problemlerde klasik yaklaşım ile dal ve sınır algoritmaları önerilmiştir fakat algoritma başarısız olmuştur. Daha sonra büyük boyutlu problemler için yasaklı arama algoritması önermişler ve yasaklı arama algoritmasının 1000 iş ve 100 ajana kadar olan problemleri bir saatten kısa bir sürede çözdüğünü ancak kaliteli bir çözüm sağlayamadığı gözlemlenmiştir.

Altunay, Özmutlu H.C. ve Özmutlu, S. (2017), paralel görev atamalı montaj hattı dengeleme problemi üzerinde çalışmışlardır. Çalışma öncelik ilişkileri göz önüne alınarak hareketli konveyör sistemindeki işçilere iş ataması ile ilgilidir. Çözüm yöntemi olarak daha önceki çalışmalardan farklı olarak, çevrim süresinin en küçüklenmesinin hedeflendiği, paralel görev atamalı bir matematiksel programlama modeli önerisi sunulmuştur. Problemde paralel görev atamaya izin veren, toplam istasyon açma ve ekipman maliyetinin en küçüklenmesini amaçlayan matematiksel modelden yararlanmışlardır. Önerilen matematiksel model, Guéret vd. (2000)'nin örnek problemi üzerinde test edilmiştir.

Arıkan (2017), Tip-2 montaj hattı dengeleme problemi üzerinde çalışmıştır. İlk olarak çevrim süresinin, daha sonra da iş yükü dengesizliğinin en küçüklenerek görevlerin

iş istasyonlarına atanmasıyla ilgilenmektedir. Problem çözümü için matematiksel model ve tabu arama algoritması önermişlerdir.

Delice vd. (2018), çalışmada çift taraflı U tipi montaj hattında sıraya bağlı kurulum süreleri yaklaşım temel alınarak dengeleme çalışması yapılmıştır. Birincil amaç olarak eşleştirilmiş istasyon sayısını en aza indirmek ve ikincil bir amaç olarak toplam iş istasyonu sayısını en aza indirmek amaçlanmıştır. Sezgisel öncelik kuralı tabanlı bir prosedür kullanan Karınca Kolonisi Optimizasyonu (KKO) algoritmasına dayalı bir algoritma önerilmiştir.

Süer, Sinaki ve Sadeghi (2019), çoklu ürünler için alternatif bir paralel montaj hattı tasarım stratejisi geliştirmişlerdir. Çalışmalarında montaj adetini en üst düzeye çıkarmayı amaçlamışlardır. Diğer amaçları ise toplam operatör sayısını en küçükmek olmuştur. Makalede üç aşamalı bir hiyerarşi metodolojisi geliştirilmiştir.

Karsu ve Azizoglu (2019b), tüm ajanların üzerindeki yüklerin karelerinin toplamının en küçükleme hedeflenmiştir. Çalışmalarına tamsayılı doğrusal olmayan ve doğrusal olan programlama üzerine iki yöntem önermişlerdir. Problemde çözüm yöntemi olarak dal ve sınır algoritması uygulanmıştır. Çalışma sonucunda 5 ajan ve 70 işe kadar olan problemler ve 10 ajan ve 45 işe kadar olan problemlerde kullandıkları dal sınır algoritmasının tatmin edici sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Meng vd. (2019a), Basit Montaj Hattı Dengeleme (BMHD) Tip-2 problemi üzerinde mevcut olmayan iş istasyonunu atlamak için önleyici bakım senaryolarını montaj hattı dengeleme problemlerine entegre eden yeni bir metodoloji üzerinde çalışmışlardır. Üç modifikasyonlu geliştirilmiş bir balina optimizasyon algoritması önerilmiştir. Test etmek için 5000'den fazla deney yapmışlardır.

Erten (2021), montaj hattında her işçinin her işi yapamadığı varsayılarak iki amaçlı bir matematiksel model kurmuş ve işçilere iş ataması problemi üzerinde çalışmıştır. Amaç olarak işleri dengeli bir şekilde dağıtmak için karesel yük atama metodunu kullanmış ve işçi sayısı en küçükleme istenmiştir. Modelin çözümü için GAMS programının Dicopt çözümü kullanılmıştır. Büyük boyutlu problemlerin çözümü için de tavlama benzetimi algoritması geliştirilmiştir. Test problemlerinin türetilmesinde Gavish ve Pirkul (1991), Yagiura vd. (2004), Karsu ve Azizoglu (2012) ile Karsu ve Azizoglu (2014)'de kullanılan yöntem kullanılmıştır.

Tanga vd. (2022), yaptıkları çalışmada döngü sürelerini ve operasyon değişikliklerini en aza indirmek için iki ekstra iyileştirme ile geliştirilmiş çok amaçlı çok faktörlü evrimsel algoritma ve kod çözme süresini azaltmak için bir matris indirgeme yöntemi önerilmiştir. Ek olarak bir komşu arama operatörü tasarlanmıştır. Algoritmayı test etmek için hesaplama deneyleri yapılmıştır.

Petroodia vd. (2022), ele aldıkları problemde karma model montaj hatlarında modele bağlı görev ataması, iş gücü yeniden yapılandırması ve ekipman çoğaltmanın etkisini incelemektedir. Yeni bir karma tamsayılı doğrusal programlama önermişlerdir ve büyük problemlerin çözümü için yapıcı matematik ve bir “düzelt ve optimize et” buluşsal yöntemi oluşturmuşlardır.

Yin vd. (2022), düz robotik demontaj hattında çevrim süresini en küçükleme hedeflenmiştir. Karma tamsayılı model kurulmuş ve buluşsal bir kurala sahip üç katmanlı bir kodlama yöntemine dayanan çok amaçlı Hibrit Sürüş Algoritması (HSA) ve HSA’nın kullanım kabiliyetini ve yakınsama hızını iyileştirmek için bir sürüş stratejisi önerilmiştir.

Meng vd. (2022b), çalışmalarında problem olarak planlı bakım senaryolarını göz önünde bulundurarak karışık model montaj hattı dengeleme konusunu seçmişlerdir. Döngü süresini ve iş değiştirmeyi optimize etmek amacıyla karma bir tamsayılı matematiksel formülasyon önerilmiştir. Kooperatif ko-evrimsel algoritması kullanılmıştır. Algoritmanın yakınsama performansını teşvik etmek için dört objektif odaklı komşu arama operatörü önerilmiştir. Geliştirilen algoritmanın performansını test etmek için 39 vaka tasarlanmıştır

Zhao, Tang ve Zhang (2022), farklı senaryolar altında çevrim sürelerini en küçükleme ve senaryolar arasındaki toplam görev ayarlamalarını aynı anda en aza indirmek için tercih tabanlı çok amaçlı bir optimizasyon problemi formüle edilmiştir. Yeni bir baskınlık ve üç modifikasyona sahip bir gelişmiş değişken mahalle arama algoritması önerilmiş ve çalışmalarında yeniden başlatma mekanizması geliştirilmiştir.

Chaouche vd. (2022), BMHD probleminde sabit sayıda iş istasyonunda bir ürün hattı yapılandırmasından diğerine geçerken iş istasyonları arasındaki görev yeniden atamalarının en küçükleme için çalışılmıştır. Karma bir tamsayılı doğrusal program önerilmiştir. Durma ve sabit olarak adlandırılan uygun bir Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (KTDP) tabanlı sezgisel olarak geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmayı test etmek için karşılaştırılması analizler yapılmıştır.

Tablo 1.1: Literatürde Montaj Hattı Dengeleme Problemi Çalışmaları Özeti

Yazar(lar)	Montaj Hattı Tipi	Amaç Fonksiyonları	Çözüm Yöntemleri	Uygulama Alanı
Karsu& Azizoğlu (2014a)	Basit montaj hattı	İş yükü dengeleme	Dal Ve Sınır Algoritmaları Yasaklı Arama Algoritması	Test problemi
Altunay, Özmutlu H.C. ve Özmutlu, S. (2017)	Paralel montaj hattı	Çevrim süresinin en küçüklenmesi	Matematiksel Programlama Modeli	Test problemi
Arikan (2017)	Basit montaj hattı	İş yükü dengeleme	Matematiksel Model Tabu Arama Algoritması	Test problemi
Delice vd. (2018)	İki taraflı u-tipi montaj hattı	Eşleştirilmiş istasyon sayısını ve toplam iş istasyonu sayısının en küçüklenmesi	Karınca Kolonisi Optimizasyonu	Test problemi
Süer, Sinaki & Sadeghi (2019)	Paralel montaj hattı	Montaj oranını en üst düzeye çıkarmak ve toplam operatör sayısını en küçüklemek	Tamsayı Ve Karma Programlama Modeli	Test problemi
Karsu & Azizoğlu (2019b)	Basit montaj hattı	İş yüklerinin karelerinin toplamının en küçüklenmesi	Tamsayılı Doğrusal Olmayan Ve Doğrusal Olan Programlama Dal Ve Sınır Algoritması	Test problemi
Meng vd. (2019a)	Basit montaj hattı	Çevrim süresinin ve görev değişikliğinin en küçüklenmesi	Matematiksel Model Balina Optimizasyon Algoritması	Gerçek hayat problemi
Erten (2021)	Basit montaj hattı	İş yükü dengeleme toplam ajan sayısının en küçüklenmesi	Matematiksel Model Tavlama Benzetimi Algoritması	Test problemi
Tanga vd. (2022)	Basit montaj hattı	Çevrim süresinin en küçüklenmesi yeniden atanma ayarlama kapsamının en aza indirilmesi	Matematiksel Model Çok Amaçlı Çok Faktörlü Evrimsel Algoritma	Test problemi
Petroodia vd. (2022)	Karma montaj hattı	Maliyeti en küçüklemek	Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama Yapıcı Matematik (cm) Ve Bir Düzelt Ve Optimize Et Buluşsal Yöntemi	Test problemi
Yin vd. (2022)	Düz robotik demontaj hattı	Çevrim süresinin en küçüklenmek enerji tüketimi ve iyileştirilmiş tehlike indeksi	Karma Tamsayılı Matematiksel Model Çok Amaçlı Hibrit Sürüş Algoritması	Test problemi

Tablo 1.1: (Devamı) Literatürde Montaj Hattı Dengeleme Problemi Çalışmaları Özeti

Yazar(lar)	Montaj Hattı Tipi	Amaç Fonksiyonları	Çözüm Yöntemleri	Uygulama Alanı
Meng vd. (2022b)	Karışık modellenmiş montaj hattı	Çevrim süresini ve görev değiştirmeyi en küçüklemek	KTDP Kooperatif Ko-Evrimsel Algoritması	Test problemi
Zhao, Tang & Zhang (2022)	-	Çevrim süresini küçüklemek, senaryolar arasındaki toplam görev ayarlamalarını aynı anda en aza indirmek	Tercih Tabanlı Çok Amaçlı Bir Optimizasyon Gelişmiş Değişken Mahalle Arama Algoritması	Test problemi
Chaouche vd. (2022)	Karışık modellenmiş yeniden yapılandırılabilir montaj hattı	Ürün değişiminde iş istasyonları arasındaki yeniden atamalarının en küçüklenmesi	KTDP KTDP Tabanlı Sezgisel Algoritma	Test problemi

1.1.2. Literatürde Montaj Hattı İşçi Atama ve Dengeleme Problemi

İş süreleri işçi performanslarına göre değişkenlik gösterebilmektedir. Bu yaklaşımı temel alan problem montaj hattı işçi atama ve dengeleme (MHİAD) problemidir ve bu problem tipi, basit MHD probleminin bir uzantısı olarak kabul edilmektedir (Zacharia ve Nearchou, 2016). Literatürde MHİAD problemi üzerine yapılmış çalışmalara devam eden paragraflarda yer verilmiştir.

Aryanezhad vd. (2009), ele aldıkları çalışmada hücreli montaj hattında eşzamanlı dinamik hücre oluşumu ve işçi atama problemi ile başa çıkmak için yeni bir model geliştirmişlerdir. Problem iki aşamada değerlendirilmiştir: Makine hücrelerinin oluşumu ve karşılık gelen insan hücrelerini oluşturmak için işçilerin hücrelere atanmasıdır. Önerilen model, doğrusal olana dönüştürülen tek amaçlı doğrusal olmayan tamsayılı programlama olarak formüle edilmiştir. İşçiler becerilerine göre gruplandırılmış ve beceri seviyelerine göre atama yapılması amaçlanmıştır. Önerilen model için sayısal bir örnek çözülmüş ve dört farklı problem için bir duyarlılık analizi yapılmıştır.

Blum ve Miralles (2011), BMHİD Tip-2 problemi üzerinde çalışmışlardır. Bu problem için bir Tamsayılı Programlama (TP) problemi sunulmuştur ve ışın aramasına dayalı bir algoritma sunulmuştur. Bu algoritmanın deneysel değerlendirmesi için Chaves, Lorena ve Cristóbal (2007) tarafından önerilen bir dizi 320 kıyaslama örneği kullanılmıştır.

Sungur ve Yavuz (2014), ele alınan problem BMHİD problemidir. Problemde işçilerin farklılıkları göz önüne alınmış ve işçilerin niteliklerinin hiyerarşik bir şekilde sıralanmıştır. Toplam maliyeti en aza indirmek için tamsayılı doğrusal programlama modeli önerilmiştir. Zaman ve maliyet faktörlerinin toplam maliyet üzerindeki etkilerini ve iş istasyonlarına atanan farklı işçi türlerinin toplam sayısını araştırmak için bir hesaplama deneyi gerçekleştirilmiştir.

Vilà ve Pereira, (2014), montaj hattı işçi atama ve istasyonlardaki işlerin dengelenmesi problemi üzerinde çalışmışlardır. Çok amaçlı bir model kurulmuştur. Kullanılan istasyon sayısını en aza indirmeyi, her bir istasyona görevler atamayı, çevrim süresini en aza indirmeyi ve her bir istasyona en uygun robot tipini seçmeyi amaçlamışlardır. Çözüm yöntemi olarak alt sınırlardan yararlanan bir kesin sayım algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma standart bir karşılaştırma örneği seti kullanılarak test edilmiştir. Çözümde Tip-1 ve Tip-2 amaç fonksiyonlarına sahip çözüm prosedürlerine odaklanılmıştır. Tip1 dal sınır algoritması kullanılarak çözülmüştür. Tip2’de GA iki farklı çeşidi kullanılarak çözülmüştür. Standart bir karşılaştırma örneği seti kullanılarak test edilmiştir.

Borba ve Ritt (2014), engelli bireylerin çalıştığı bir iş merkezinde işçileri istasyonlara ve görevleri işçilere atayarak bir montaj hattının üretim hızını en büyüklenmesi amaçlanmıştır. Önerilen KTDP modelinin çözümü için, ışın aramasına dayalı buluşsal algoritma ve yeni indirgeme kuralları ve alt sınırlar kullanan görev odaklı dal ve sınır prosedürü önerilmiştir.

Ritt, Costa ve Miralles (2015), ele aldıkları çalışmada bilinmeyen bir grup heterojen işçinin varlığında montaj hatlarını dengelemeyi hedeflemişlerdir. Belirsiz işçi mevcudiyeti altında beklenen çevrim süresini en aza indirmek için BMHİD’nin bir uzantısı önerilmiştir. İlk aşama optimizasyonunda istasyonlara görevler atanmalı ikincisinde işçiler istasyonlara atanmaktadır. Önerilen yöntemler, 768 örnekten oluşan bir veri setinde değerlendirilmiştir.

Polat vd. (2015), BMHİD Tip-2 problemi üzerinde çalışmışlardır. Problemin NP-zor olmasından dolayı iki fazlı değişken komşuluk arama algoritması önerilmiştir. Algoritmanın ilk aşamasında, döngü süresini en aza indirmek amacıyla iş istasyonlarına görev atamak için bir iki fazlı değişken komşuluk arama algoritması yaklaşımı uygulanmıştır. İkinci aşamasında ise işçileri iş istasyonlarına atamak için değişken bir

komşuluk iniş yöntemi uygulanmıştır. Önerilen algoritmanın performansı, Chaves, Lorena ve Cristóbal (2007) tarafından önerilen kıyaslama problem seti üzerinde test edilmiştir.

Zacharia ve Nearchou (2016), tarafından ele alınan problem görevlerin işçilere dengeli bir şekilde atanması ve aynı zamanda işçilerin iş istasyonlarına istenen bazı hedeflere göre en iyi şekilde atanmasını hedeflemektir. Amaç hattın iş yükünün çevrim süresi ve düzgünlük indeksini en küçükmektir. İki kriterli montaj hattı işçi atama ve dengeleme probleminin çözümü için bir Çok Amaçlı Evrimsel Algoritma (ÇAEA) sunulmuştur. Algoritma, küçük bir örnek üzerinde test edilmiştir. Test verileri, Chaves, Lorena ve Cristóbal (2007)'in kıyaslama veri setinden alınmıştır. Yapılan test üzerinde algoritmanın çok olumlu sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Janardhanan, Li ve Nielsen (2018), döngü süresini en küçükmek için çift taraflı montaj hatlarında işçi ataması ve hat dengeleme problemi için bir Karma Tamsayı Programlama (KTP) modeli geliştirmişlerdir. Büyük boyutlu problemler için göçmen kuşlar optimizasyonu kullanılmıştır. Önerilen algoritmalar kullanılarak elde edilen çözümler, Yapay Arı Kolonisi (YAK) ve simüle edilmiş tavlama gibi iyi bilinen metasezgisel algoritmalarla karşılaştırılmıştır.

Thürer vd. (2019), ikili kaynak kısıtlamaları ve heterojen iş gücü ile bir montaj atölyesinin çalışanların ne zaman ve nereye taşınacağına dikkat edilerek, işçi atama kurallarına odaklanmıştır. İşçinin boşa kalma riskini en aza indirerek istasyonlara atama üzerine çalışılmıştır. Kuralların performans etkisini değerlendirmek için bir eş kaynak-kısıtlı (dual resource constrained-DRC) montaj atölyesinin simülasyon modeli kullanılmıştır.

Moussavia, Mahdjo ve Grundera (2019), çalışan personelin hastalara atanması ve aynı zamanda da günlük periyotlara da atanması için ekstra bir zaman boyutu eklenerek evde sağlık hizmeti planlama problemi ele alınmıştır. Sıralama genelleştirilmiş atama formülasyonu kullanılmıştır. Ele alınan problem, 3 adımdan oluşan KTP ile modellenmiş ve model, Gurobi karma tamsayı çözücü uygulanarak çözülmüştür. Test etmek için çeşitli büyüklükteki örnekleri simüle etmek için bir Monte Carlo Simülasyonu (MCS) gerçekleştirilmiştir.

Yılmaz ve Demir (2019), işçi ve iş kapasitesini göz önünde bulundurarak ve her bir özel bireyin kısıtlamalarına saygı duyarak işçilere görev atama dengeleme

problemidir. Problem çözümü için Gurobi çözücü kullanılmıştır. Test problemleri üzerinde hesaplama çalışmaları yapılmıştır.

Janardhanan vd. (2019), makalede fabrikada çalışan engelli işçiler göz önünde bulundurularak çift taraflı montaj hatlarında işçi ataması ve hat dengelemesini çözmek için yapay arı kolonisi algoritmasının üç çeşidi sunulmuştur. Çok faktörlü varyans analizi (ANOVA) tekniği, elde edilen RPD değerlerini analiz etmek için problemler kullanılmıştır. Hesaplama sonuçları, iki geliştirilmiş YAK algoritmasının en iyi iki performans verdiğini göstermiştir.

Yıldız Ş.T., Yıldız G., ve Cin (2019), bir elektronik firmasının arka kapak montajı yapan üretim hattında işçilerin iş istasyonlarına atanması ve montaj hattının dengelenmesi problemi üzerinde çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada çevrim süresinin ve işçi sayısının en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Lingo programında matematiksel model çözdürülmüş ve gerçek hayatta olan stok, konveyör hareketi gibi sürelerin incelenmesi için ARENA benzetim modeli kurulmuştur.

Zhang vd. (2020), çevrim süresini ve ergonomik riskleri aynı anda en aza indirmek için U şeklinde bir montaj hattı işçisi ataması ve dengeleme problemi üzerine çalışmışlardır. Çalışmada işçilerin iş istasyonlarında yürüme ve taşıma süreleri göz ardı edilmiştir. Matematiksel model kurulmuştur ve yeniden başlatılmış yinelenen pareto açgözlü algoritması tasarlanmıştır. İki önceliğe dayalı açgözlü ve yerel arama aşaması geliştirilmiş ve geliştirilen algoritma istatistiksel analizlerle desteklenmiştir. Ergonomik risk değerini hesaplamak için bir OCRA (Operational Competitiveness RAting) yöntemi uygulanmıştır. Önerilen algoritmanın optimizasyonunu ölçmek için üç deney seti gerçekleştirilmiştir. Diğer algoritmalarla karşılaştırma yapılmıştır. Son olarak, önerilen algoritma ve diğer algoritmalar tarafından elde edilen ampirik kazanım fonksiyonları arasındaki farkları göstermek için bir grafik metodoloji, Diferansiyel Ampirik Elde Etme Fonksiyonu kullanılmıştır. Önerilen algoritmanın diğer 9 algorithmadan daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

Karaş ve Özçelik (2021), görev sürelerinin işçiler açısından çeşitlendiğini dikkate alan, belirli kısıtlamalar altında kesintiye uğramamış iş istasyonlarına görevlerin ve işçilerin öncelik kısıtlamaları göz önüne alınarak montaj hattında yeniden dengeleme problemi ele alınmıştır. Önerilen KTDP model, çevrim süresini en aza indirmek ve aynı zamanda hattı yeniden dengelerken görevleri mümkün olduğunca ilk istasyonlarda

tutarak gerekli ekipmanı hareket ettirme ihtiyacını da ortadan kaldırmayı hedeflemektedir. Modelin çözümü için bir YAK algoritması önerilmiştir. Modelin ve algoritmaların performansını karşılaştırabilmek için Chaves, Lorena ve Cristóbal (2007) tarafından sunulan MHİAD test problemleri kullanılmıştır. Sayısal deneyler, 120 problem örneği kullanılarak tasarlanmış ve yürütülmüştür. Büyük boyutlu test örnekleri için YAK algoritması önerilmiştir. Önerilen YAK algoritması çözüm değeri ve hesaplama süresi açısından daha yüksek performans göstermiştir.

Campanaa vd. (2021), hiyerarşik işçi ataması ve montaj hattı dengeleme problemi için algoritmalar önermişlerdir. Yapılan işin süresi atanan işçiye göre değişmektedir. İşçiler, işi yapabilme durumuna göre bir hiyerarşi metodu içerisindedirler. Daha nitelikli olan işçinin maliyeti daha fazladır. Amaç fonksiyonu olarak montaj hattının toplam maliyetini en aza indirmek hedeflenmiştir. Ele alınan problem için matematiksel model kurulmuş ve modelin çözümü için bir yapıcı buluşsal yöntemi sunulmuştur. Daha sonra, algoritma bir Değişken Komşu İniş (DKİ) algoritması kullanarak iyileştirilmiştir. Algoritmaları test etmek için test deneyleri yapılmış, toplamda 900 örnek çözülmüştür.

Gräßler vd. (2021), manuel montaj hattında İnsan faktörlerinin montaj planlaması üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışan atama çizelgeleme modelinde iki yaklaşım kabul edilmiştir. Uzun vadeli bakış açısıyla beceriye dayalı montaj planlaması, diğer yandan kısa vadeli bakış açısıyla zamana dayalı montaj planlaması önerilmiştir. Çözüm yaklaşımı olarak matematiksel model kurulmuş, oluşturulan sayısal bir örnek üzerinde çalışma yapılmıştır.

Katirae vd. (2021), işçilerin iş yapabilme ve yaş ölçütlerine göre BMHİD problemini ele alıp döngü süresini ve istasyonların maksimum fiziksel çabasını en aza indirmeyi hedeflemişlerdir. 4 gruptan oluşan yeni bir işçi görev kategorizasyon matrisi sunulmuştur. ε -yapılandırma algoritması kullanılarak iki-objektif doğrusal programlama modeli önerilmiştir. Çözüm metotları endüstriyel uygulamalar için kullanılan bir brülörün üretim tesisinde test edilmiştir.

Tablo 1.2: Literatürde Montaj Hattı İşçi Atama ve Dengeleme Problemi Çalışmaları Özeti

Yazar (lar)	Montaj Hattı Tipi	Amaç Fonksiyonları	Çözüm Yöntemleri	Uygulama Alanı
Aryanezhad vd. (2009)	Hücreli montaj hattı	Maliyetin en küçüklenmesi	Tek Amaçlı Doğrusal Olmayan Tamsayılı Programlama	Test problemi
Blum & Miralles (2011)	Basit montaj hattı	Çevrim süresini en küçüklemek	Tamsayılı Programlama Işın Aramasına Dayalı Bir Algoritma	Test problemi
Sungur & Yavuz (2014)	Basit montaj hattı	Maliyetin en küçüklenmesi	Tamsayılı Doğrusal Programlama	Test problemi
Borba & Ritt (2014)	Basit montaj hattı	Çevrim süresini en küçüklemek	Karma Tamsayılı Bir Matematiksel Model Dal ve Sınır Prosedürü	Test problemi
Vilã & Pereira, (2014)	Basit montaj hattı	İstasyon sayısını ve çevrim süresini en küçüklemek	Kesin Sayım Algoritması Dal Sınır Algoritması Genetik Algoritmanın	Test problemi
Ritt, Costa & Miralles (2015)	Basit montaj hattı	Çevrim süresini en küçüklemek	Karma Tamsayılı Bir Matematiksel Modeli Benzetilmiş Tavlama Yöntemi	Test problemi
Polat vd. (2015)	Basit montaj hattı	Çevrim süresini en küçüklemek	Komşuluk Arama Algoritması	Gerçek hayat problemi
Zacharia & Nearchou (2016)	Basit montaj hattı	Çevrim süresini ve düzgünlük indeksini en küçüklemek	Çok Amaçlı Bir Evrimsel Algoritma	Test problemi
Janardhanan, Li & Nielsen (2018)	İki taraflı montaj hattı	Çevrim süresini en küçüklemek	Karma Bir Tamsayı Programlama Modeli Göçmen Kuşlar Optimizasyonu	Test problemi
Thürer vd. (2019)	Basit montaj hattı	Verimli işçi ataması	Who Kuralı Ve İşçi Atama Kuralları	Gerçek hayat problemi
Moussavia & Grundera (2019)	Basit montaj hattı	Mesafeyi en küçüklemek	Genelleştirilmiş Atama Formülasyonu Karma Tamsayılı Matematiksel Model	Test problemi
Yılmaz ve Demir (2019)	Basit montaj hattı	Çevrim süresini en küçüklemek	Matematiksel Model	Test problemi
Janardhanan vd. (2019)	Çift taraflı montaj hattı	Çevrim süresini en küçüklemek	Yapay Arı Kolonisi Algoritması	Test problemi
Yıldız Ş.T., Yıldız G., ve Cin (2019)	Basit montaj hattı	Çevrim süresini ve işçi sayısını en küçüklemek	Matematiksel Model Arena Benzetim Modeli	Gerçek hayat problemi
Zhang vd. (2020)	U tipi montaj hattı	Çevrim süresini ve ergonomik riskleri en küçüklemek	Matematiksel Model Yeniden Başlatılmış Yinelene Pareto Açgözlü Algoritması OCRA Yöntemi	Test problemi
Karaş ve Özçelik (2021)	Basit montaj hattı	Alt sınırlardan göreceli yüzde sapmasının ağırlıklı toplamını en küçüklenmesi	KTDP Yapay Bir Arı Kolonisi Algoritması	Test problemi
Campanaa vd. (2021)	Basit montaj hattı	Maliyetin en küçüklenmesi	Matematiksel Model Yapıcı Buluşsal Yöntem DKİ Algoritması	Test problemi

Tablo 1.2: (Devamı) Literatürde Montaj Hattı İşçi Atama ve Dengeleme Problemi Çalışmaları Özeti

Yazar (lar)	Montaj Hattı Tipi	Amaç Fonksiyonları	Çözüm Yöntemleri	Uygulama Alanı
Grabler vd. (2021)	Manuel montaj hattı	İşçi beceri gelişimini en büyükmek çevrim süresini en küçükmek	Matematiksel Model	Test problemi
Katirae vd. (2021)	Basit montaj hattı	Çevrim süresini ve fiziksel çabayı en küçükmek	E -Yapılandırma Algoritması İki-Objektifli Doğrusal Programlama Modeli	Gerçek hayat problemi

1.1.3. Literatürde Montaj Hattı İşçi Atama ve Dengeleme Problemi Genetik Algoritma Uygulamaları

Literatürdeki MHİAD problemleri için çeşitli çözüm yöntemleri mevcuttur. Bu tez çalışmasında uygulanacak metasezgisel yöntem olarak Genetik Algoritma (GA) seçilmiş, literatürde bulunan çalışmalar incelenerek aşağıdaki bölümde yer verilmiştir.

Küçükkoç (2011), tez çalışmasında paralel montaj hattında karışık modelli ürün üretiminde iş istasyonu sayısını en küçükmeyi ve iş yükü dengeleme yapmayı amaçlamıştır. Problemi çözdürmek için hibrit bir genetik algoritma önerilmiştir. Bu çalışmadaki farklılık, başlangıç popülasyonu oluşturulurken uygun olmayan çözümler engellenerek uygun olan çözümlerin oluşmasını sağlamakta olmasıdır. Algoritmayı test etmek için 12 test problemi üzerinde deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Akpınar ve Bayhan (2011), paralel montaj hattı dengeleme ve iş istasyonu sayısını en küçükleme (Tip-1) problemi üzerinde çalışmışlardır. Hibrit bir genetik algoritma önerilmiştir. Başlangıç popülasyonu rastgele oluşturulduktan sonra çözümleri üç buluşsal yöntem (Kilbridge & Wester Sezgisel, Moodie & Young Yöntemi Faz-I ve Dereceli Konumsal Ağırlık Tekniği) ile başlangıç popülasyonuna dâhil edilmiştir. Problemi test etmek için Vilarinho ve Simaria (2002)'den alınan 20 test problemi kullanmışlardır.

Moreira vd. (2012), montaj hattı işçisi ataması ve dengeleme sorunu için basit buluşsal yöntemler önerilmiştir. 16 görev önceliği kuralları sunulmuştur ve performanslarını üç olası kullanımda karşılaştırılmıştır: tek başına bir yöntem, bir başlangıç çözüm üretici forma sezgiseller ve bir hibrit genetik algoritma için bir kod çözücü. BMHD için yapıcı buluşsal yöntemler bölümün yapıcı buluşsal yöntemine dayanan melez bir önyargılı rassal-anahtar genetik algoritması önerilmiştir. Genetik

algoritmada popülasyon boyutunu 100, çaprazlama oranını 0,5 olarak belirlemişlerdir. Alt sınır yöntemi kullanılmıştır. Kullanılan tüm deneyler Chaves, Lorena ve Cristóbal (2007)'den alınan test problemleri üzerinden yapılmıştır.

Mutlu, Polat ve Supciller, (2013), BMHİD Tip-2 problemi üzerinde çalışmışlardır. Bu problemi çözmek için matematiksel model önerilmiş ve Yinelemeli Genetik Algoritma (YGA) geliştirilmiştir. Problemde çevrim süresini en küçüklemeyi amaçlamışlardır. GA'da başlangıç popülasyonu rastgele oluşturulmuş, genetik operatörlerle yeni çocuklar üretmek için ebeveyn kromozomları, rulet çarkı, sıra ağırlıklandırma ve turnuva yöntemleri kullanılarak eşleşme havuzundan seçilmiştir. Değiştirilmiş tek noktalı sağ çaprazlama ve değiştirilmiş tek noktalı sol çaprazlama operatörleri uygulanmıştır. Karıştırma mutasyonu ve karıştırma alt liste mutasyonu kullanılmış, elitizm uygulanmıştır. Önerilen algoritmada, işçi atamalarında değişiklik yapmak için üç yerel arama operatörü (swap, reverse ve replacement) kullanılmıştır. Önerilen YGA, Chaves, Lorena ve Cristóbal (2007)'in çalışmasındaki yinelenen arama ve kümeleme araması ile karşılaştırılmıştır.

Öksüz, Büyüközkan ve Satoğlu (2017), montaj hatlarında her işçinin aynı performansla aynı işi yapamadığı düşünülerek U tipi montaj hattında işçilerin performansları temel alınarak işçi ataması ve hat dengelemesi problemi üzerine (E tipi) çalışmışlardır. Amaç fonksiyonu, montaj hattı verimliliğinin en büyüklenmesidir. Problemin çözümü için yapay arı kolonisi algoritması ve genetik algoritma önerilmiştir. Genetik algoritmada rassal başlangıç çözümü algoritması ve çok noktalı çaprazlama yöntemi kullanılarak GA'nın geleneksel modeli geliştirilmiştir. Önerdikleri algoritma, Jackson (1956)'ın veri seti, Cevikcan vd. (2009)'nin gerçek bir veri seti ve Araújo vd. (2015)'nin MHİAD probleminin veri seti kullanılarak çözdürülmüştür.

Fathi vd. (2019), istasyon sayısını en küçüklemek ve iş yükü düzgünlüğünün optimize edileceği bir Gelişmiş Genetik Algoritma (GGA) önermişlerdir. Problem için bir matematiksel model önerilmiştir ve metasezgisel yöntem olarak da genetik algoritma kullanılmıştır. Fakat, bu algoritmayı iyileştirmek için yazalar etkili bir değişken komşuluk aramasını dâhil etmişlerdir. GA'da parametrelerin en iyi seviyelerini belirlemek için bu çalışmada Taguchi yöntemi uygulamışlardır.

Liu vd. (2021), basit montaj hattında enerji tüketimi dikkate alınarak işçi atama ve hat dengeleme problemi üzerinde çalışma yapmışlardır. İki amaçlı karma tamsayılı

matematiksel model kurulmuştur. Büyük boyutlu problemler için işlem süresi ve enerji tüketimi ilk sıralanmış kuralı, bir Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritma-II (NSGA-II) ve çok amaçlı benzetilmiş tavlama yöntemi geliştirilmiştir.

Tablo 1.3: Literatürde Montaj Hattı İşçi Atama ve Dengeleme Problemi Genetik Algoritma Uygulamaları Çalışmaları Özeti

Yazar (lar)	Montaj Hattı Tipi	Amaç Fonksiyonları	Çözüm Yöntemleri	Uygulama Alanı
Küçükkoç (2011)	Paralel montaj hattı	İstasyon sayısını en küçüklemek iş istasyonları arasındaki eşitsizliği en küçüklemek	Matematiksel Model Hibrit Genetik Algoritma	Test problemi
Akpınar & Bayhan (2011)	Paralel montaj hattı	İş istasyonu sayısını en küçüklemek	Matematiksel Model Genetik Algoritma	Test problemi
Moreira vd. (2012)	Basit montaj hattı	Çevrim süresini en küçüklemek	Matematikse Model Melez Bir Önyargılı Rassal Anahtar Genetik Algoritması	Test problemi
Mutlu, Polat & Supciller (2013)	Basit montaj Hattı	Çevrim süresini en küçüklemek	Matematikse Model Yinelemeli Bir Geliştirilmiş Genetik Algoritma (IGA)	Test problemi
Oksuz, Buyukozkan & Satoglu (2017)	U tipi montaj hattı	Montaj hattı verimliliğinin en büyüklenmesi	Matematiksel Model Yapay Arı Kolonisi Algoritması Genetik Algoritma	Test problemi
Fathi vd. (2019)	Basit montaj Hattı	İstasyon sayısını en küçüklemek İş yükü dengeleme	Matematiksel Model Genetik Algoritma Değişken Komşuluk Aramasını	Test problemi
Liu vd. (2021)	Basit Montaj Hattı	Maliyeti ve enerji tüketimini en küçüklemek	İki Amaçlı Karma Tamsayılı Matematiksel Model NSGA- II Çok Amaçlı Benzetilmiş Tavlama Yöntemi	Test problemi
Kılınçcı (2023)	Basit Montaj Hattı	İstasyon sayısının en küçüklenmesi	Matematiksel Model Genetik Algoritma	Test problemi

Kılınçcı (2023), sıra bağımlı hazırlık süreli montaj hattı dengeleme problemini ele alarak, işlemin iş istasyonuna atanması, işlemin kaynağa atanması ve aynı kaynak kullanılarak yapılan işlemlerin sıralanması için matematiksel model ve genetik algoritma geliştirmişlerdir. Önerilen GA'daki kromozom iki bölümden oluşturulmuştur: görevlerin atanma sırası ve görevlerin yapılırken kullanılan kaynak bilgisi. Çaprazlama operatörü olarak iki noktalı çaprazlama yöntemi uygulanmıştır ve permütasyon mutasyon ve ikili mutasyon olmak üzere 2 çeşit mutasyon operatörü uygulanmıştır. Önerilen GA oluşturulan 160 test probleminde test edilmiştir.



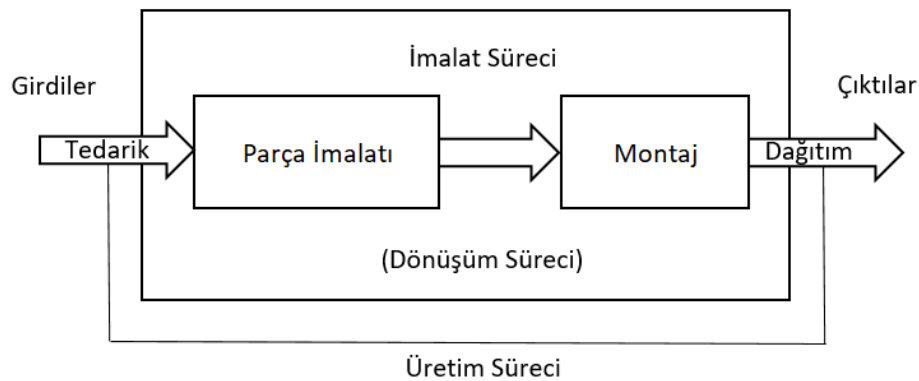
İKİNCİ BÖLÜM
MATERYAL VE METOT

2.1. ÜRETİM

Üretim, mal ve/veya hizmet üretimi üzerinde çalışan tüm işletmelerin ana faaliyetlerinden birisidir (Kobu, 2014). Üretim farklı bilim dalları tarafından farklı şekilde tanımlanmaktadır. Ekonomistler üretimi, “yarar yaratmak” şeklinde tanımlar iken mühendisler ise, fiziksel bir varlık üzerinde, onun değerini artıracak bir değişiklik yapmayı veya hammadde ya da yarı ürünleri, kullanılabilir bir ürüne dönüştürmeyi üretim saymaktadırlar. Sonuç olarak üretimi tanımlamak gerekirse temel amacı insan ihtiyaçlarının tabiat tarafından hazır olarak karşılanmaması sonucu insanların ihtiyaçları için kullanabilecekleri ürün ortaya çıkarmalarıdır (Erkut ve Baskak, 1997).

Üretim, temel ihtiyaçlar sonucunda ortaya çıkmıştır. Bu temel ihtiyaçların karşılanabilmesi ve üretimin hedefine ulaşabilmesi, girdilerin ve kullanılan kaynakların istenen özelliklerde kullanılması sonucu ortaya çıkmaktadır. Üretim yönetimi; işletmelerin sahip olduğu malzeme, makine ve iş gücü kaynaklarının, belirli miktardaki ürünün istenilen kalite, zaman ve maliyetle üretilecek şekilde bir araya getirilmesidir. Ancak, karmaşık üretim sistemlerinde bu unsurların tamamının dikkate alınarak sistemlerin yeniden düzenlenmesi zor bir süreci beraberinde getirmektedir. Bu zor sürecin üstesinden gelebilmek ve söz konusu dört unsurun en iyi değerlerini bulabilmek amacıyla bazı kantitatif yöntemlerden yararlanılması ise kaçınılmaz bir zorunluluktur (Kobu, 2014). Bir üretim sistemini oluşturan temel elemanlar üretim girdisi, üretim süreci, çıktı, çevresel faktörler ve geri besleme analizi olmak üzere 5 temel veriye sahiptir.

Şekil 2.1: Üretim Sistemini Oluşturan Temel Veriler



Kaynak: Kaçar, 2020.

Üretim sistemleri özelliklerine göre farklılık göstermektedir. Bu özellikler; kullanılan üretim tipi, makine ve malzemelerin konumu, üretilecek ürünün türü, ürün

sayısı gibi özelliklerdir (Tanrıtanır, 1990). Üretim sistemleri 4 ana başlık altında incelenebilmektedir. Bunlar; siparişe göre üretim, parti tipi üretim, proje tipi üretim ve seri üretimdir.

2.2. ÜRETİM SİSTEMİ TİPLERİ

Çeşitli üretim sistemleri mevcuttur ve farklı ölçütlere göre sınıflandırmalar yapılabilmektedir. Üretim miktarı ve akışına göre sınıflandırma yapıldığında 4 grupta incelemektedir.

2.2.1. Siparişe Göre Üretim

Üretilecek ürün tipi, üretim zamanı talep eden tüketiciye bağlı olan üretim sistemidir. Bu üretim sistemindeki en önemli özellik üretilen ürünün kişiye özel olmasıdır. Sabit bir ürün çeşidi yoktur, ürün çeşitliliği fazladır. Tüketici tarafından talep geldikçe üretim yapılmaktadır.

Siparişe göre üretim sisteminde tekrarlama minimum düzeydedir çünkü ürün çeşitliliği çok fazladır ve üretim lotları düşük miktardadır. Bu üretim sisteminde birbirinden çok farklı ürünlerin üretimi gerçekleşmektedir. Ürün çeşitliliğinden dolayı üretimin gerçekleştirildiği tezgâhlar çok yönlü olarak kullanılabilir olmaktadır (Gökçen, 1994). Üretimin çeşitli olması üretimi yapacak olan işçinin de çeşitli ürünleri üretebilecek düzeye yetenekli ve tecrübeli olmasını gerektiriyor.

Siparişe göre üretim sistemi, taleplerin tekrarlanma zamanlarına göre 3 grupta incelenebilir (Karaca, 1996):

- Düşük miktardaki ürünün tek seferde üretilmesi
- Düşük miktardaki ürünün müşteri tarafından talebi geldiğinde belirsiz aralıklarla üretilmesi
- Düşük miktardaki ürünün müşteri tarafından talebi belirli aralıklarla üretilmesi

2.2.2. Parti Tipi Üretim

Bir ürünün özel bir siparişi veya sürekli bir talebi karşılamak amacı ile belirli miktarlarda oluşan partiler halinde üretilmesidir. Üretim bandındaki parti bitmeden başka bir partinin üretimine geçilememektedir. Üretim tamamlandıktan sonra diğer partinin

üretimine geçmeden üretim malzemelerinde, kullanılan tezgâhta vb. gerekli değişiklikler yapılmaktadır.

Parti tipi üretim endüstri sanayisinde en çok kullanılan üretim tiplerinden biridir. Ev eşyası, hazır giyim, gıda üretimi gibi ürünler parti tipi üretime örnek olarak verilebilir.

Parti tipi üretim sistemi üç grupta incelenebilir (Karaca, 1996):

- Partinin sadece bir defa üretilmesi
- Partinin belirsiz aralıklarla üretilmesi
- Partinin sürekli talebi karşılamak amacıyla bilinen zaman aralıklarıyla üretilmesi

2.2.3. Proje Tipi Üretim

Proje tipi üretimde genellikle çok büyük boyutlarda ve tek defaya mahsus ürünlerde kullanılmaktadır. Üretilcek ürün genellikle çok büyük olduğu için ürün sabit bir yerde bulunmaktadır. Ürünün etrafına kurulan ekipmanlarla işçiler ürünün etrafında çalışmaktadır. Bu tip projeler genellikle özel projelerdir. Müşteriden özel sipariş ile geldiği için siparişe göre üretim sistemine benzetilebilir.

Uçak, gemi, ev yapımı proje tipi üretim sistemine örnek olarak verilebilmektedir.

2.2.4. Seri Üretim (Akış Tipi)

Seri üretim sisteminde tesiste makine ve kullanılan donanımların aynı ürünü sürekli üretmek için kullanıldığı üretim sistemidir. Düzenli ve sürekli talep vardır. Az çeşit ürün mevcuttur fakat üretim miktarı yüksektir. Bu üretim sistemindeki amaç birim zamandaki üretim sayısını enbüyüklemektir.

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

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

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

Seri üretim sistemi kendi içerisinde 2 gruba ayrılmaktadır:

- Sürekli seri üretim sistemi
- Kesikli seri üretim sistemi

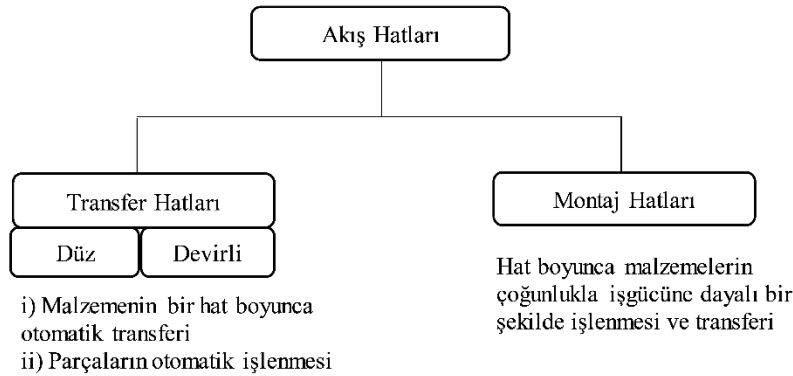
Sürekli seri üretimin en önemli özelliklerinden birisi hammadde veya parçaların doğal yapılarından kaynaklı olarak akıcı özelliğe sahip olmasıdır. Seri üretim ve kesikli üretimin bazı özellikleri birbirine benzerdir fakat kesikli seri üretim tipi üretimde peş peşe istasyonlar bulunmakta ve bu istasyonlarda tek tek üretim yapılmaktadır. Kesikli seri üretimin en yoğun kullanıldığı yerlerden biri otomotiv sektörüdür (Çerçioğlu, 2009).

Kesikli Seri Üretim sistemi de kendi içerisinde 2 gruba ayrılmaktadır:

- Transfer hattı
- Montaj hattı

Transfer hattı, transfer aletleri ile birbirine bağlanmış otomatik imalat makina serilerinin oluşturduğu üretim hatları, transfer hatları olarak adlandırılırlar. Eski dönemlerde bu hatlarda ürünün veya malzemenin yer değiştirmesi iş gücü ile sağlanmaktaydı. Gelişen dönemlerle birlikte ise otomatik hareket ve transfer yöntemleri kullanılmaktadır. Transfer hatlarının en önemli özelliği otomatik makinelerle birlikte otomatik transfer yapılıyor olmasıdır (Acar ve Estaş, 1991).

Şekil 2.2: Akış Hatlarının Sınıflandırılması



Kaynak: Acar ve Estaş, 1991.

Montaj hattı, malzemelerin kurulan hat üzerinde ilerlediği ve üretimi yapılacak olan ürünün hat boyunca yapıldığı hatlara montaj hattı denilmektedir.

2.3. MONTAJ HATLARI

Endüstrileşme sırasında tanımlı olan işlerin parçalarına ayrılarak belirli kurallar çerçevesinde farklı işçilere dağıtılmasına ve oluşturulan istasyonlar ile işlerin sırasıyla istasyonlar arasın aktarılmasıyla daha hızlı ve daha ucuz üretim yapılabileceği düşünülmüştür.

Montaj hatları, yüksek miktarda standardize edilmiş ürünlerin endüstriyel üretiminde büyük önem taşıyan özel akış hattı üretim sistemleridir (Boysen, Fliedner ve Scoll, 2006). Montaj hatlarında malzemelerin ve işlerin bir iş istasyonundan diğerine aktarılabilmesi için iş gücü veya makinelerden yararlanılmaktadır.

Montaj hatları genellikle birkaç istasyondan oluşmaktadır. Her iş istasyonunda tanımlı olan görevler bulunmaktadır. Bu görevler arasında öncelik ilişkisi ve çevrim süresi gibi kısıtlamalar dikkate alınarak iş istasyonlarına atanmaktadır. İstasyonun başından mamul, yarı mamul olarak giren ürün son istasyondan ürün olarak çıkmaktadır.

Daha verimli, hızlı üretim yapılabilmesi ve için iş istasyonları arasındaki iş yüklerinin dengeli olması gerekmektedir. Kayıpları en aza indirecek şekilde işlerin iş istasyonlarına atanmasına Montaj Hattı Dengeleme (MHD) denilmektedir.

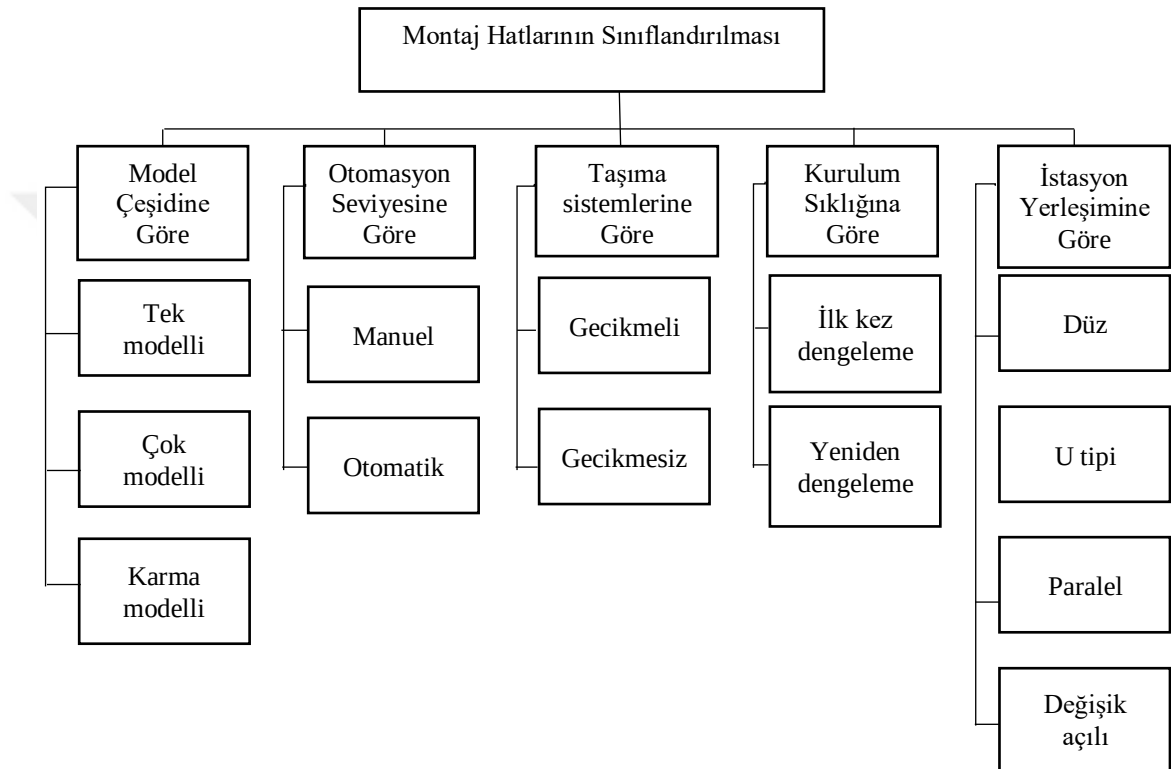
Üretim hızının artırılması, kayıpların azaltılması işletmelerin ekonomisini etkilediği için montaj hattı dengeleme endüstride büyük önem taşımaktadır. Montaj

hatlarının kurulmasında istenilen tüm amaçlar aynı anda gerçekleştirilememektedir. O yüzden işletmeler için gerçek amaçlar belirlenip en uygun çözüm araştırılmaktadır.

2.3.1. Montaj Hatlarının Sınıflandırılması

Montaj hatları model çeşidi, otomasyon seviyesi, taşıma sistemleri, kurulum sıklığı, istasyon yerleşimine göre sınıflandırılmaktadır.

Şekil 2.3: Montaj Hatlarının Sınıflandırılması



2.3.1.1. Model Sayısına Göre Montaj Hattı

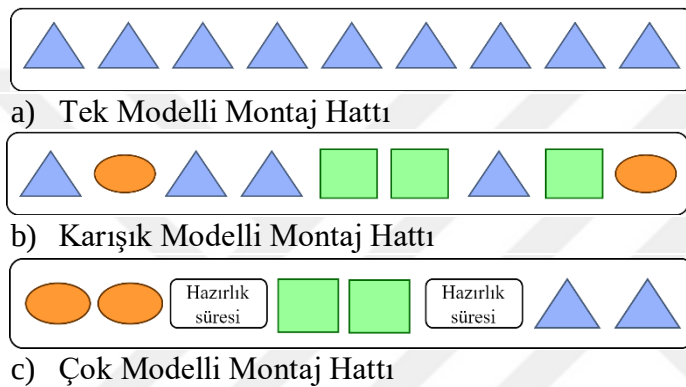
Tek modelli montaj hatları, aynı tip model ve ürünün üretildiği montaj hatlarıdır. Hat içerisinde girilen ürün grupları arasında çok fazla farklılık olmadığı için ürün değişimlerinde gerekli olan hazırlık zamanı çok düşüktür. Basit model montaj hattı da denilebilmektedir. Günümüzde ürün çeşitliliği çok fazla olduğu için tek modelli montaj hatları ihtiyaçları karşılamakta yetersiz kalmaktadır.

Karışık modelli montaj hatları, aynı hat içerisinde aynı anda birden fazla çeşit ürünün üretiminin yapıldığı montaj hatlarıdır. Bu montaj hattının olumlu yönü ise aynı hatta birden fazla çeşit ürün üretildiği için müşterinin çeşitli taleplerine daha kolay yanıt verilebilmektedir. Karışık modelli montaj hattının olumsuz yanı ise aynı hat içerisinde

farklı ürünler üretildiği için ürün süreleri farklı olabilmektedir. Bu da ürünler arası kayıplara, eşit olmayan iş akışlarına ve istasyon sayılarına yol açmaktadır.

Çok modelli montaj hatları, partiler halinde bir de fazla modelin üretimi yapılan hatlardır. Aynı hat içerisinde ürünün üretimi bittikten sonra diğer farklı ürüne geçiş yapılmaktadır. Çok modelli montaj hatlarında yeni girecek ürün için hazırlık süresi gibi düzenlemelerin yapılmasına ihtiyaç vardır. Şekil 2.4 (a)-(c)'de sırasıyla tek modelli montaj hatlarına, karışık modelli montaj hatlarına ve çok modelli montaj hatları gösterimlerine yer verilmiştir.

Şekil 2.4: Model Sayısına Göre Montaj Hattı Gösterimleri



2.3.1.2. Otomasyon Seviyesine Göre Montaj Hattı

Manuel montaj hattı, iş istasyonlarında ürünü üretmek için yapılması gereken işlerin bir kısmının o istasyona atanmış olan işçi veya işçiler tarafından yapıldığı montaj hattı türüdür. Temelde iş gücüne dayalı çalışılmaktadır. Bu montaj hatlarında malzemeler ve iş parçaları el ile istasyonlar arasında taşınmaktadır.

Hatta dengeleme yapılırken görev süreleri işçiye bağımlı olduğu için sabit bir süre mevcut değildir, o yüzden bu montaj hattı tipinde dağılım yapmak zordur. İşçinin süresi fiziksel çalışma koşuluna, motivasyon durumuna, yapacağı işteki beceri durumuna göre değişim gösterebilmektedir. Eğer iş gücü kurulacak sistemden daha ucuz ise manuel hatların kullanımı iş yeri sahipleri tarafından tercih edilmektedir.

Otomatik montaj hattı, üretim hattında bulunan malzemelerin ve ürünlerin istasyonlar arasında otomatik olarak yapıldığı montaj hattı tipidir. İstasyonlar arası iş transferinin mekanik ve mekanik olmayan hatlar şeklinde iki yolu vardır. Mekanik olmayan hatlarda parçaların el ile geçişi sağlanmaktadır. Mekanik olan hatlarda ise hareketli sistemlerle bir diğer istasyona geçiş sağlanmaktadır.

İş gücü maliyeti yüksek ise otomasyon hatları, robotlar ve hareketli sistemlerin kurulması tercih edilmektedir. Otomasyona dayalı montaj hatlarında çalışan işçiye bağlılık daha az olduğu için boş beklemler, istasyonlar arası yaşanan gecikmeler daha azdır.

2.3.1.3. Taşıma Sistemlerine Göre Montaj Hattı

Gecikmesiz montaj hatları belirli bir çevrim süresine sahiplerdir. Konveyör veya hareketli bantların dönüş süresi belirlenen çevrim süresine bağlıdır. Tanımlanan süre bittikten sonra iş bir sonraki istasyona aktarılmaktadır. O süre içerisinde istasyondaki işçilerin görevlerini bitirmeleri beklenmektedir. Montaj hattındaki her istasyon için verilen süre tektir.

Gecikmeli montaj hattında istasyonda tanımlı olan iş öğeleri tamamlanır ve bir sonraki işleminin yapılabilmesi için sıradaki iş istasyonuna aktarılır. Her istasyon aynı sürede işlem süresine sahip değildir ve kendi işini tamamladıktan sonra belirli bir sürenin tamamlanmasını beklememektedir. Gecikmeli montaj hatları üretimde sıkça kullanılmaktadır (Boysen vd., 2006). Bu montaj hattının dezavantajı asenkronize bir durum mevcuttur. İstasyonlar arası darboğazlar veya boş beklemler oluşabilmektedir.

2.3.1.4. Kurulum Sıklığına Göre Montaj Hattı

İlk kez dengeleme, eğer yeni bir ürünün üretimi yapılacaksa ve o ürün için yeni montaj hattı kuruluyorsa kullanılan dengeleme türüdür. Ürünün iş akışı, teknolojik öncelik matrisleri incelenir. Ürün özelliklerine göre montaj hattı kurulum seçenekleri belirlenir. Oluşan seçenekler içerisinde maliyeti en küçükleyecek montaj hattı seçilmektedir.

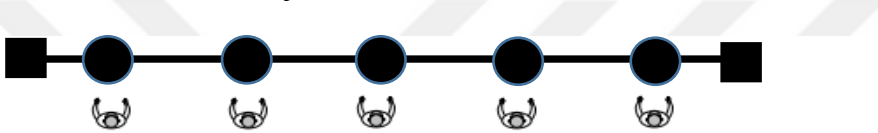
Yeniden dengeleme, seride gerçekleşen dengeleme çalışmasıdır. Montaj hattı problemlerinin gerçek hayatta karşımıza çıkma amacı genellikle kurulum aşaması değil, asıl sebep sürekli değişen dünyada müşteri isteklerinin değişmesi veya yeni kaynakların alınması ile eski dengelemenin artık geçersiz olmasıdır. Değişen bu durumlara göre mevcutta olan dengelemenin revize edilmesi, yeniden dengeleme yapılması gerekmektedir (Falkenauer, 2005). Yeniden dengelemenin başlıca nedenleri; iş gücünün, makinelerin, metotların ve ürünlerin yeni olmasıdır. Mevcut sistemden farklı bir makine geldiyse akış, süre vb. değişeceği için tekrar dengelemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Üretim artmasıyla sebebiyle yeni hat kurulumu ya da yeni iş gücü eklenmesi durumunda hat

içerisinde yeniden dengeleme yapılma ihtiyacı doğmaktadır. Yeniden dengeleme yapılırken iş gücü işçilere döngü süresini en küçükleyecek şekilde ve bu sebeple üretim miktarı en büyüklenecek bir şekilde dağıtılmalıdır.

2.3.1.5. İstasyon Yerleşimine Göre Montaj Hattı

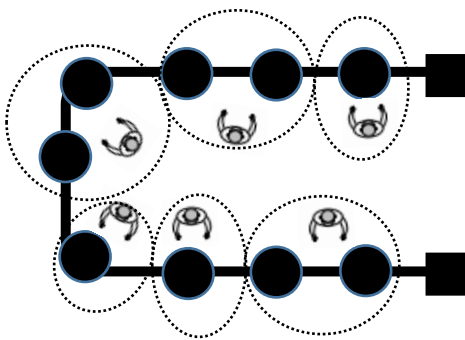
Düz montaj hattı, istasyonların düz bir şekilde birbiri ardına sıralandığı hatlara denilmektedir. Montajı yapılacak olan ürün hattın başından girer ve düz bir şekilde ilerleyerek son istasyondan tamamlanmış ürün olarak çıkmaktadır. Düz montaj hattında ürün sıralaması belirlidir, kolay bir akış vardır. İlk kurulan montaj hatları düz montaj hattı olarak kurulmuştur. Düz montaj hatları için Şekil 2.5'te örnek bir çizim gösterilmiştir.

Şekil 2.5: Düz Montaj Hattı



U tipi montaj hattı, yukarıdan bakınca U şeklinde tasarlanmış olan montaj hatlarıdır. U tipi montaj hatları çok fazla tercih edilmeye başlanmıştır. Alan açısından ve operatörlerin birbiri ile iletişimi açısından avantaj sağlamaktadır. İşçilerin gözlemleyebildiği alan arttığı için etrafa ve diğer süreçlere hâkimiyeti artmaktadır. Şekil 2.6'da da gösterildiği gibi operatörler işlem sürelerine göre birden fazla iş istasyonunda çalışabilmektedirler.

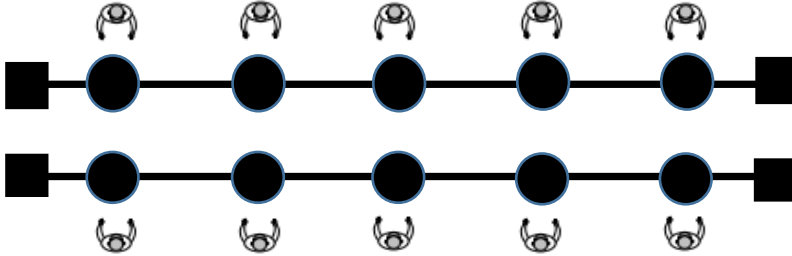
Şekil 2.6: U Tipi Montaj Hattı



Paralel montaj hattı, benzer veya aynı ürünlerin birbirinden ayrı montaj hatlarında paralel istasyonlarda üretilmesidir. Üretimi yapılacak ürünün talebi yüksek ise paralel montaj hattı kurulabilmektedir. Bazı durumlarda montaj hattının tamamı için değil sadece tanımlı iş istasyonunun süresi gerekli çevrim süresini karıştıramıyorsa da o istasyon

için paralel istasyon kurulabilmektedir. Örnek bir paralel montaj hattı Şekil 2.7’de gösterilmiştir.

Şekil 2.7: Paralel Montaj Hattı



2.4. MONTAJ HATTI DENGELEME

Montaj hatları yatırım maliyeti ve verimlilik hedefleri doğrultusunda uzun vadeli planlama kapsamında değerlendirilir. Dolayısıyla montaj hatlarının dengelenmesi ve uygun şekilde çalıştırılması sistemin mümkün olduğunca yüksek verimde çalışması için büyük önem arz etmektedir (Becker ve Scholl, 2006).

Montaj hatları, konveyör ya da bir sistem üzerinde işlerin sıralandığı üretim sistemidir. Amaç yüksek kalite ve düşük maliyetle müşterinin isteğini karşılayabilmektir.

Görev, tamamlanması gereken işin bölünebilecek en küçük yapısıdır. Görevler, montaj hattının başındaki istasyondan başlayarak sıralanmış olan istasyonlara doğru ilerlemekte ve tamamlanmaktadır. Her istasyonda, görevler yapılırken belirlenen döngü süresinin geçilmemesi gerekmektedir. Ürünü oluşturmak için gerekli görevlerin hangi iş istasyonunda yapılacağını belirlediği problem tipine montaj hattı dengeleme problemi denmektedir (Scholl ve Becker, 2004).

Montaj hattı dengeleme görevler arasındaki öncelik ilişkilerinin (örneğin, araba koltuklarının bir arabada kapılardan önce monte edilmesi gerekir) karşılanacağı ve hat verimliliğinin en üst düzeye çıkarılacağı şekilde görevlerin istasyonlara atanmasıyla ilgilidir. Hat verimliliğini en üst düzeye çıkarmak, her istasyonun döngü süresi ile iş yükü arasındaki fark olarak ölçülen toplam boşa kalma süresini en aza indirmekle eşdeğerdir (bir istasyon iş yükü, gerçekleştirdiği görevlerin çalışma sürelerinin toplamı ile tanımlanır) (Vilà ve Pereiara, 2014).

2.4.1. Montaj Hattı Dengelemenin Probleminin Amacı

Montaj hattı dengeleme, verimliliği ve üretim miktarını en üst düzeye çıkarmak için iş parçalarının işçilere, iş istasyonlarına atanmasıdır. Montaj hattı dengelemedeki en büyük amaç işlerin optimum şekilde işçilere dağıtılmasıdır. Dengeli bir dağılım yapabilmek için işçilerin arasında kalan âtıl sürenin en küçük olması gerekmektedir. Hat içerisinde doğru dengeleme yapılması hattan çıkan birim başına üretim miktarının artması demektir. Amaç işçilerde en az boş zamanla istenen üretimi gerçekleştirebilmektir.

Montaj hattı dengeleme problemlerinde genellikle işçi sayısını sabit tutup çevrim süresini en küçüklemek istenir veya çevrim süresini sabit tutup istasyon sayısı en küçüklenmek istenmektedir. Amaç fonksiyonları problemin ihtiyacına göre değişmektedir. Bir montaj hattı dengeleme probleminin amaçları aşağıdaki gibi açıklanabilir (Acar ve Eştaş, 1991):

- Düzenli bir malzeme akışının sağlanması,
- İnsan gücü ve makine kapasitelerini en üst düzeyde kullanmak
- Boş istasyon sürelerini en aza indirmek
- Denge kaybını en aza indirmek
- İşlemleri en kısa zamanda tamamlamak,
- İş istasyonlarının sayısını en aza indirmek
- Eşitlikleri sağlamak,
- Üretimdeki maliyetleri en küçüklemek

2.4.2. Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinde Kullanılan Temel Kavramlar

Montaj hattında kullanılan bazı temel kavramlar vardır. Bunlar aşağıda açıklanmıştır.

Montaj: İş parçalarının gerekli iş gücü ve malzeme kullanılarak nihai ürünü oluşturma işlemidir.

Görev (İş elamanı): İş, iş parçalarının birleşmesi ile meydana gelmektedir. İş ögesi, üretimde toplam işin, bölünebilecek en küçük parçalarına bölünmüş halidir (Carlson, 1962).

Görev (İş elemanı) süresi: Montaj hattında yapılması gereken iş bileşenlerinin tamamlanması için gereken süredir.

İş İstasyonu: Kurulan montaj hattı üzerinde işçilerin görevlerini yerine getirdiği tanımlı yerlerdir. Her istasyonda bir işçi bulunabilir ya da bir işçi birden fazla istasyonda çalışabilir. İhtiyaca göre bu durum değişebilmektedir.

İş istasyonu süresi: Bir iş istasyonuna tanımlı olan görev sürelerinin toplamı iş istasyonu süresini oluşturmaktadır.

Toplam iş süresi: Nihai ürünü çıkarabilmek için gereken toplam süredir. Eşitlik (2.1)'de i . işten N . işe kadar, her bir iş bileşenini göstermektedir. Aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

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

Çevrim süresi: Montaj hattındaki bir ürünün üretimi tamamlanması için gereken birim süredir. Çevrim süresi tüm iş istasyonlarında eşit olabilir ya da istasyon süresinden büyük olabilir. Montaj hattında hat içerisindeki en büyük istasyon süresine göre hattın ürün miktarını çıkacağı için hattın çevrim süresi en büyük istasyon süresidir. Her istasyonun süresi çevrim süresine eşit değilse, çevrim süresinden daha önce tanımlı iş elemanları tamamlanıyorsa eğer arada kalan süre atıl süredir. Çevrim süresi Eşitlik (2.2)'de verildiği gibi hesaplanmaktadır:

$$\zeta S = \frac{T}{\bar{U}S} \quad (2.2)$$

Eşitlik (2.2)'de, ζS , çevrim süresini, T , toplam üretim süresini, $\bar{U}S$, üretilmesi gereken ürün sayısını ifade etmektedir.

Darboğaz: Eğer iş istasyonları arasında süre eşit değilse hattın çıkan ürünün miktarını en büyük istasyon süresi belirlemektedir. Hat içerisindeki en büyük süre darboğaz olarak tanımlanmaktadır.

Gerekli en az istasyon sayısı: Hattın olması gereken döngü süresi belirli ise iş dağılımı yapılırken gerekli en az istasyon sayısı kullanılması gerekmektedir. Gerekli en az istasyon sayısı aşağıdaki Eşitlik (2.3) ile hesaplanmaktadır:

$$S_{enk} = \frac{\sum T}{\zeta S} \quad (2.3)$$

Eşitlik (2.3)'te S_{enk} , gerekli en küçük istasyon sayısını ifade etmektedir.

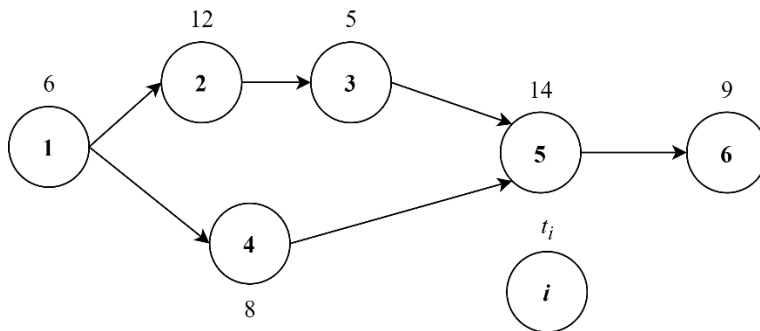
Ortalama iş istasyonu süresi: Montaj hattında üretilecek olan ürün için gereken toplam sürenin belirlenen iş istasyonu sayısına bölünerek ortalama iş istasyonu süresinin bulunmasıdır.

$$\bar{CS}^* = \frac{\sum_i^N t_i}{n} \quad (2.4)$$

Eşitlik (2.4)'te verilen $\bar{CS}^*$ (ortalama iş istasyonu süresi)'nin nasıl hesaplandığı gösterilmiştir.

Teknolojik öncelik diyagramı (Öncelik diyagramı): Montaj hatlarında bazı işlerin yapılma sırası vardır. Bir işin tamamlanabilmesi için ondan önce başka iş ve iş bileşenler yapılması gerekebilmektedir. Bu durum iş bileşenleri arasında öncelik ilişkilerinin olduğunu ifade etmektedir. Montaj hattında iş bileşenleri işçilere/iş istasyonlarına dağıtılırken aralarında öncelik ilişkisi var ise eğer dağılım bu öncelik diyagramına göre yapılmalıdır. Teknolojik öncelik diyagramında çoğunlukla bir grafik ile gösterilir. Bu grafiklerde çemberler iş bileşenlerini, çemberlerin içerisindeki rakamlar iş bileşeni adını, çemberin etrafındaki rakamlar işin süresini, oklar da öncelikleri göstermektedir. Eğer işler birbirine ok ile bağlı ise iş bileşenleri arasında öncelik var demektir. Okun sol tarafında olan iş bileşeni, okun sağ tarafında bulunan iş ögesinden önce yapılması gerektiğini göstermektedir. Şekil 2.8'de örnek teknolojik öncelik diyagramı gösterilmektedir.

Şekil 2.8: Teknolojik Öncelik Diyagramı



Öncelik Matrisi: Teknolojik öncelik diyagramındaki verilerin 0 ve 1 matrisi olarak gösterildiği çizelgedir. Eğer iş bileşeninin kendinden önce yapılması gereken iş var ise matristeki kesişime 1 yazılmaktadır. Eğer işlerin aralarında öncelik yok ise kesişime 0 yazılır. Tablo 2.1'de örnek öncelik diyagramı gösterilmektedir.

Tablo 2.1: Öncelik Matrisi

	1	2	3	4	5	6
1	-	1	1	1	1	1
2		-	1	0	1	1
3			-	0	1	1
4				-	1	1
5					-	1
6						-

Düzensünlük indeksi: Hat dengeleme performans ölçütlerinden bir tanesidir. Toplam görevlerin montaj hattı içerisinde düzensünlük bir şekilde dağıtılıp dağıtılmadığını göstermektedir. Düzensünlük indeksi ne kadar küçükse hat dengeleme sonucu o kadar olumludur.

$$DI(\%) = \frac{\sqrt{\sum (T_{enb} - T_i)^2}}{(n * \zeta S)} * 100 \quad (2.5)$$

Eşitlik (2.5)'te verilen T_{enb} : en büyük iş istasyonu süresi, T_i , i . istasyonun işlem süresidir.

Güvenlik düzeyi: İş istasyonlarında tanımlı olan görevlerin belirlenen çevrim süresi içerisinde tamamlanabilme olasılığına güvenlik düzeyi denilmektedir.

Kuramsal etkinlik: Montaj hattında kullanılması gereken en az sayıda iş istasyon sayısı dikkate alınarak hattın sahip olabileceği en büyük etkinliktir.

$$KE(\%) = \frac{\sum ES_s}{S_{enk} * \zeta S} * 100 \quad (2.6)$$

Eşitlik (2.6)'da verilen KE , kuramsal etkinlik, ES , s. iş istasyonunun etkin süresini ve S_{enk} , ihtiyaç olan en az iş istasyon sayısını temsil etmektedir.

Denge kaybı: Montaj hatlarında, görevler dağıtılırken iş istasyonları ve işçilere dengeli bir şekilde dağıtılmazsa işçi ve iş istasyonları arasında âtıl süreler oluşur. Buna *denge kaybı* denilmektedir. Hat dengelemenin amacı, optimum bir şekilde denge kaybının en küçük olmasını sağlamaktır (Kilbridge ve Wester, 1961). Denge kaybı Eşitlik (2.7)'de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$DK(\%) = \frac{\zeta S - OS^*}{\zeta S} * 100 = \frac{S * OS^* - \sum t_s}{S * \zeta S} * 100 \quad (2.7)$$

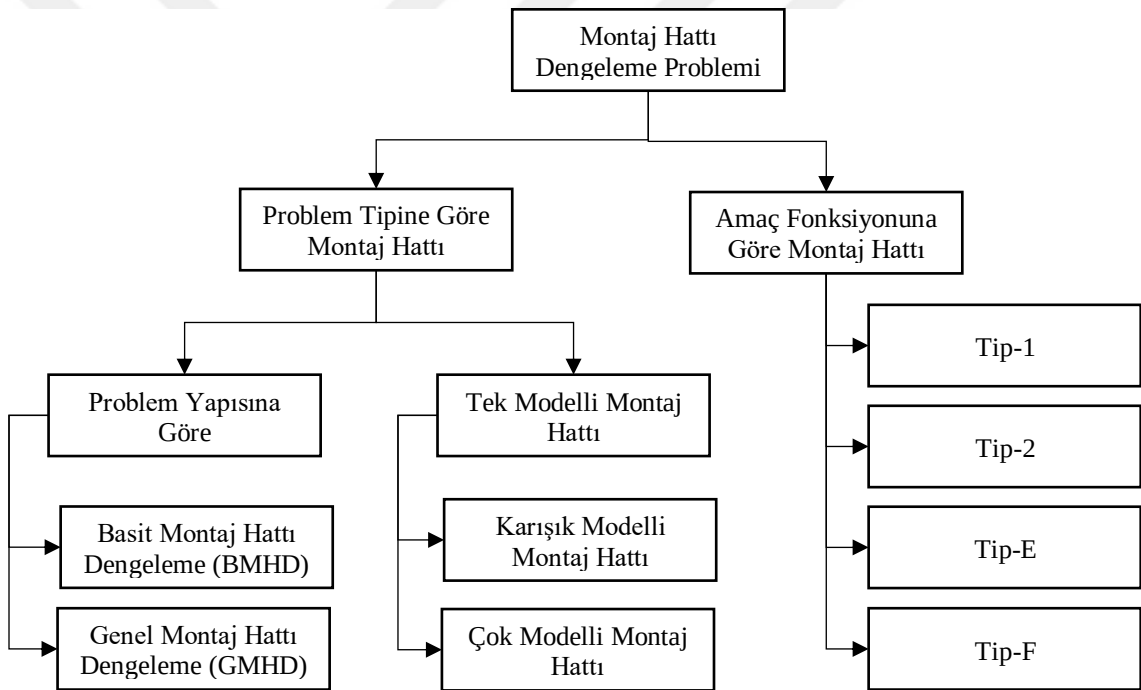
DK , denge kaybını, ÇS , çevrim süresini, OS^2 , ortalama iş istasyonu süresini ve t_s s. iş istasyonunun süresini temsil etmektedir.

2.4.3. Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinin Sınıflandırılması

Montaj hatları üretimde kullanılmaya başladıkça çeşitli problem tipleri ortaya çıkmıştır ve literatürde çeşitli çalışmalar yapılmasına sebep olmuştur. Literatürde montaj hattı dengeleme problemleri için çeşitli ölçütler dikkate alınarak farklı sınıflandırmalar yapılmıştır.

Montaj hattı dengeleme problemleri için literatürdeki çalışmalar dikkate alınmış ve Şekil 2.9.'da gösterildiği gibi sınıflandırma yapılmıştır.

Şekil 2.9: Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinin Sınıflandırılması



Baybars (1986), Becker ve Scholl (2006), Boysen vd. (2006) ve Boysen vd. (2008) literatürde yapmış oldukları çalışmalarında MHD problemlerini problem yapısı olarak basit MHD (BMHD) ve genel MHD (GMHD) problemleri olmak üzere iki gruba ayırmıştır.

Basit montaj hattı dengeleme (BMHD) de montaj hattında tek bir çeşit ürün üretilmektedir. BMHD en çok bilinen montaj hattı dengeleme problem tipidir. GMHD ise BMHD daha geliştirilmiş halidir. GMHD problemleri karışık/çok modeller, U tipi montaj hatları, paralel istasyonlar, maliyet ve kaynak kısıtları gibi ek etkenler içermektedir.

Basit montaj hattı dengeleme probleminin genel özellikleri aşağıda verildiği gibidir:

- Hat içerisinde tek model ürün üretilir.
- İstasyonlar düz bir montaj hattı üzerinde kuruludur.
- Ürün için görevler belirlidir.
- Görevler birden fazla istasyona bölünemez.
- Her görevin belirli bir süresi vardır.
- Her işçi her görevi yapabilir.
- Her istasyonda her görev yapılabilir.
- Görevler arasında öncelik ilişkileri varsa dikkate alınmalıdır.
- Bütün görevler mutlaka iş istasyonlarına atanmalıdır.

BMHD problemleri, amaç fonksiyonlarına göre dört grupta sınıflandırılmaktadır (Scholl ve Becker, 2006):

- *Tip-1:* Tip-1 problemlerinde çevrim süresi ÇS sabittir ve bilinmektedir. Amaç iş istasyon sayısını en küçükmektir.
- *Tip-2:* İş istasyonu sayısı belirlidir. Amaç bu sayıya göre çevrim süresini en küçükmektir. Çevrim süresi en küçüklerek birim zamandaki üretim miktarı arttırmak hedeflenmektedir.
- *Tip-E:* Çevrim süresini ve iş istasyonu sayısını aynı anda en küçükmeye çalışan problem tipidir.
- *Tip-F:* Belirli bir iş istasyonu sayısı ve çevrim süresi için uygulanabilir bir hat dengesinin var olup olmadığını belirlemek olan bir fizibilite problem tipidir.

Montaj hattı dengeleme problemleri ürün miktarına göre de sınıflandırılabilir. 3 grupta incelenebilmektedir. Bu sınıflandırma; tek modelli, karışık modelli ve çok modelli montaj hatlarıdır.

- *Tek modelli montaj hattı:* Hat içerisinde tek çeşit ürün üretimi olmaktadır. Tek tip ürünün yüksek üretim miktarı söz konusudur.
- *Karışık modelli montaj hattı:* Aynı hat içerisinde aynı anda birden fazla çeşit ürünün üretiminin yapıldı montaj hatlarıdır. Bu montaj hattında aynı hatta birden fazla çeşit ürün üretildiği için müşterinin çeşitli taleplerine daha kolay yanıt verilebilmektedir.

- *Çok modellenli montaj hattı*: Aynı montaj hattı içerisinde partiler halinde bir de fazla modelin üretimi yapılmaktadır. Aynı hat içerisinde ürünün üretimi bittikten sonra diğer farklı ürüne geçiş yapılmaktadır.

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

- *Deterministik montaj hattı dengeleme problemi*: Görev sürelerinin kesin olarak bilindiği problem tipidir.
- *Stokastik montaj hattı dengeleme problemi*: Görev süreleri kesin olarak bilinmemektedir. Süreler belirli bir olasılık dağılımına göre değişkenlik gösterebilmektedir. Operasyon süreleri çalışan işçiye, çevreye göre değişiklik gösterebilmektedir.
- *Bulanık montaj hattı dengeleme problemi*: Montaj hattında iş sürelerinin kesin olarak bilinmiyorsa veya dış sebeplerden dolayı süreler üzerinde standartlaştırma yapılamıyorsa, genellikle üçgensel sayılar çerçevesinde gerçekleştiği değerlendirilmektedir (Doğan ve Sakallı, 2016). Eğer montaj hattı kurulurken süreler deterministik olarak belirleniyorsa süreler bulanık olarak belirlenmektedir.

2.4.4. Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinde Kullanılan Temel Kısıtlar

Montaj hatlarında hat dengeleme süreç içerisinde çok önemli bir yere sahip olmuştur. Hat dengeleme yapılırken bazı kısıtlar temel alınması gerekmektedir. Toplam 7 adet kısıttan söz edilebilir. Bu kısıtlardan 2 tanesi temel kısıt, 5 tanesi yan kısıt olarak gruplandırılabilir.

2.4.4.1. Temel Kısıtlar

Çevrim Süresi Kısıtı: Montaj hattındaki bir ürünün üretimi tamamlanması için gereken iş istasyonunda geçirdiği süredir. İş istasyonuna atanmış tüm görevlerin sürelerinin toplamının çevrim süresini aşmaması gerekmektedir.

Öncelik İlişkileri Kısıtı: Bir işin tamamlanabilmesi için o işten önce başka iş ve iş öğeleri yapılması gerekiyorsa işler arasında öncelik kısıtı var demektir. O işin yapılabilmesi için ilk olarak öncülleri tamamlanmalıdır. İş ataması yaparken öncüllük kısıtı dikkate alınarak atama yapılmaktadır.

2.4.4.2. Yan Kısıtlar

Konum Kısıtı: Ürünün ve montajı yapan işçinin montaj hattındaki konumunu ifade eder. Özellikle büyük hacimli ürünlerin üretildiği montaj hatlarında kullanılmaktadır.

Sabit Donanım Kısıtı: Montaj hattında bazen kullanılan sabit malzemelerin, tezgâh ve ekipmanların konumları değiştirilememektedir ve bazı işler için bu donanımların kullanılması gerekmektedir.

İstasyon Yüğü Kısıtı: Bazı iş istasyonlarında toplam iş istasyonu süresinin çevrim süresinden aşağıda kalması istenmektedir. Bu talebin amacı istasyonlarda oluşabilecek aksaklıkların diğer tüm istasyonlara olan etkisini azaltmak olabilmektedir.

Aynı İş İstasyona Atanması İstenen İş Öğeleri Kısıtı: Bazı iş öğelerinin aynı iş istasyonuna atanması gerekmektedir. O görevler bir olarak düşünülüp aynı istasyona atanması zorunlu olarak tutulabilmektedir.

Aynı İş İstasyona Atanmaması İstenen İş Öğeleri Kısıtı: Bazı iş öğelerinin aynı iş istasyonuna atanmaması istenir. Buradaki sebep birden fazla ağır ve fiziksel işin aynı iş istasyonuna atanıp aynı işçi tarafından yapılmasını engellemek amacıyla. Bazı durumlarda da teknolojik olarak aynı yerde olmaması istenmektedir. Bu yüzden aynı iş istasyonuna atanmaması kısıttı konulabilmektedir.

2.5. GENETİK ALGORİTMALAR

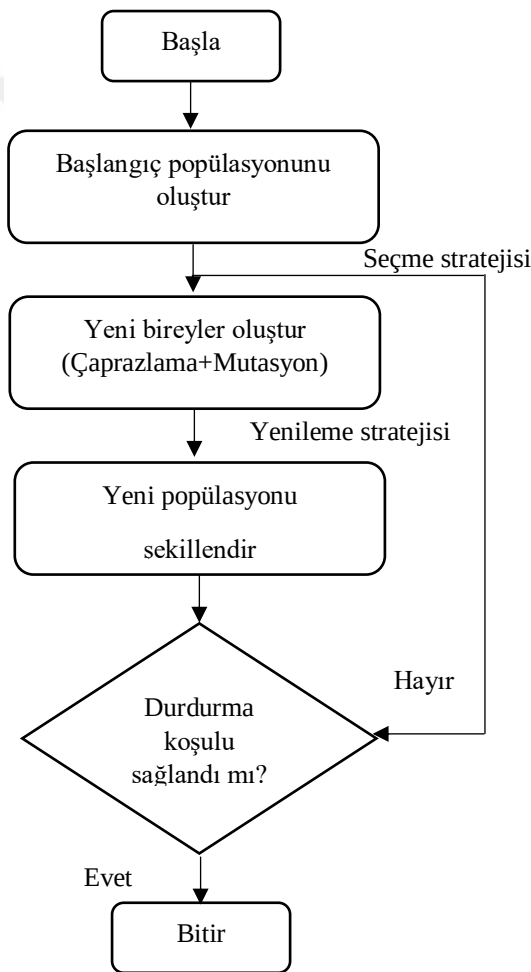
Klasik sezgisel yöntemlerin kullanılması büyük boyutlu problemlerin çözümünde yetersiz kalmaktadır. Bunun sonucunda yeni algoritmalar geliştirilmiştir. Geliştirilen bu sezgisel yöntemlere metasezgisel yöntemler denilmektedir. Karınca koloni algoritması, evrimsel programlama, yinelemeli yerel arama ve genetik algoritmalar, tabu arama, *k*-metasezgisel yöntemler arasındadır.

Genetik algoritma ilk olarak Holland (1975) tarafından ortaya atılmış, ilerleyen süreçlerde çeşitli problem tiplerine Genetik algoritma uygulanmıştır. Bean (1994), rastgele anahtarlı genetik algoritmaları (RKGA) tanıtmıştır. Genetik algoritma çözüm bulmaya çalışırken rastgele arama tekniklerini kullanır ve parametre kodlama yöntemi dikkate alınan bir arama tekniğidir. Çok farklı problemler üzerinde çalışabilmektedir. Genetik algoritmalar çözüm üretirken tek bir çözüm üretmez, farklı çözümleri de içeren bir çözüm kümesi üretmektedir.

Genetik algoritmaları diğer algoritmalarından ayıran en önemli özelliklerden biri seçmedir. Seçmenin önemli olmasının sebebi çözümün uygunluğu arttıkça seçilme olasılığının artıyor olmasıdır. İlk grup oluşturulurken rastgele oluşturulmaktadır fakat rastgele oluşumdaki seçilme olasılığını yine çözümün uygunluğu belirlemektedir (Goldberg, 1989).

Ele alınan büyük problemlerin çözümlerinde klasik optimizasyon teknikleri yetersiz kalabilmektedir (Doğan ve Sakallı, 2016). Bu çalışmada da problemin çözülebilmesi için çok amaçlı genetik algorithmadan yararlanılmıştır.

Şekil 2.10: Genetik Algoritma Akış Diyagramı



Kaynak: Simaria, 2006.

2.5.1. Genetik Algorithmada Kullanılan Temel Kavramlar

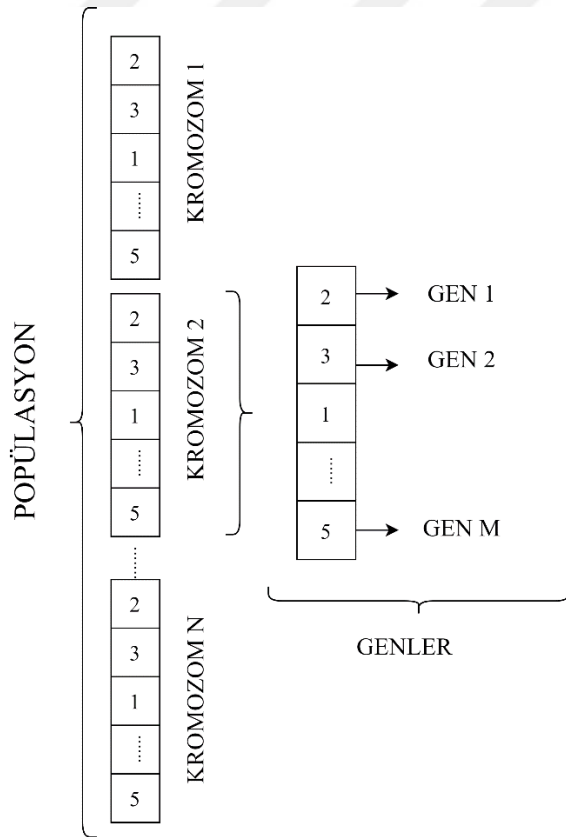
Gen: İçerisinde tam bilgi veya kısmi bilgi taşıyan, genetik kodlamaların oluşturduğu en küçük yapı taşı gen olarak adlandırılmaktadır. Genlerin bir araya gelmesiyle birlikte tüm ya da kısmi bilgileri içeren kromozomlar oluşmaktadır.

Kromozom: Bir veya daha fazla gen bir araya gelerek kromozomları oluşturmaktadır. Oluşturulan kromozomlar problemin çözümüne ait bilgiyi içeren dizinlerdir (Mitsuo, Cheng ve Lin, 2008). Kromozomlar, genetik algoritmanın en önemli birimi olduğu için bilgisayar ortamına aktarımı yapılırken en doğru şekilde aktarılması gerekmektedir.

Popülasyon (Toplum): Kromozomlar bir araya gelerek bireyler oluşmaktadır. Bir popülasyonda olması gereken kromozom sayısı sorumlu kişi tarafından belirlenmektedir.

Popülasyon sayısı ne kadar fazla olursa doğru sonuç verme olasılığı o kadar fazla olur fakat popülasyon sayısı arttığı için problemin sonuç verme süresi de uzayacaktır. Popülasyonda bulunan kromozom sayısı sabit olup ilgili problem özelliğine göre problemi çözen kişi belirlemektedir. Sonucu da etkileyeceği için programın özelliğine göre sorumlu tarafından popülasyon büyüklüğü doğru bir şekilde belirlenmesi önemlidir. Kısaca, genler birleşerek kromozomu, kromozomlar birleşerek popülasyonu oluşturmaktadır.

Şekil 2.11: Popülasyon, Kromozom ve Gen Yapısı



Kaynak: Elmas, 2007

2.5.2. Genetik Algoritmaların Çalışma Prensibi

Genetik algoritma uygulanırken izlenmesi gereken belirli adımlar vardır. Genetik algoritmanın çalışma prensibi aşağıda adım adım anlatılmıştır: (Keskintürk ve Küçük, 2006):

Adım 1: Kullanılacak olan parametrelerin probleme göre belirlenmesidir. Popülasyon büyüklüğü, kromozom sayısı ve mutasyon oranı gibi algoritma ile ilgili global parametrelerdir.

Adım 2: Rastgele kromozomlardan oluşan başlangıç popülasyonu oluşturulur.

Adım 3: Uygunluk fonksiyonunun hesaplanmasıdır. Oluşturulan her bireyin başarısı uygunluk fonksiyonu kullanılarak hesaplanır.

Adım 4: Fonksiyonun yapısına ve uygunluğuna göre seçim yönteminin seçilip seçim havuzunun oluşturulmasıdır. Bir sonraki nesli oluşturacak ebeveynlerin çiftleştirmek için seçilmesidir.

Adım 5: Seçilen kromozomlara çaprazlama operatörünün uygulanmasıdır.

Adım 6: Seçilen kromozomlara mutasyon operatörünün uygulanmasıdır.

Adım 7: Durdurma koşulu sağlanıncaya kadar Adım 3'ten itibaren çözüm aranmaya devam edilir.

2.5.3. Genetik Gösterim

Bir veya daha fazla gen bir araya gelerek kromozom yapısını oluşturmaktadır. Bu genlerin içerisinde de probleme ait bilgiler mevcuttur. Kromozom yapısının içerisinde bulunan genlerin kodlanması genetik algoritmanın en önemli adımlarındandır. Gen kodlaması yapılırken yöntem problem tipine ve eldeki verilere göre yapılmalıdır.

Genetik algoritma yönteminde problem tipine göre kromozomların kodlama yöntemi seçilmesi gerekmektedir. Genetik algoritmada kullanılan kodlama türlerine, ikili, permutasyon (sıralı), değer ve ağaç kodlama olarak örnek verilebilir (Nabiyev, 2012).

2.5.4. Başlangıç Popülasyonunun Oluşturulması

Genetik algoritmanın ilk adımıdır. Genetik algoritmada başlangıç popülasyonunun iyi tanımlanması çok önemlidir. Çünkü başlangıç popülasyonunun doğru tanımlanması en uygun sonuçların ortaya çıkma ihtimalini arttıracaktır (Diaz-

Gomez ve Hougen, 2007). İlk aşamada başlangıç popülasyonu genellikle rassal oluşturulmaktadır.

Başlangıç popülasyonu büyüklüğü belirlenen popülasyon büyüklüğü sayısı ile aynı sayı kullanılabilir. Ya da literatürdeki çalışmalarda popülasyon büyüklüğünün iki katı alınarak kullanıldığıyla da karşılaşılabilmektedir (Kulak, 2008).

2.5.5. Uygunluk Fonksiyonu

Uygunluk fonksiyonu GA'yı en olması gereken konuma getirmeye çalışmaktadır (Carr, 2014). Bu algoritma, bireyleri uygunluğuna göre denemek için matematiksel bir fonksiyona ihtiyaç duyar. Adayları ürettikten sonra ortaya çıkan her sonucun istenilen niteliklerde ve uygunluklarda olup olmadığı uygunluk fonksiyonu hesaplanmasıyla görülmektedir. Uygunluk fonksiyonu hesaplaması her bir kromozom için yapılmaktadır. Hesaplanan kromozomlar içerisinde en iyi sonucu veren çözüm olmaktadır.

2.5.6. Genetik Operatörler

Seçim operatörü: çoğalma operatörü olarak da bilinmektedir. Uygunluk değer hesaplanan bireylerin yeni topluluk oluşturmak için seçilmesidir. Kromozom çiftinin uygunluk değerinin yüksek olması durumunda seçilme ve bir sonraki nesle aktarılma olasılığı daha yüksektir. Böylelikle oluşturulan arama uzayının daha başarılı olması sağlanmaktadır. Seçimin amacı, gelecek nesillerde daha uygun bir popülasyon oluşturmak için popülasyondaki en iyi bireylerin seçilmesi işlemidir.

Seçimde önemli olan konu seçim baskısıdır. Eğer seçim baskısı çok yüksek ayarlanırsa algoritma zamanından önce yanlış bir çözüm bulabilir. Eğer seçim baskısı yüksek ayarlanırsa gereksiz yere algoritmanın çalışma süresi artabilir. Eğer doğru bir seçim baskısı ayarlanırsa minimum sürede kesin çözüme ulaşılabilir. Literatürde yaygın olarak kullanılan seçim operatörleri, rulet tekeri, sıralamalı tabanlı, rastgele ve turnuva seçim operatörüdür.

Elitizm operatörü: Popülasyondaki en iyi bireylerinin bir sonraki nesle aktarıldığı bir seçim yöntemidir. Elitizm seçim yöntemi diğer yöntemlerle birlikte kullanılmaktadır. En yüksek uygunluk değerlerine sahip sabit sayıda birey, elitizm seçim tarafından doğrudan bir sonraki nesle seçilmektedir. Seçilen bireylere diğer seçim

yöntemlerinden biri uygulanarak popülasyondaki diğer boşlukları doldurmaktadır. Elitizm seçim popülasyondaki en iyi bireyi kaybetmeyi engellemektedir. Elitizm genetik algoritmanın performansını yüksek oranda arttırmaktadır.

Çaprazlama operatörü: Kromozomların biyolojik olarak çaprazlamasına benzemektedir. Belirli yöntemlerle iki kromozomdan iki yavru yaratılmaktadır (Carr, 2014; Mitchell, 1996). Çaprazlama operatörü ile ebeveynler arasında genler arasında değişiklik yapılarak popülasyonda genetik çeşitlilik sağlanmaktadır. Çaprazlama operatörü ile ebeveynlerin iyi özelliklerini taşıyarak yeni yavru bireyler üretme şansı vermektedir.

Genetik algoritma yönteminin en önemli parametresinin *çaprazlama oranı* olduğu ifade edilmektedir. Popülasyonda hangi oranla çaprazlama yapılacağı ilk başta parametrelerde belirlenmektedir. Eğer çaprazlama oranı düşük belirlenirse elde edilecek yeni nesilde az sayıda yeni yapı bulunur. Yüksek çaprazlama oranı belirlenmesi durumunda arama uzayı hızlı bir biçimde araştırılacaktır. Eğer çok yüksek olan çaprazlama oranı belirlenirse çaprazlama operatörü hızlı bir şekilde bozulacaktır ve ilk nesille benzer yapıları bile meydana getiremeyecektir. Bu durum algoritmanın performansını azaltmaktadır (Karaboğa, 2017). Genetik algoritma çeşitli çaprazlama yöntemleri vardır. Bunlardan bazıları, tek nokta çaprazlama, iki nokta çaprazlama, çok nokta çaprazlama, tekdüze (uniform) çaprazlama, parçalı haritalanmış çaprazlama, sıra temelli bir çaprazlama olarak gösterilebilir (Küçükkoç, 2011).

Mutasyon operatörü: Çeşitli kromozomlarda kendiliğinden rastgele değişiklikler üreten bir genetik algoritma operatörüdür. Mutasyon operatörünün amacı kromozomlar üzerinde değişiklik yaparak çeşitliliği sağlamaktır. Algoritmanın yerel bir minimumda takılıp kalmasını engellemektedir. Mutasyon operatörü kullanarak yapılan rastgele değişiklikler gen havuzunda daha iyi bir çözüm bulunmadığında genetik algoritmanın ilerlemesine de yardımcı olur. Mutasyon operatörünün kullanılmasının genetik algoritma modelinde çok etkili olduğu bilinmektedir (Mitchell, 1996).

Parametreler belirlenirken mutasyon operatörünün de ne sıklıkla uygulanması gerektiği mutasyon oranı olarak ilk başta belirlenmektedir. Eğer yüksek bir mutasyon oranı verilirse arama uzayında fazla rassallık olacaktır ve bireyler değişken olarak ortaya çıkacaktır. Bu yüzden *mutasyon oranının* doğru belirlenmesi çok önemlidir. Mitchell (1995)'e göre, popülasyon içerisinde, mutasyon oranının küçük olması (0,001)

istenmektedir. Literatürde, değiş-tokuş (swap), ters çevirme, yerine koyma, ekleme, yer değiştirme olmak üzere farklı mutasyon yöntemleri vardır.

2.6. PARAMETRE BELİRLEME

Algoritmaların optimum çözüme ulaşmasında kullanılan parametrelerin büyük önemi vardır. Kullanılacak olan parametrelerin problem için doğru olması ulaşılacak olan sonucu etkilemektedir. Kullanılacak olan parametrelerde ince ayarlar yapılarak algoritmaların daha iyi performans verdikleri ve sonuçların iyileştirilmiş olduğu görülmektedir (Yavuz, 2022). O yüzden metasezgisel çözüm yönteminde kullanılacak olan parametre değerlerinin doğru belirlenmesi çok önemlidir.

2.6.1. Otomatik Parametre Belirleme (Iterated F-Race Algorithm)

Algoritma parametresi belirleme yollarından biri deneme yanılma yoluyla yapılan manuel parametre belirlemesidir. Fakat tek tek deneme yapılması süre olarak uzun sürerken çıkacak olan sonuç da denemeyi yapan kişiye bağlı olmaktadır. O yüzden otomatik parametre belirleme metotları ortaya çıkmıştır.

Otomatik parametre belirleme yöntemlerinden bazıları aşağıdaki gibidir:

- Parametre Yinelemeli Yerel Arama
- Cinsiyete Dayalı Genetik Algoritma
- Sıralı Model Tabanlı Algoritma yapılandırması (SMAC)
- Yinelenen F-Yarış Algoritması (**irace**)

Bu yapılan tez çalışmasında, algoritmaların otomatik parametre kontrol ve kalibrasyonu için **irace** kullanılmıştır.

irace (Yinelenen F-Yarış) Yöntemi: F-Race, aday algoritma yapılandırmaları arasında en iyi algoritma yapılandırmasını seçmede kullanılan bir yarışma metodudur. **irace** yinelemeli bir süreçtir, her yinelemede aday konfigürasyonları bir dizi eğitim örneği üzerinde değerlendirmekte ve değerlendirmeler bir sonraki yinelemeye girdi olarak döndürülmektedir. Bu yöntemde yapılandırma bütçesi belirlenmektedir. Yapılandırma bütçesine ulaşılan kadar bu süreç devam eder. Bu yöntem, iyi performans gösteren bir metasezgisel konfigürasyon bulmak için sıralı istatistiksel testler kullanan bir yarış prosedürünü takip etmektedir (Stützle ve López-Ibáñez, 2019). Yarış boyunca istatistiksel olarak kötü performans gösteren adaylar elenirken iyi performans gösteren adaylar elde

tutulmaktadır. Böylelikle yarışmanın ilk turu tamamlanır. Sonraki yarışma turu için mevcut turun en iyi adayları kullanılır ve bir sonraki iterasyonda yarışmaya katılacak olan yeni aday yapılandırmalar üretilir. Belirlenen bütçe boyunca işlemler tekrar edilir.

irace problem örnekleri setini ve konfigürasyon dosyalarını girdi olarak alır. Maksimum deney sayısı hariç **irace** yapılandırma dosyasında hiçbir ana ayar tanımlanmamaktadır (Souza ve Ritt, 2016). Literatürde, **irace** ile ilgili çalışmalar devam eden paragraflarda verilmiştir.

Massen vd. (2013), feromon tabanlı buluşsal sütun üretimi, kara kutu fizibilitesi ile araç rotalama problemlerini çözmek için karınca kolonisi optimizasyonunu ve bir Karma Tamsayılı Programlama (KTP) çözücüyü birleştiren hibrit bir algoritmasının karmaşık olması ve birçok parametre bulundurması sebebiyle manuel parametre ayarlaması yapmak çok zordur. O yüzden çalışmada **irace** yöntemi kullanılarak otomatik parametre ayarlaması üzerine çalışılmıştır. Parametreler belirlendikten sonra her bir parametre için de hassasiyet analizi yapılmıştır.

Perez, Lopez-Ibanez ve Stutzle (2013), **irace** algoritmasının belirli parametrelere sahip olduğunu belirterek bu 5 parametreyi incelenmişlerdir (yineleme sayısı, ilk eleme testinden önce görülen örnek sayısı, maksimum elit konfigürasyon sayısı, istatistiksel test ve istatistiksel testin güven düzeyi). Gezgin satıcı problemi, ağaç arama çözücüsü ve çok amaçlı karınca koloni optimizasyonu algoritmaları üzerinde eğitim, test seti ve bütçe belirlenerek yapılandırma senaryoları üzerinde çalışmışlardır.

Klazar ve Engelbrecht (2014), f-race çalıştırılırken hesaplama bütçesi aracılığıyla kontrol edildiğini ve sonlandırma noktasının ulaşılan çözümdeki etkisini göz önünde bulundurarak bu çalışmada da optimizasyon çalışmasını olması gereken yerde sonlandırmak için buluşsal bir yöntem biçiminde f-race'e bir uzantı önermişlerdir.

Souza ve Ritt (2016), kullanılan algoritmalarda doğru parametre değerlerini bulunmaya ve test edilmeye çalışılmaktadır. Bu çalışmada ikili ikinci dereceden programlama problemini çözmek için otomatik yöntemleri manuel yöntemler ile karşılaştırmışlardır. Çalışmada sekiz sezgisel algoritma üretebilen bir metot önermişlerdir ve en iyi algoritma ve parametreleri bulmak için yinelenen bir f-race metodunu kullanmışlardır. **irace** algoritmasında girdi olarak problem örnek seti ve konfigürasyon dosyası verilmiştir. Otomatik kalibrasyon için 2000 bütçeli yinelemeli bir f-race gerçekleştirmişlerdir ve deneyler için GNU R paket **irace** kullanmışlardır. F-race

algoritmasının bulduğu değer manuel yöntem ile bulunan değerden çok daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

Kalayci (2016), bu makalede F-race'in bir uzantısı olan **irace** otomatik algoritma yapılandırma paketi tarafından ayarlanan parametre değerlerini kullanarak GENOPT fonksiyonlarını optimize etmek için reaktif arama optimizasyonu çözücüsünü kullanmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda, çoğunlukla daha iyi yüksek atlama puanlarına ulaşılırken başvurularda daha kötü hedef atış puanlarına ulaşılmıştır.

López-Ibáñez vd. (2016), çalışmalarına bilgisayar destekli yarış prosedürlerinin mantığı anlatılmıştır ve yeni genişletmeler tanıtılmıştır. Otomatik algoritma yapılandırmasını iki örnek üzerinden anlatmışlardır. Mevcut **irace**'nin mevcut sürümünü geliştirmek için bazı önerilerde bulunmuşlardır. **irace**'nin çok benzer konfigürasyonlar oluşturmaması için parametreler arasındaki etkileşimleri hesaba katmak amacıyla örnekleme modelinin iyileştirilmesi, bazı **irace** ayarlarının otomatik olarak ayarlanmasına yönelik teknikler ve **irace** çalışması sırasında toplanan büyük miktarda verinin varsayılan analizini sağlayan araçlar eklemişlerdir.

Cáceres vd. (2017), bir yinelemeli yerel arama prosedürü olan ParamILS'den ilham almış ve kapatma (capping) mekanizmasını **irace**'e uyarlamak için çalışmışlardır. Bu çalışmayla **irace**'in çalışma süresini azaltmayı hedeflemişlerdir. Yapılan çalışma başarılı sonuç göstermiş ve son teknoloji algoritma yapılandırıcılarının seviyesine geldiği gözlemlenmiştir. **irace**'in performansı için ParamILS ve SMAC (Ardışık Model Tabanlı Optimizasyon)'ten alınan beş konfigürasyon senaryosunu kullanmışlardır.

Şahin ve Akay (2021), yapay arı algoritmasının parametrelerinin belirlenmesi için yinelemeli **f-race** algoritması test etmişlerdir. Algoritmadan elde edilen sonuçlar literatürde bulunan kontrol parametreleriyle kıyaslanmıştır. Kontrol parametreleri üzerinde yapılan en iyileme çalışmasıyla iyi sonuçlar alınabildiği gözlemlenmiştir. Fakat bu yöntemin hesaplama zamanı çok fazla olan problemler için kullanılıp kullanılmayacağı incelenmesi gerekmektedir.

Bozkurt (2021), çalışmasında SMAC ve **irace** parametre konfigürasyon araçlarının ayarlamış oldukları parametre sonuçları Genelleştirilmiş Yapay Arı Koloni Çatısı (GYAK) algoritması üzerinden karşılaştırmıştır. İki çalışmada da farklı bütçeler kullanılmıştır. Genelleştirilmiş YAK üzerinden 10 boyutlu ve 30 boyutlu problemler kullanılarak düşük (1500), orta (5000) ve yüksek (10000) çalıştırma yapılmış ve sonuçlar

gözlemlenmiştir. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda iki yöntemin sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu gözlemlenmiştir.

Güven (2021), tez çalışmasında Elit Ajan Tabanlı Kendi Kendine Uyarlanabilir YAK geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmanın parametrelerini ayarlamak için **irace** yöntemi kullanılmıştır. Algoritma daha önceden çözümü bulunmuş olan algoritmalarla kıyaslanmıştır. Büyük ölçekli optimizasyon için çoğu algoritmadan daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Gümüş vd. (2023), bu makalede f-race otomatik bir etki alanları arası parametre ayarlama yaklaşımı olarak kullanılmıştır. Farklı eğitim stratejileri kullanılarak dokuz tek amaçlı problem ele alınmış ve f-race'in parametreleri verimli bir şekilde ayarlayıp ayarlamayacağı incelenmiştir. Yazarlar, önceki çalışmalarda deney tasarımı ile yapılmış olan kararlı-hal memetik algoritmaların performansı ve orijinal CHeSC (Cross-domain Heuristic Search Challenge) sonuçlarını f-race yöntemiyle karşılaştırmışlardır. F-race yapılan uygulamalar sonucunda çok başarılı sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Erişilebilen literatür çalışmaları incelendiğinde montaj hattı dengeleme ve işçi atama problemlerinde otomatik parametre belirleme metodu olan **irace** ile ilgili çalışmalara rastlanmamıştır.

2.6.2. Deney Tasarımı

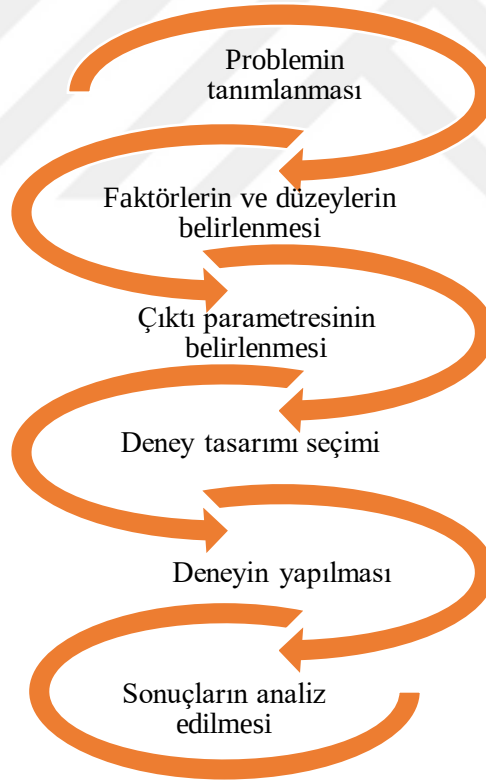
Deney tasarımı (DT), deneysel çalışmalarda planlama, yürütme, sonuçları toplama ve açıklama için kullanılan bir istatistik dalıdır. Sonuçlar veya değişkenler seti üzerinde etkisi olan değişkenler ve bunlar arasındaki etkileşimler DT tarafından belirlenebilir (Montgomery, 2008). DT'nin en önemli özelliği, daha doğru sonuçlar veren deney sayısının azalmasını sağlamasıdır. Böylece değişkenlerin sonuçlar üzerindeki etkisi daha az sayıda deneyle daha doğru ve kesin olarak belirlenebilir.

Akkurt (2002) deney kelimesini “bazı eksikliklerin uygulanmasına veya bazı fikirlerin doğruluk derecelerinin tespitine yardımcı olan ve problemlerin çözümüne yön veren bir gözlem ve analiz süreci” olarak tanımlamaktadır. Deneyler yeni veriler elde etmek için, parametre belirlemek için veya mevcutta olan verilerin kontrolünü sağlamak için yapılmaktadır. Ürün veya süreci iyileştirmek için yapılan deney çalışmalarında karşılaşılan iki durum vardır (Anagün, 2002):

- Ürün veya sürecin ilgili performans özelliklerini optimize eden parametrelerin belirlenmesi,
- Hem ürün hem de süreç için aynı düzeyde verim sağlayan tasarım veya malzemede daha uygun alternatiflerin bulunmasıdır.

Yapılan deneylerde elde edilen sonucun doğruluğu kullanılan uygun test stratejisine bağlıdır. Algoritmanın parametrelerini istatistiksel olarak kalibre etmeye yönelik alternatif deneysel araştırmalar arasında en kapsamlı ve sık kullanılan yaklaşım, tam faktöriyel deney tasarımıdır. Tam faktöriyel tasarım, birden çok parametrenin her seviyesi (en az iki veya daha fazla) için eşit sayıda deney gerçekleştirilerek faktörlerin birbirleriyle etkileşimleri dâhil olası bütün düzeylerinin bağımlı değişken üzerindeki etkilerinin araştırıldığı bir deney stratejisidir (Box ve Draper, 2007). Deney tasarımının uygulama aşamaları Şekil 2.12'deki gibidir:

Şekil 2.12: Deney Tasarımı Adımları



Deney tasarımı sürecinde ilk olarak ele alınan problemin net bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Ele alınan amaç ölçülebilir olmalıdır. İkinci adım, girdi olarak kullanılacak faktör ve düzeylerin belirlenmesidir. Yanlış veya ilgisiz faktör belirlenmesi sonucu değiştirebilmektedir. Parametreler belirlendikten sonra düzeyler

belirlenmelidir. Çıktı parametresinin belirlenmesi deney tasarımını etkileyen en önemli faktörlerdendir. Değişken veya nitelik olarak tanımlanabilir. Deney tasarımı seçiminde hangi deneyin uygulanacağı, denelerin kaç kere tekrarlanacağı sonuçta önemli rol oynamaktadır. Uygulanacak olan yöntem belirlendikten sonra veri toplama işlemi başlamaktadır. Elde edilen verileri analiz edebilmek için uygun olan bir program seçilir ve sonuçlar elde edilir. Sonuçlar deneyi yapan kişi tarafından yorumlanarak probleme uygunluğu tartışılır.





ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

**MONTAJ HATTI İŞÇİ ATAMA VE DENGEME PROBLEMİ İÇİN ÇOK
AMAÇLI GENETİK ALGORİTMA: BİR OTOMOTİV YAN SANAYİSİNDE
UYGULAMA**

3.1. PROBLEMİN TANIMI

Montaj hattı dengeleme ile ilgili literatürde birçok çalışma mevcuttur fakat çalışmalarda sadece hat dengeleme yapılması gerçek hayat problemleri için yeterli gelmemektedir. Çünkü gerçek hayatta her işçinin becerileri, fiziksel durumları, iş yapabilme kapasiteleri farklıdır. Bu yüzden ele alınan problemde tüm işçiler için performans farklılıkları dikkate alınarak hat dengeleme ile işçi atamalarının da yapılması problemi ele alınmıştır. Literatürde bu problem tipi, Montaj Hattı İşçi Atama ve Dengeleme (MHİAD) problemi olarak bilinmektedir.

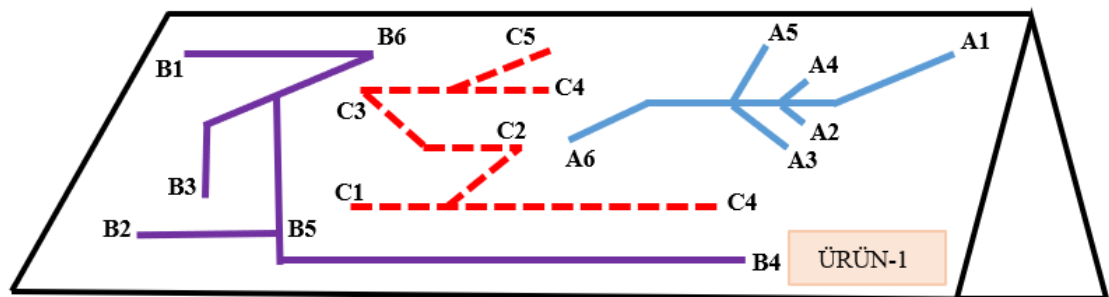
Basit montaj hattı dengeleme problemlerinde hazırlık/taşıma (yürüme) süreleri işlem sürelerine kıyasla çok daha küçük olduklarından genellikle çalışmalarda göz ardı edilmektedir. Bazı durumlarda da işlem sürelerine eklenmektedir. Andres, Miralles ve Pastor (2008), klasik BMHDP’de hazırlık sürelerini ayrı değerlendirmiş ve bu konuda ilk çalışmayı yaparak yeni bir sıra bağımlı hazırlık süreli montaj hattı dengeleme problemini tanımlamıştır. MHİAD Tip-2 problem tipinde, yürüme sürelerini (walking time) dikkate alan çalışmalara rastlanılmamıştır. Bu çalışmada, ele alınan işletmede her bir iş istasyonunun çalışmaya başlayabilmesi için set askılarındaki kablo demetlerinin iş istasyonlarına taşınması gerekmektedir. Her istasyonunun kablo demetlerinin bulunduğu set askısına olan uzaklığı farklıdır. Buradaki yürüme süreleri göz ardı edilmemiş ve istasyon bazlı hazırlık süreleri değerlendirilerek hat dengeleme çalışması yapılmıştır.

Bu çalışmada, kablo donanımları üreten bir otomotiv yan sanayisinde montaj hattı dengeleme ve işçi atama konusu ele alınmıştır. Ele alınan işletme, otomotivlerde bulunan kablo tesisatı ve kablo donanımlarının üretimini yapmaktadır. İşletme, kablo üretim, kesme-sıyırma-terminalleme bölümü ve montaj bölümü olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır. İşletmede ilk olarak kablo, üretim bölümünde siparişe göre kabloların üretimi yapıldıktan sonra, kesme-sıyırma-terminalleme bölümüne gelerek donanımlarda iletkenliği sağlayan terminal, kabloların ucuna vurulmaktadır. Böylece kablo demetleri oluşmaktadır. Üretime hazır hale gelen kablo demetleri, set askısı olarak adlandırılan kablo demetleri için numaralandırılmış tanımlı yerlerine asılmaktadır.

İşletmede montaj alanında, her biri 20 adet konveyörden ve her bir konveyörde üretim miktarına göre montaj masasından oluşan bir hat sistemi bulunmaktadır. Konveyör sistemi, her bir montaj masasında bir operatör bulunacak şekilde çalışmaktadır. Her bir montaj masası, ilgili otomobile ait kablolarının adreslendiği bir plaka anlamına

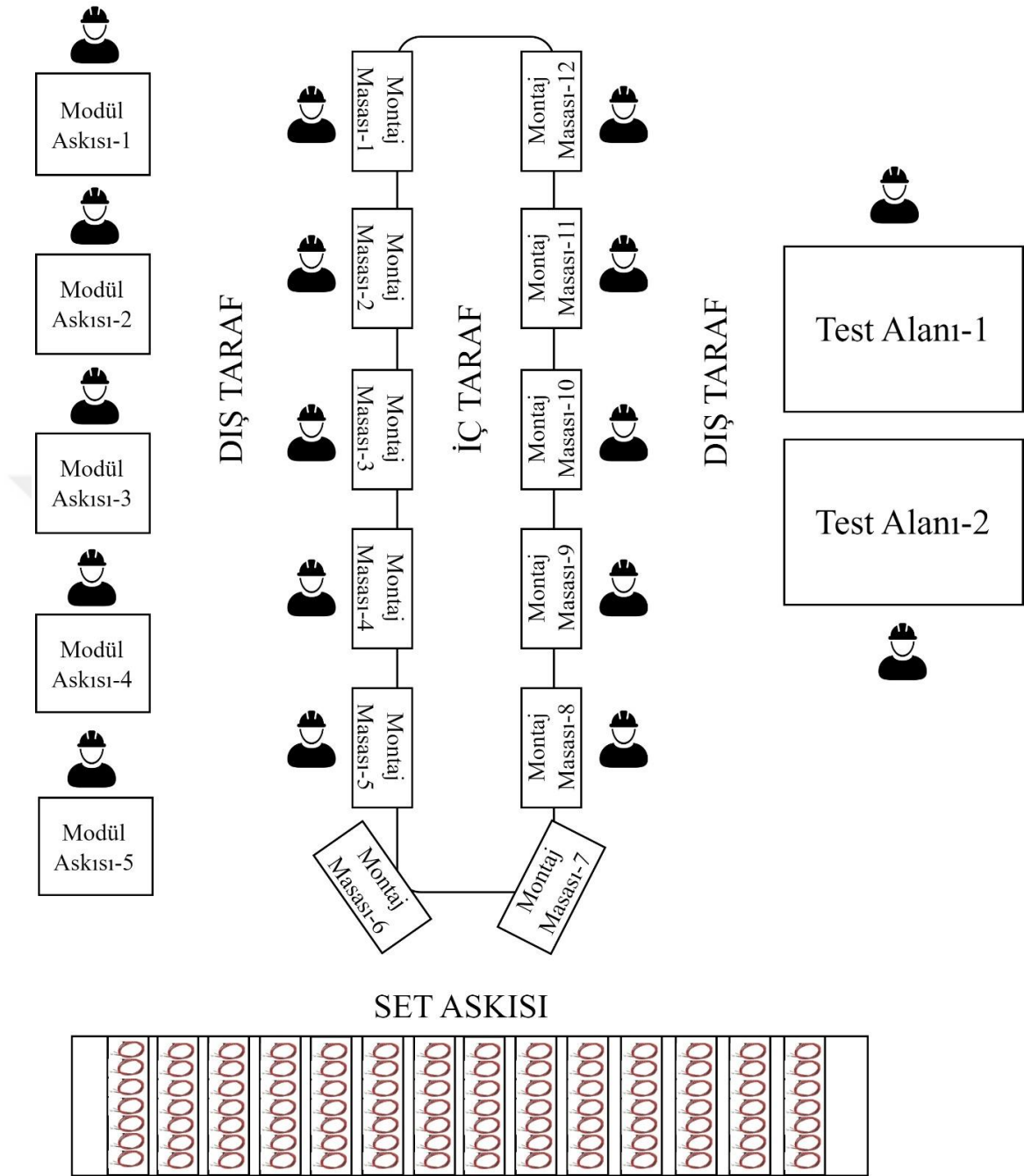
gelmektedir. Her bir aracın kendine ait bir elektrik donanımı vardır. Bu donanım, farklı kablo renginden, kesitinden, uzunluğundan ve kablo yollarından oluşmaktadır. Buna göre, her bir işçi kendine tanımlı olan görevleri dikkate alarak montaj masasındaki kablo adreslemeyi gerçekleştirmesi gerekmektedir. Montaj masasına ait örnek bir kesit Şekil 3.1’de, proje gruplarından tavan tesisat donanımının üretildiği hatta ait örnek bir montaj masası görülmektedir. Bu hatta konveyör üzerinde kablo adresleme ve donanım bantlama prosesleri bulunmaktadır. Kablo adresleme prosesinde, montaj masası üzerinde her kablonun bir adresi (A1-A6, B1-B6 ve C1-C5) ve bu adreslere giden kablo yolları (mor ve mavi düz çizgiler, kırmızı kesikli çizgiler) bulunmaktadır. Şekil 3.1’de mavi ve mor düz çizgiler ve kırmızı kesikli çizgi ile gösterilen yerler kabloların takip etmesi gereken yollardır. Elektrik iletkenliğinin doğru sağlanabilmesi için her kablo kendine ait tanımlı yerlerinden götürülmek zorundadır. Örnek olarak, Ürün-1’e ait kablo, atanmış işçi kablo rotalama işlemini B1 noktasından başlayarak sırasıyla B6, B5 ve B4 yollarını izleyip ilgili adreslerine götürmektedir. Aynı ürün için, ele alınan farklı kesit, renk ve boyuttaki başka bir kablo, B1, B6 ve B3 yolları takip edilerek adreslenmektedir. Bu şekilde, iş tanımında belirtilen ürüne ait tüm kabloların rotalama işlemi yapılarak ilgili aracın tavan tesisatının elektriksel donanımı bu istasyonda tamamlanıp bir sonraki işlem için diğer istasyona aktarılmaktadır. Mevcut durumda, konveyör sisteminde konveyörün hareket hızı hesaplanan çevrim süresine göre ayarlanmaktadır.

Şekil 3.1: Şirket Örnek Montaj Masası Çizimi



Şekil 3.2’de bir otomobile ait konveyör sistemi görülmektedir. Konveyördeki montaj masaları dışa dönük olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu nedenle, Şekil 3.2’de de görüldüğü gibi, montaj masalarının dış tarafında çalışmakta olup, iç tarafa girememektedirler.

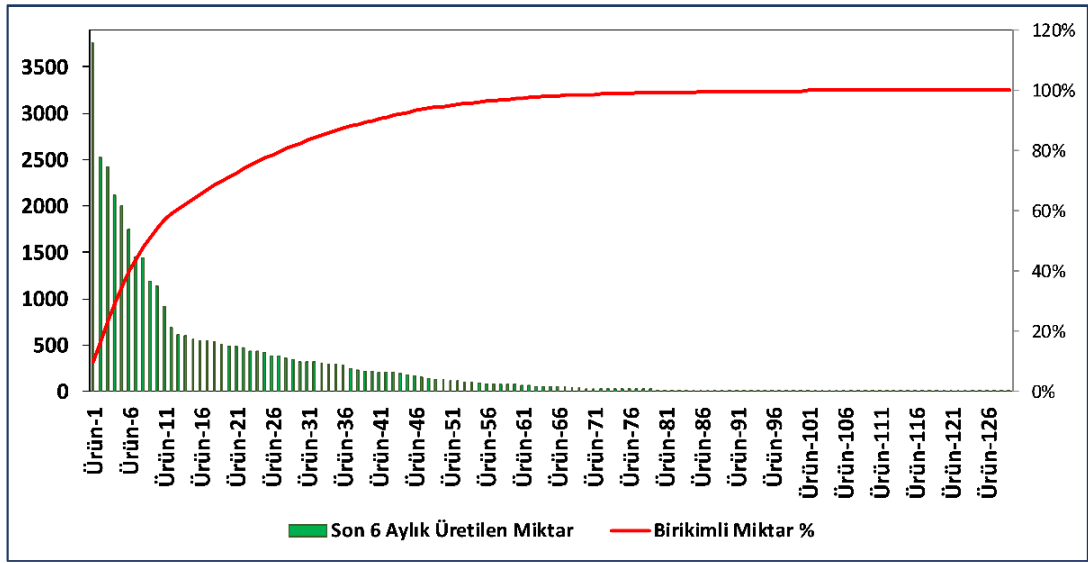
Şekil 3.2: Şirket Örnek Hat Çizimi



Montaj bölümünde hat dengeleme çalışmaları manuel olarak Microsoft Excel programında bu iş için atanan personeller tarafından yapılmaktadır. Fakat manuel bir işlem olduğu için üretim miktarı ve görev süresi değişikliklerinde hızlı tepki verilememektedir ve yapılan dengeleme işlemleri ve işçi atama işlemleri teknisyenin inisiyatifine bırakılmış bir şekildedir. Görevli teknisyenler tarafından yapılan sonuçlarda öncelik ilişkileri gözden kaçabilmekte ve bu da yanlış görev atamasına sebep olmaktadır.

Bu çalışmada, montaj hattı işçi atama ve dengeleme problemi için hattın SAP (System Analysis and Program Development)'den son altı aylık ürünlere ait üretim miktarı verisi alınmıştır. Müşteriden alınan sipariş oranlarına göre en çok üretimi yapılacak olan model tipini belirlemek için 129 ürün üzerine Pareto analizi yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda en fazla üretim miktarına sahip Ürün-1'e ait montaj hattı işçi atama ve dengeleme işlemi yapılmıştır. Firmanın bilgi gizliliği nedeniyle, ürünlere ait isimlere yer verilmemiştir.

Şekil 3.3: Üretimi Yapılacak Referansların Pareto Analizi

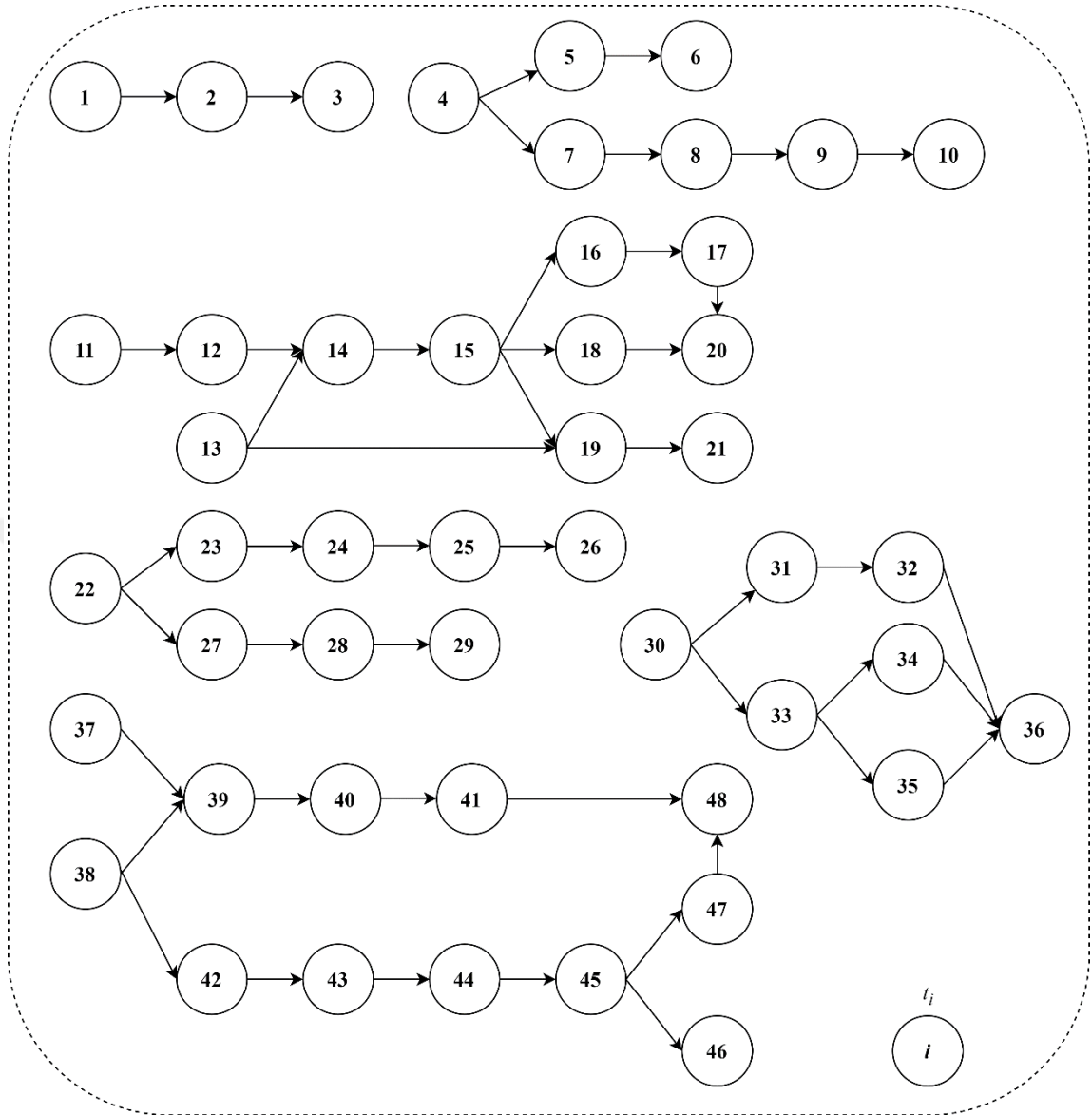


İşletmedeki dengeleme yapılacak olan problem için işçi ve iş istasyonu sayısı belirlidir. İşçilerin hepsinin iş yapabilme performansları birbirinden farklıdır. Görevler arasında öncelik ilişkileri bulunmaktadır. Tavan tesisat donanımının üretildiği hatta ele alınan Ürün-1, 48 işten oluşmaktadır ve hatta 8 işçi görev yapmaktadır Her bir işçinin kablo demetlerinin bulunduğu set askısından iş istasyonlarına ortalama yürüme mesafeleri Tablo 3.1’de verilmiştir. Her bir işe ait iş önceliği Şekil 3.4’te ve her bir işçinin bu işleri yerine getirme süreleri saniye cinsinden Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.1: Set Askısından İş İstasyonlarına Ortalama Yürüme Mesafesi

İş istasyonu	R_s	İş istasyonu	R_s
1	39,8	5	18,5
2	32,9	6	15,3
3	27,2	7	12,0
4	22,6	8	10,1

Şekil 3.4: Ürün-1'in Tavan Tesizat Donanımına Ait Öncelik İlişki Diyagramı



Tablo 3.2: Probleme Ait İşçi Bazlı İş Süreleri

İş/işçi	1	2	3	4	5	6	7	8
1	9,0	11,4	11,4	13,4	11,0	12,5	6,7	9,8
2	9,0	9,2	9,8	5,8	8,7	9,6	7,4	7,5
3	24,4	25,1	23,2	24,5	26,2	24,0	27,2	25,0
4	19,9	17,8	16,5	21,2	19,0	18,4	17,0	21,0
5	5,6	4,3	9,8	8,0	7,5	6,8	8,0	7,5
6	33,6	33,7	35,2	38,6	34,2	35,1	36,4	31,5
7	24,5	22,8	23,5	19,8	21,0	25,8	26,2	24,0
8	48,9	47,0	47,8	42,3	54,1	49,3	43,8	46,0
9	16,0	16,0	20,1	15,8	14,9	15,8	13,4	17,1
10	37,8	38,2	40,0	35,2	34,8	39,0	37,0	34,2
11	39,9	48,5	39,0	38,7	37,1	42,9	34,3	38,0

Tablo 3.2: (Devamı) Probleme Ait İşçi Bazlı İş Süreleri

İş/işçi	1	2	3	4	5	6	7	8
12	14,5	14,0	15,3	11,1	10,9	18,3	14,0	17,6
13	3,5	3,5	4,0	5,6	7,1	3,6	3,4	5,6
14	18,7	17,0	16,5	17,9	15,6	21,0	20,2	19,8
15	6,6	6,2	6,0	3,2	9,1	11,2	5,8	6,0
16	9,5	9,5	10,2	8,9	7,4	8,0	12,3	13,5
17	54,9	55,0	52,9	51,7	57,8	56,9	54,8	52,2
18	6,6	6,2	6,0	3,2	9,1	11,2	5,8	6,0
19	3,5	3,0	4,8	5,2	7,0	3,5	4,0	3,8
20	68,2	68,0	69,0	75,6	74,6	62,5	68,7	67,0
21	58,3	58,0	57,2	56,5	59,3	62,0	54,2	55,0
22	47,8	48,0	47,0	46,5	45,8	47,9	48,5	46,8
23	24,8	30,8	22,3	20,0	25,6	24,1	26,2	21,5
24	24,8	24,1	26,0	27,1	25,2	22,0	23,2	24,0
25	53,1	60,2	52,6	47,1	54,9	52,3	52,0	56,7
26	66,7	50,8	78,2	84,2	66,0	72,0	62,0	71,0
27	22,2	22,1	23,0	25,2	24,3	23,2	22,8	21,2
28	14,3	11,2	12,5	14,0	15,3	16,4	15,5	14,9
29	24,6	25,1	27,6	24,0	21,8	26,4	24,0	23,0
30	9,6	9,0	12,2	15,0	7,1	5,8	6,1	8,0
31	4,5	4,2	6,8	4,9	5,6	6,7	6,7	6,0
32	49,1	49,8	52,0	51,5	47,0	46,5	48,9	43,0
33	9,6	9,0	12,2	15,0	7,1	5,8	6,1	8,0
34	41,2	41,0	41,6	45,4	45,9	44,0	38,0	38,6
35	8,2	9,0	5,6	7,9	12,0	4,6	8,0	9,8
36	15,0	17,3	11,0	13,2	9,5	7,8	12,3	17,0
37	8,3	7,2	5,0	9,5	8,0	8,2	7,6	6,4
38	24,3	25,0	23,5	29,0	23,4	21,2	28,0	27,2
39	52,2	52,0	51,5	53,8	53,0	52,2	50,3	48,0
40	7,6	7,0	5,3	12,3	14,1	6,8	7,9	8,2
41	51,1	50,2	48,0	53,2	55,2	54,8	56,4	52,3
42	38,2	39,0	38,6	37,4	36,5	36,0	34,8	40,8
43	26,9	25,0	28,6	22,4	24,7	25,7	23,8	26,9
44	16,1	17,0	16,0	15,3	14,9	15,0	16,8	18,0
45	37,0	39,0	41,2	40,1	36,7	35,0	36,5	37,0
46	16,6	16,4	12,8	13,5	14,8	17,6	18,0	18,2
47	25,4	22,0	23,2	26,0	24,1	23,0	28,0	21,5
48	11,0	11,2	15,0	12,5	13,4	11,8	10,9	9,4

3.2. ÖNERİLEN ÇOK AMAÇLI MATEMATİKSEL MODEL

Ele alınan problem n adet görevin s adet iş istasyonuna atanması ve farklı özelliklere sahip olan j adet işçinin işlere ve istasyonlara minimum çevrim süresinde ve optimum bir şekilde dengeli olarak atanması problemi. Montaj hattı işçi atama ve dengeleme problemi için önerilen matematiksel modelin varsayımları aşağıdaki gibidir:

- Her işçinin ve görevin süreleri deterministik olarak bilinmektedir.
- Görev süreleri işçiye bağlı olarak değişmektedir.
- Her işçi her işi yapabilmektedir.
- Her istasyondaki işçinin hazırlık süresi belirlidir.
- Her bir görev bir işçiye ve bir iş istasyonuna atanmalıdır.
- Her işçi yalnızca bir iş istasyonuna atanmalıdır ve her istasyonda yalnızca bir işçi atanmalıdır.
- İşler arasındaki öncelik ilişkileri mevcuttur, öncelik ilişkileri bilinmektedir.
- Her işçi birden fazla görevi yerine getirebilir.
- İstasyonlara birden fazla görev atanabilir.
- Tek tip ürün üretimi söz konusudur.
- Görevler bölünemezdir.

İndisler:

j	:	işçi sayısı $i \in \{1,2,\dots,m\}$
$i.k$	:	iş sayısı $j \in \{1,2,\dots,n\}$
s	:	istasyon sayısı $s \in \{1,2,\dots,p\}$

Parametreler:

I	:	İş kümesi
J	:	İşçi kümesi
S	:	İş istasyonu kümesi
D_i	:	i . işi için öncelik matrisindeki öncelikli işler kümesi
P_{ij}	:	j . işçiye i . işin atanması durumunda gereken süre
R_s	:	s . istasyondaki kablo taşıma süresi
M	:	Pozitif büyük bir sayı

Karar Değişkenleri:

ζS	:	Çevrim Süresi
-----------	---	---------------

X_{sij} : 1, j . işçiye i . iş s. istasyona atanırsa; 0, diğer durumda

Y_{sj} : 1, j . işçi s. istasyona atanırsa; 0, diğer durumda

Çok amaçlı matematiksel model:

$$Enk f_1(x) = (\zeta S) \quad (3.1)$$

$$Enk f_2(x) = \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \left(\sum_{i \in I} \left((P_{ij} \times X_{sij}) + R_s \right)^2 \right) \quad (3.2)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{j \in J} X_{sij} = 1, \quad \forall i \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in J} Y_{sj} \leq 1, \quad \forall s \quad (3.4)$$

$$\sum_{s \in S} Y_{sj} \leq 1, \quad \forall j \quad (3.5)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{j \in J} s \times X_{sij} \leq \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} s \times X_{skj}, \quad \forall i, k / i \in D_i \quad (3.6)$$

$$\sum_{i \in I} \left((P_{ij} \times X_{sij}) + R_s \right) \leq \zeta S, \quad \forall s, j \quad (3.7)$$

$$\sum_{i \in I} X_{sij} \leq M \times Y_{sj}, \quad \forall i \quad (3.8)$$

$$M > \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \left((P_{ij} \times X_{sij}) + R_s \right), \quad \forall i \quad (3.9)$$

$$X_{sij}, Y_{sj} \in \{0,1\}, \quad \forall i, j, i \neq j, s \quad (3.10)$$

$$\zeta S \geq 0 \quad (3.11)$$

Eşitlik (3.1) ile en küçük çevrim süresi bulunması hedeflenirken Eşitlik (3.2) ile karesel yük atama ile görev yüklerinin dengelenmesi amaçlanmıştır. Eşitlik (3.3), her bir operasyonun bir işçiye ve bir iş istasyonuna atanmasını sağlamaktadır. Eşitlik (3.4), her iş istasyonunda yalnızca bir işçinin olmasını garanti eder. Eşitlik (3.5), her işçinin sırasıyla yalnızca bir iş istasyonuna atanmasını ve Eşitlik (3.6), görevler arasındaki öncelik ilişkilerini tanımlar. Eşitlik (3.7) -(3.8), atanan görev sürelerinin çevrim süresini geçmemesini sağlar. Eşitlik (3.8), bir iş istasyonuna atanan her işçinin, M 'nin yeterince

büyük bir sabit olduğu çevrim süresi aşılmadığı sürece birden fazla görevi yerine getirebileceğini ifade etmektedir. Eşitlik (3.10) -(3.11), karar değişkenlerini belirtir.

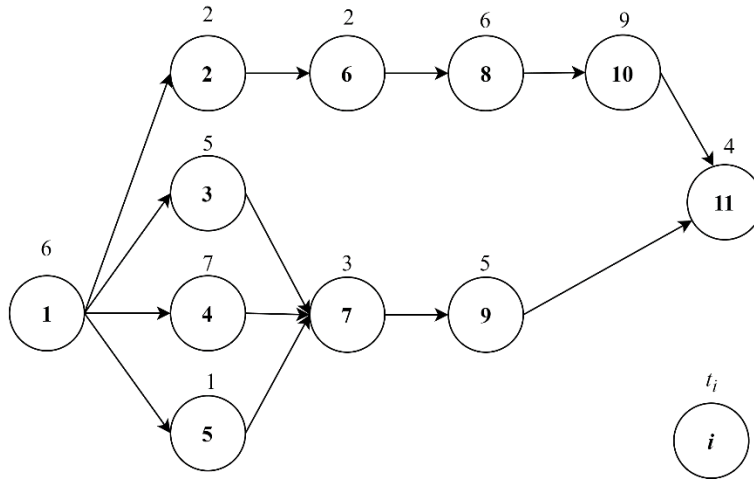
Ele alınan problem, iki amaç fonksiyonlu olduğu için amaç fonksiyonları ağırlıklı-toplam yöntemi (ATY) yöntemi ile birleştirilmiştir. ATY, pareto etkin çözümleri elde etmede en bilinen yöntemlerden biridir (Miettinen, 2014). ATY'nin matematiksel modeli, Eşitlik (3.12)'de formüle edilmiştir.

$$enk \text{ ATY}(x) = [w_1 \times \zeta S] + \left[w_2 \times \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \left(\sum_{i \in I} ((P_{ij} \times X_{sij}) + R_s)^2 \right) \right] \quad (3.12)$$

Burada w_1 ve w_2 , ζS ve $\sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \left(\sum_{i \in I} ((P_{ij} \times X_{sij}) + R_s)^2 \right)$ için önem ağırlıklarını temsil etmektedir. $w_1 + w_2 = 1$ olduğu varsayılarak $w_1, w_2 \geq 0$ olacaktır ve Eşitlik (3.3)- (3.11) arasındaki kısıtların tümü sağlanmalıdır.

MHIAD Tip-2 problemine ait önerilen çok amaçlı model, Şekil 3.5'te öncelik ilişkileri ve işlem süreleri verilen Jackson, (1956) örneği Lingo 11.0 paket programı kullanılarak test edilmiştir. Bu örnek için, her bir işçinin iş istasyonuna yürüme süresi sırasıyla 3, 5, 7 olarak ele alınmıştır.

Şekil 3.5: Jackson (1956) Probleminin Öncelik Diyagramı ve İşlem Süreleri



11 görev ve 3 işçi için verilen öncelik ilişkileri ve görev süreleri kullanılarak görev, montaj hattı işçi atama ve dengeleme çalışması yapılmıştır. Çalışmada görev bazlı işçilerin süreleri değişkenlik gösterdiği için Jackson (1956) örnek modelinde verilen süreler ilk işçinin süreleri olarak kabul edilmiştir. t_i , orijinal veri setinde i . işin işlem süresi olarak adlandırılırsa diğer işçilere ait işlem süreleri $[1, t_i]$ arasında rassal olarak

üretilmiştir. Buna göre ikinci ve üçüncü işçiler için süreler Tablo 3.3'te gösterildiği gibi hesaplanmıştır. Bu model, Lingo 11.0 kullanılarak çalıştırıldığında elde edilen çevrim süresi 14, karesel yük atama amaç değeri ise 588 olarak bulunmuştur. Bu işlem, Lingo 11.0 programında 942 sn sürmüştür. Elde edilen sonuca göre, İşçi-1'e atanan işler sırasıyla, 1,5; İşçi-2'ye atanan işler, 2,4,6,8,10; İşçi-3'e atanan işler, 3,7,9,11'dir.

Tablo 3.3: Jackson (1956) Modeli İş Süreleri

İş/işçi	1	2	3
1	6	4	3
2	2	1	2
3	5	3	4
4	7	4	5
5	1	1	1
6	2	1	2
7	3	1	2
8	6	3	4
9	5	3	2
10	5	1	4
11	4	3	2

Ele alınan 48 iş ve 8 işçiden oluşan gerçek-hayat probleminin çözümü için de Lingo 11.0 paket programı kullanılmıştır. Fakat ele alınan problem, büyük verilere sahip olduğu için çözüme ulaşamamıştır. Model, 25800 saniye (8 saat) çalıştırılmasına rağmen programdan herhangi bir sonuç elde edilmemiştir.

3.3. ÇOK AMAÇLI GENETİK ALGORİTMA ÇÖZÜM ÖNERİSİ

MHIAD Tip-2 probleminin NP-zor olması ve kesin çözüm yöntemlerinin problem boyutu sınırlaması nedeniyle, problemin çözümü için yaklaşık (approximation) prosedürlere ihtiyaç duyurulur (Cristóbal, vd. 2008). Bu nedenle, MHAİD Tip-2 probleminin çözümü için (meta)sezgisel prosedürler geliştirilmiştir. Ele alınan problemde, 48 iş ve 8 işçiden oluşan gerçek hayat problemidir. Algoritmanın amacı, çevrim süresinin ve karesel yük atamanın en küçüklenmesidir. Bu durumda, ele alınan problemin çözümü için çok amaçlı genetik algoritma (ÇAGA) önerilmiştir. Önerilen algoritmaya ait sözde (pseudo) kod, Tablo 3.4'te verilmiştir.

Başlangıçta rassal olarak üretilen popülasyon ($Pop_{başlangıç}$), final popülasyonda en iyi bireyin bulunması umuduyla durdurma koşulu sağlanana kadar, bir dizi evrimsel döngüden geçmektedir. Algoritmanın durdurma koşulu, en büyük uyum değeri (UD_{Enb}) hesaplama olarak dikkate alınmıştır. Uygunluk (amaç) fonksiyonu, aday çözümün kalitesini değerlendirmektedir. Her bir döngüde, turnuva seçim operatörü kullanılarak çift havuzu (Ebeveynler) oluşturulmaktadır.

Tablo 3.4: Önerilen Algoritmanın Sözde (Pseudo) Kodu

Algoritma 1: Önerilen algoritmanın sözde (pseudo) kodu	
Input: $I, J, S, D_i, P_{ij}, R_s, w_1, w_2, Turnuva_{büyüklik}, Coranı, Moranı, UD_{Enb}$	
Output: iş-istasyon-işçi matrisi, $f_1(x), f_2(x), ATY^{Norm}(x)$	
1:	begin
2:	Başlangıç çözümlerini rassal oluştur ($Pop_{başlangıç}$)
2:	Uygunluk değerlerini hesapla ($Pop_{başlangıç}, Eşitlik (3.18)$)
3:	$Pop_{mevcut} \leftarrow Pop_{başlangıç}$
4:	while durduma koşulu sağlanana kadar do
5:	Ebeveynler $\leftarrow$ Turnuva seçim ($Pop_{mevcut}, Turnuva_{büyüklik}$)
6:	Çocuklar $\leftarrow$ WMX (Ebeveynler)
7:	$Pop_{mevcut} \leftarrow$ Swap (Çocuklar)
8:	Uygunluk değerlerini hesapla $\leftarrow$ ($Pop_{mevcut}, Eşitlik (3.18)$)
11:	end while
12:	return Pop_{mevcut} 'taki en iyi birey
13:	end

Turnuva büyüklüğü ($Turnuva_{büyüklik}$), önerilen algoritmada 2 olarak dikkate alınmıştır. Daha sonra, iki çözüm arasındaki gen alış-verişinin sağlandığı çaprazlama operasyonuna maruz kalan ebeveynler ile yeni çözümler (çocuklar) oluşturulmaktadır. Çaprazlama operatörü olarak, *iki noktalı bir ağırlık eşleme çaprazlama operatörü (two-point based weight mapping crossover/WMX)* kullanılmıştır. Oluşan çocuklar, değiş-tokuş (Swap) mutasyon işlemine maruz kalır. Çaprazlama oranı ($Coranı$) ve mutasyon oranı ($Moranı$) için parametre belirleme yöntemlerinden belirlenen değerler kullanılmıştır. Oluşan yeni popülasyonun (Pop_{mevcut}) uygunluk değeri Eşitlik (3.18) kullanılarak hesaplanmaktadır. Durdurma koşulu sağlandıktan sonra mevcut popülasyondaki en iyi birey algoritmanın çıktısını oluşturmaktadır.

En küçük çevrim süresini hesaplamada, doğrusal arama yöntemi (Mutlu ve Polat, 2009), iki bölümlü (bisection) yöntemi (Gao vd., 2009) ve modifiye edilmiş iki bölümlü yöntemi (Mutlu, Polat ve Supciller, 2013) olmak üzere yöntemler mevcuttur. Bu

çalışmada, en küçük çevrim süresi hesabı için Mutlu, Polat ve Supciller (2013)'in önerdikleri modifiye edilmiş iki bölümlü yöntemi kullanılmıştır. En küçük çevrim süresini en hızlı ve verimli bir şekilde bulmak için çalışmalar yapmış ve çalışmalarında 3 yapı denemişlerdir. Mutlu, Polat ve Supciller (2013)'in geliştirmiş olduğu iki bölümlü arama yöntemi kullanılarak bu çalışmada geçici çevrim süresi hesaplanmıştır. Hesaplama işlerinde işçilerin her bir işteki işlem süreleri değiştiği için alt sınır (C_{AS}) ve üst sınır ($C_{ÜS}$) değerleri hesaplanmaktadır. Mutlu, Polat ve Supciller (2013) yapmış oldukları iki bölümlü arama yönteminde alt sınır ve üst sınır toplamının yarısının üst tamsayı alınarak geçici çevrim süresi belirlemişlerdir ve iki bölümlü arama yönteminin hızını artırmak için arama başlangıç noktası beklenen çevrim süresi, C_e ile değiştirilerek iki bölümlü arama yöntemini modifiye etmişlerdir. Fakat literatürde olan çalışmalardan farklı olarak ele alınan problemde iş istasyonu bazlı yürüme süreleri farklılık gösterdiği için ve dengeli bir dağılım yapılabilmesi amacıyla bu yöntem istasyon bazlı yürüme süreleri de eklenerek iki bölümlü arama yöntemi değiştirilmiş ve geçici çevrim süresi hesaplatılmıştır.

Alt sınır (C_{AS}) Eşitlik (3.13) ve üst sınır ($C_{ÜS}$) Eşitlik (3.14) de verildiği gibi hesaplanır (Scholl, 1996):

$$C_{AS} = enb \left\{ \left(\frac{1}{S} \sum_{i \in I} enk(P_{ij}), \quad \forall j \in J \right), enk(P_{ij}), \quad \forall j \in J \vee \forall i \in I \right\} \quad (3.13)$$

$$C_{ÜS} = enb \left\{ \left(\frac{1}{S} \sum_{i \in I} enb(P_{ij}), \quad \forall j \in J \right), enb(P_{ij}), \quad \forall j \in J \vee \forall i \in I \right\} \quad (3.14)$$

Geçici çevrim süresini hesaplatmak için değiştirilmiş iki bölümlü arama yöntemi Eşitlik (3.15) -(3.16) olduğu gibi hesaplanır:

$$C_m = \frac{1}{S} \sum_{i \in I} ort(P_{ij}), \quad \forall j \in J \quad (3.15)$$

$$C_e = \frac{1}{6} (C_{AS} + 4 \times C_m + C_{ÜS}) + ort(R_s) \quad (3.16)$$

3.3.1. Kromozom Gösterimi

Genetik algoritmada başlangıç kromozomunun doğru tanımlanması elde edilen sonuçların uygunluğu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu için ilk aşamada doğru tanımlanması gerekmektedir (Diaz-Gomez ve Hougen, 2007). Başlangıç kromozomu, rassal olarak 1 ile iş sayısı (N) arasında üretilmiştir. Şekil 3.6.'da örnek bir temsil verilmiştir. Bu temsile göre, her işe bir öncelik verilmektedir ve işler verilen öncelik

numaralarına göre istasyonlara atanmaktadır. İstasyonlara iş ataması yapılırken ilk olarak yüksek önceliğe sahip olan işlerden atama yapılmaktadır. İşler atama yapılırken aşağıdaki iki kısıt dikkate alınmalıdır:

- Görevler arasındaki öncelik
- Çevrim süresini aşmama

Şekil 3.6: Örnek Başlangıç Kromozomu

İş No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
İş Önceliği	8	10	7	5	2	6	11	3	9	1	4

İşçilerin de iş istasyonlarına atama işlemi yapılmaktadır. Gösterimde verilen işçi no'ları sırasıyla iş istasyonlarına atanmaktadır. Şekil 3.7'de örnek temsili verilmiştir.

Şekil 3.7: Örnek İşçi Ataması

İstasyon No	1	2	3
İşçi No	2	3	1

Önerilen GA'da, belirlenen iş öncelik değerleri, başlangıç kromozomu ve işçi atama sonuçlarına göre işler arasındaki öncelik diyagramı göz önünde bulundurularak iş ataması yapılır. İşçinin çalışmaya başlayabilmesi için set askısından kablo demetlerini getirmesi gerekmektedir. İlk istasyona tanımlı olan kablo alma süresi eklenir ve atanmış işçinin işleri yapabilme durumu ve iş süresi dikkate alınarak ilgili istasyona işler atanmaya başlanır. İş atamaları yapılırken öncelik durumuna göre birden fazla iş seçilme ihtimali varsa eğer algoritma tarafından başlangıçta atanmış öncelik numarası en büyük olan iş seçilmektedir. Belirlenen çevrim süresine gelene kadar ilk iş istasyonuna işler atanmaya devam eder. Çözüm için önerilen algoritmada optimum atama işlemini yapabilmek için atama yapılan iş istasyonunun sadece son işinde öncelik numarası göz ardı edilip atanabilecek başka iş var ise eğer ataması yapılmaktadır. İlk istasyona atanabilecek işler bittikten sonra diğer iş istasyonuna geçilir ve yukarıda tanımlanan işlemler tekrar edilir.

3.3.2. Uyum Fonksiyonu

Önerilen algoritmada en iyi çözümü bulabilmek için mevcut popülasyondaki her bireyin uygunluğunun değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışma MHİAD Tip-2 problemidir. Problemde uyum fonksiyonu olarak ζS (çevrim süresi) enküçüklenmesi ve montaj hattının dengeli olmasını sağlamak amacıyla en küçük karesel yük atama fonksiyonu ele alınmıştır.

Belirlenen çevrim süresine göre işler istasyona atanırken her görevin yapılması gerektiği için kalan tüm işler öncelik sıralamasına göre son istasyona atanmaktadır. Son istasyonda çevrim süresi kısıtı göz önünde bulundurmadan atama işlemi yapıldığı için bu uygun bir çözüm oluşmayabilir. Uygun olmayan bu çözümleri yönetmek için Mutlu, Polat ve Supciller (2013) çalışmalarında uygulanabilirliği herhangi bir şekilde ihlal eden çözümlere sabit bir ceza uygulamışlardır. Burada amaç, en iyi çevrim süresi (ζS_{eniyi})'ni bulmaya çalışmaktır. Eğer ulaşılan çözüm uygun değil ise uyum fonksiyonu Eşitlik (3.17) ile cezalandırılmaktadır.

$$\text{Uyum Fonksiyonu} = \zeta S_{eniyi}^2 \times Fark \quad (3.17)$$

Eşitlik (3.17)'de kullanılan $Fark$, son istasyonun çevrim süresinin belirlenen çevrim süresini aştığı miktar olarak hesaplanmaktadır.

3.3.3. Turnuva Seçim Yöntemi

Turnuva seçiminde, popülasyondan rastgele bir grup birey seçilerek uygunluk değeri en yüksek olan birey, bir sonraki nesil popülasyonunun ebeveyni olmak üzere seçilmiştir. Bu çalışmada, turnuva büyüklüğü 2 olarak ele alınmıştır.

3.3.4. Genetik Operatörler

Her nesilde, seçim yöntemi, popülasyonda genetik çeşitliliği sağlamak için çaprazlama ve mutasyon operatörleri uygulanmaktadır. Önerilen genetik algoritmada çaprazlama operatörü olarak *iki noktalı bir ağırlık eşleme çaprazlama operatörü (two-point based weight mapping crossover/WMX)* uygulanmıştır. Kullanılan algoritmada permütasyon vektörü ile gösteriliyorsa bu çaprazlama yönteminin başarılı olduğu kanıtlamıştır (Hwang ve Katayama, 2010). Uygulanan çaprazlama yöntemi 4 adımdan oluşmaktadır. İlk olarak iki ebeveynden rastgele alt vektör seçilir ve seçilen alt vektördeki işler için iş önceliğine göre sıralama yapılır. Çaprazlama, elde edilen yeni iş sıralamaları

için belirlenmiş olan çaprazlama oranı kullanılarak ebeveynler arasında gerçekleştirilir. Yeni oluşturulmuş olan iş önceliklerine göre çocuklar ortaya çıkar. Uygulanan çaprazlama yönteminin dört ana adımı Şekil 3.8’de gösterilmiştir (Fathi, vd. 2019).

Şekil 3.8: Çaprazlama Operatörünün Gösterimi

Adım 1: İki ebeveyn üzerinde rastgele bir alt vektör seçilmesi

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	İş No
Ebeveyn 1:	8	10	7	5	2	6	11	3	9	1	4	İş Önceliği
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Ebeveyn 2:	11	1	9	10	6	3	8	7	5	2	4	

Adım 2: İşlerin önceliklerine göre sıralanması

4	5	6	7	İş no
3	4	2	1	İş önceliğine göre sıralanması
5	2	6	11	İş önceliği
1	3	4	2	İş önceliğine göre sıralanması
10	6	3	8	İş önceliği

Adım 3: Öncelik numaralarının iki ebeveyn arasında yer değiştirmesi

4	5	6	7		4	5	6	7
3	4	2	1		1	3	4	2
5	2	6	11		11	5	2	6
1	3	4	2		3	4	2	1
10	6	3	8		6	3	8	10

Şekil 3.8: (Devamı) Çaprazlama Operatörünün Gösterimi

Adım 4: Yeni eşlenen iş önceliklerine göre çocukların oluşturulması

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Çocuk 1:	8	10	7	5	2	6	11	3	9	1	4
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Çocuk 2:	11	1	9	10	6	3	8	7	5	2	4

Önerilen genetik algoritmada çeşitliliği sağlamak için değiş-tokuş (Swap) mutasyon operatörü uygulanmıştır. Uygulanan mutasyon operatöründe rastgele seçilen birey üzerinden iki farklı nokta seçilir. Seçilen 2 noktada bulunan genler için birbiri ile takas işlemi uygulanır.

Şekil 3.9: Mutasyon Operatörünün Gösterimi

İş no	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
İş önceliği	8	10	7	11	5	2	6	3	9	1	4
İş no	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
İş önceliği	8	9	7	11	5	2	6	3	10	1	4

3.3.5. Genetik Algoritmalarla Parametre Seçimi

Genetik algoritmaların en iyi çözüme ulaşmasında en önemli etkilere biri parametre seçimidir. Parametre seçimi algoritmanın performansını etkilemektedir. Parametreler algoritmanın başında probleme göre belirlenmektedir. Belirlenmesi gereken bu parametreler: popülasyon büyüklüğü, çaprazlama oranı, mutasyon oranıdır.

Tez çalışmasında önerilen genetik algoritma yönteminin parametreleri, **irace** ve tam faktöriyel deney tasarımı yöntemi ile belirlenmiş ve her birinden elde edilen uygun parametreler kullanılarak ele alınan gerçek-hayat problemi çözülmüştür. Algoritma, C# 2022 program dili kullanılarak 2.1 GHz Core i7 CPU and 8.00 GB RAM özellikli dizüstü bilgisayarda kodlanmıştır. Ele alınan problemin amaç ağırlıkları $w_1=0,5$ (çevrim süresi amaç ağırlığı) ve $w_2=0,5$ (karesel yük atama amaç ağırlığı) olacak şekilde algoritma çözdürülmüştür. Amaç değerleri arasında farklı büyüklüklerde değerler olduğundan, ilgili amaç fonksiyonu nadir değere bölünerek bu amaç değerlerinin normalleştirilmesi

gerekmektedir (Marler ve Arora, 2005). Nadir değer, amaç değerleri arasındaki en büyük (en küçükleme problemleri için) değerlerdir. Çevrim süresi amaç değerine ait nadir değeri elde etmek için, algoritmanın amaç ağırlıkları $w_1=1$ ($w_2=0$) olacak şekilde 31 kez çalıştırılırken, karesel yük atama amaç değerine ait nadir değeri bulmak için ise algoritmanın amaç ağırlıkları $w_1=0$ ($w_2=1$) olacak şekilde 31 kez çalıştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda her bir amaç için belirlenen en büyük değer ilgili amacın nadir değerini oluşturmaktadır. N_t , t . amaç fonksiyonunun nadir değerini temsil etmektedir. ATY tarafından skalerleştirilen uyum fonksiyonu Eşitlik (3.18)'de verildiği gibi normalleştirilmiştir.

$$enk\ ATY^{Norm}(x) = \left[w_1 \times \frac{CS}{N_1} \right] + \left[w_2 \times \frac{\sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \left(\sum_{i \in I} \left((P_{ij} \times X_{sij}) + R_s \right)^2 \right)}{N_2} \right] \quad (3.18)$$

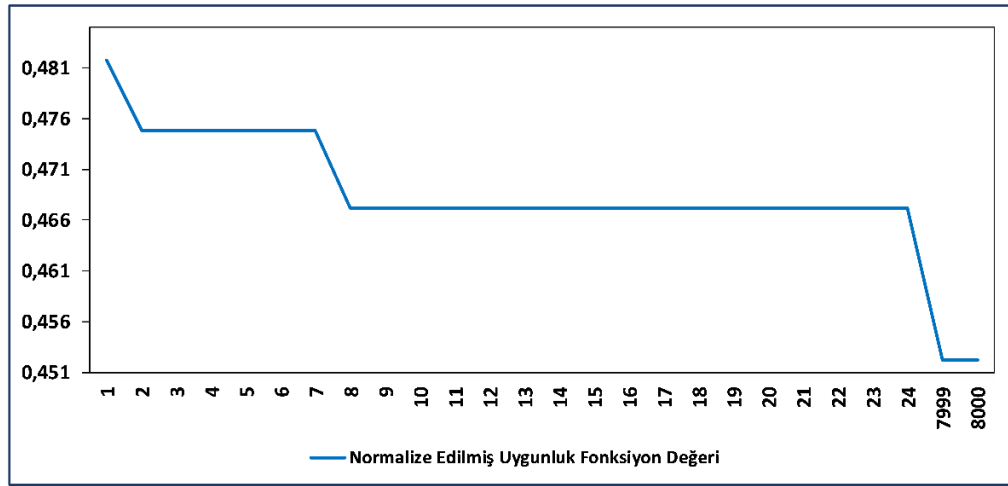
Ayrıca elde edilen sonuçlar, Mutlu, Polat ve Supciller (2013)'in çalışmalarında genetik algoritma için önerdikleri parametrelerle de çalıştırılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

irace için her bir genetik operatör (popülasyon büyüklüğü, çaprazlama oranı ve mutasyon oranı) için kullanılan parametre aralıkları Tablo 3.5'te verilmiştir. Bu parametre aralıkları kullanılarak algoritma $w_1=0,5$ ve $w_2=0,5$ için çalıştırılmış ve program normalleştirilmiş uyum değerlerini dikkate alarak en iyi algoritma konfigürasyonunu sunmuştur. Algoritmanın durdurma koşulu, en büyük uyum değeri (UD_{Enb}) hesaplama olarak dikkate alınmıştır. Bu değer, iş sayısının sabit bir sayı ile çarpılmasıyla elde edilmiştir. Bu sabit sayı, Şekil 3.10'daki yakınsama grafiğinde görüldüğü gibi çeşitli denemeler sonucunda 10000 olarak dikkate alınmıştır. Turnuva büyüklüğü ise 2 olarak ele alınmıştır. Adil bir karşılaştırma olması açısından, sabit sayı ve turnuva büyüklüğü bu değerler deney tasarımında da benzer kullanılmıştır.

Tablo 3.5: irace'de Kullanılan Parametre Aralıkları ve Elde Edilen En İyi Parametre Değerleri

	Parametre Değerleri	Seçilen Parametre ($w_1=0,5$; $w_2=0,5$)
Popülasyon büyüklüğü	$U \sim [20 ; 200]$	35
Çaprazlama oranı	$U \sim [0,7 ; 1]$	0,87
Mutasyon oranı	$U \sim [0,05 ; 0,4]$	0,06

Şekil 3.10: $w_1=0,5$ ve $w_2=0,5$ Amaç Ağırlıkları İçin Yakınsama Grafiği



Genetik operatörlerin uygun parametre değerlerinin belirlenmesi amacıyla tam faktöriyel deney tasarımı uygulanmıştır. Buna göre ele alınan operatörlere ait düzeyler Tablo 3.6’te verilmiştir.

Tablo 3.6: Faktör ve Faktörlerin Düzeyleri

Faktörler	Düzeyler		
	Düzey 1	Düzey 2	Düzey 3
Popülasyon büyüklüğü	20	60	100
Çaprazlama oranı	0,7	0,85	1
Mutasyon oranı	0,05	0,1	0,4

Belirlenen her faktör düzeyi için önerilen ÇAGA yaklaşımı **irace**’de dikkate alınan benzer durdurma koşulu ve turnuva büyüklüğü altında Minitab 21 yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Ele alınan deney modelinde 3 faktör ve her bir faktörün 3 düzeyi bulunmaktadır. Bu durumda, $w_1=0,5$ ve $w_2=0,5$ amaç ağırlıkları için ele alınan tam faktöriyel deney tasarımında $3 \times 3 \times 3 = 27$ farklı kombinasyonlarda deney yapılması gerekmektedir. Her bir deney 31 kez çalıştırıldığından toplamda $27 \times 31 = 837$ deney yapılmıştır. Buna göre kritik olan parametre ve etkileşimleri belirlemek için varyans analizi (ANOVA) gerçekleştirilmiştir. Varyans analizinde ana etki, bir faktörün tepki üzerindeki etkisinin derecesini gösteren bir değerdir. Ana etki grafiği, faktörlerin düzey

ortalamları arasındaki farkı incelemek için kullanılmaktadır (Ross, 1988). Şekil 3.11'deki analiz sonuçlarına göre, popülasyon büyüklüğüne, çaprazlama oranına ve mutasyon oranına ait p değerleri, % 95 güven aralığında 0,05'in altındadır. Bu nedenle, bu faktörler ortalama normalize edilmiş sonuçları enküçüklemeye kritik faktörler olarak seçilmiştir.

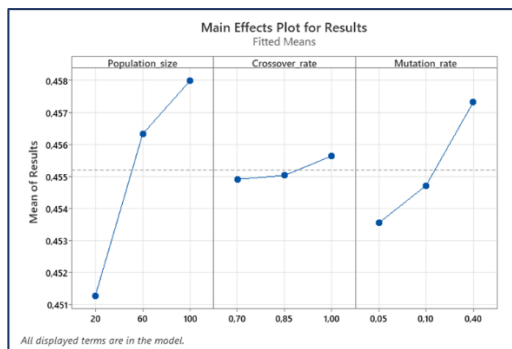
Şekil 3.11: GA Parametreleri İçin Varyans Analizi Sonuç Tablosu

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	10	0,000307	0,000031	111,86	0,000
Linear	6	0,000289	0,000048	175,71	0,000
Population_size	2	0,000220	0,000110	400,72	0,000
Crossover_rate	2	0,000003	0,000001	5,01	0,020
Mutation_rate	2	0,000067	0,000033	121,40	0,000
2-Way Interactions	4	0,000018	0,000004	16,08	0,000
Population_size*Mutation_rate	4	0,000018	0,000004	16,08	0,000
Error	16	0,000004	0,000000		
Total	26	0,000311			

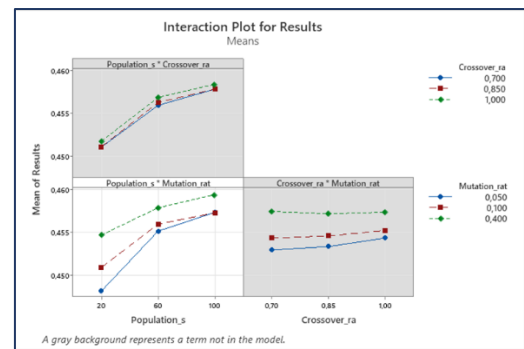
Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0005239	98,59%	97,71%	95,98%

Ana etki grafiği incelendiğinde kritik faktörlerin düzeyleri belirlenmektedir. Oluşan deney sayısı, Şekil 3.12. (a)-(b), için elde edilen ana etkiler grafiği ve bileşik etkiler grafiği görülmektedir.

Şekil 3.12: 31 Çalıştırılma Sonucu $w_1=0,5$ ve $w_2=0,5$ Amaç Ağırlıklarından Elde Edilen Ortalama Sonuçlar İçin A) Ana Etkiler Grafiği B) Bileşik Etki Grafiği



a) Ortalama sonuçlar için ana etkiler grafiği



b) Ortalama sonuçlar için bileşik etki grafiği

Şekil 3.12'deki ana ve bileşik etkiler grafiklerine göre kritik faktörlerin düzeyleri belirlenmiştir. Buna göre, popülasyon büyüklüğü, çaprazlama oranı ve mutasyon oranı kritik faktörleri için en iyi değerler sırasıyla, 20 (Düzyey 1), 0,7 (Düzyey 1) ve 0,05 (Düzyey 1) olarak belirlenmiştir.

Mutlu, Polat ve Supciller (2013), çalışmalarında MHİAD Tip-2 problemi üzerine çalışmışlardır. Çevrim süresini en küçüklemeye çalıştıkları problemin çözümü için Yinelemeli Genetik Algoritma (YGA) önermişlerdir. Önerdikleri YGA yaklaşımının parametrenin performansı, bir dizi ön test ile belirlemiştir. Buna göre, popülasyon büyüklüğü, iş sayısının 10 ile çarpılması ile edilmiş, çaprazlama oranı, 0,9 olarak hesaplanmış ve mutasyon oranı ise 0,1 olarak ele alınmıştır. Bu çalışmada, ele alınan gerçek-hayat probleminde aynı parametreler kullanılarak önerilen algoritma çalıştırılmış ve sonuçlar elde edilmiştir.

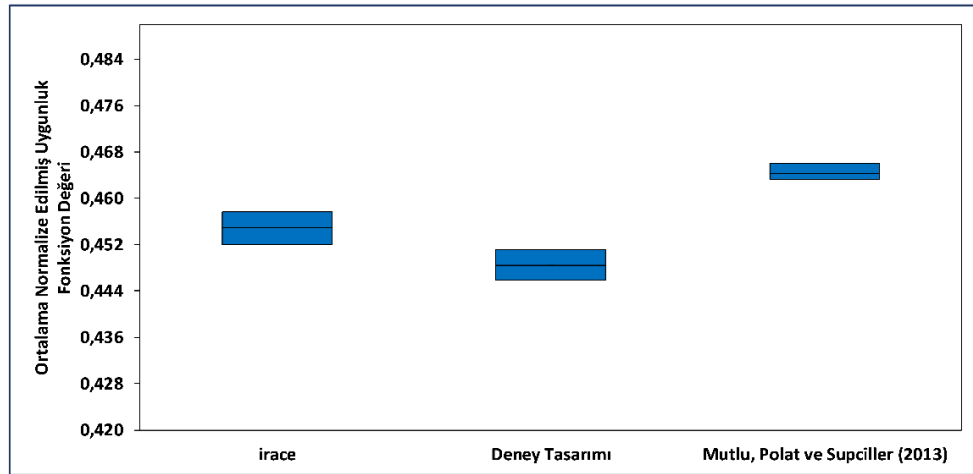
MHİAD Tip-2 çalışmasının uygulandığı işletme, işlerin işçilere ve istasyonlara atanmasında mevcut durumda Excel programı üzerinden manuel olarak yapılmaktadır. Bu durum, yanlış iş atamalarına, öncelik diyagramının dikkate alınamamasına ve her zaman en uygun şekilde çevrim süresinin belirlenememesine yol açarken, bu işlem oldukça zaman almaktadır. Özellikle, bu işlemi (işlerin işçilere ve istasyonlara atanması işlemi) yapacak bir teknisyen işe yeni başladıysa, iş parçalarının önceliklerini anlaması, iş ve işçi atamalarını öğrenme eğrisi uzun sürebilmektedir. Ayrıca, hat içerisine yanlış verilen bir dağılım montaj hattını durdurmakta, üretim adetlerinin ve verimliliğin düşmesine de sebep olabilmektedir.

3.3.6. Karşılaştırmalı Analiz

Bu bölümde, $w_1=0,5$ ve $w_2=0,5$ amaç ağırlıkları için tam faktöriyel deney tasarımından elde edilen uygun parametreler, **irace**'den elde edilen uygun parametre değerleri ve Mutlu, Polat ve Supciller (2013)'in parametreleri kullanılarak önerilen algoritmanın 31 kez tekrarlanmasından sonra elde edilen ortalama normalize edilmiş uygunluk değerleri karşılaştırılmıştır. Önerilen algoritma, belirlenen parametre değerleri ile 31 kez çalıştırılmıştır. Her bir parametre belirleme yönteminden elde edilen sonuçlara ait kutu grafiği Şekil 3.13'te verilmiştir. Kutu grafiğinden de görüleceği üzere, deney tasarımı ile elde edilen ortalama normalize edilmiş uygunluk değerleri, diğerlerinden daha iyi sonuç vermiştir. **irace**'den elde edilen sonuçlar ise, Mutlu, Polat ve Supciller (2013)'in parametrelerinden elde edilen sonuçlardan daha iyi sonuç vermiştir.

Ek olarak, 31 tekrarın içindeki en iyi (best) sonuca ait işçi atamaları, iş atamaları ve istasyon süreleri Tablo 3.7’de verilmiştir. Buna göre, 1. iş istasyonuna tam faktöriyel deney tasarımı kullanıldığında İşçi-7 atanırken, **irace** kullanıldığında İşçi-6 atanmaktadır. Mutlu, Polat ve Supciller (2013) çalışması kullanıldığında, İşçi-6 atanırken mevcut durumda İşçi-1 atanmaktadır. Bu durumda, İşçi-7, İşçi-6, İşçi-3 ve İşçi-1’e atanan işlerin süresi sırasıyla 159.0, 174.3, 147.3, 175.3’tür. Diğer, istasyonlara atamalar benzer şekilde yapılmıştır.

Şekil 3.13: Üç Farklı Parametre Belirleme Yöntemi İçin Ağırlıklı-Toplam Skalerleştirme Yöntemine Dayanan GA’nın 31 Çalıştırmasından Elde Edilen Ortalama Normalize Edilmiş Uygunluk Değerlerine Ait Kutu Grafikleri



Tablo 3.7: $w_1=0,5$ ve $w_2=0,5$ Amaç Ağırlıkları için Kullanılan Parametre Yöntemlerinden Elde Edilen Sonuçların ve Mevcut Durumun Karşılaştırılması

	Parametre Yöntemi	Atanan İşçi No	Atanan İş Kümesi								İş İstasyonu Süresi
1.İstasyon	Tam Faktöriyel Deney Tasarımı	İşçi-7	30	4	33	11	13	34	1	37	159,0
	Mutlu, Polat ve Supciller (2013)	İşçi -6	13	4	7	8	30	33	35	38	174,3
	irace	İşçi-3	38	11	4	7	37				147,3
	Mevcut Durum	İşçi-1	1	2	3	4	5	6	7	30	175,3
2.İstasyon	Tam Faktöriyel Deney Tasarımı	İşçi -6	38	42	43	44	45	35	5		177,2
	Mutlu, Polat ve Supciller (2013)	İşçi -7	42	43	11	34	1	37			178,1
	irace	İşçi-7	8	42	1	30	33	34	31	13	178,5
	Mevcut Durum	İşçi-2	8	9	10	31	33	35	37		163,5

Tablo 3.7: (Devamı) $w_1=0,5$ ve $w_2=0,5$ Amaç Ağırlıkları için Kullanılan Parametre Yöntemlerinden Elde Edilen Sonuçların ve Mevcut Durumun Karşılaştırılması

	Parametre Yöntemi	Atanan İşçi No	Atanan İş Kümesi								İş İstasyonu Süresi
3.İstasyon	Tam Faktöriyel Deney Tasarımı	İşçi -5	12	14	22	23	24	47		174,4	
	Mutlu, Polat ve Supciller (2013)	İşçi -8	39	22	23	24	40			175,7	
	irace	İşçi-6	32	35	36	22	27	28		173,6	
	Mevcut Durum	İşçi-3	11	12	13	14	15	16	18	19	22
4.İstasyon	Tam Faktöriyel Deney Tasarımı	İşçi -4	25	7	8	46	2	3	15		178,8
	Mutlu, Polat ve Supciller (2013)	İşçi -3	41	25	44						139,2
	irace	İşçi-4	29	23	24	25	9	43			179,0
	Mevcut Durum	İşçi-4	17	20	23						169,9
5.İstasyon	Tam Faktöriyel Deney Tasarımı	İşçi -2	31	18	26	27	28	29	16	19	150,6
	Mutlu, Polat ve Supciller (2013)	İşçi -2	45	47	46	26	48	2	31	5	175,6
	irace	İşçi-5	44	45	47	46	10	12			154,7
	Mevcut Durum	İşçi-5	21	24	27	25					182,2
6.İstasyon	Tam Faktöriyel Deney Tasarımı	İşçi -3	21	39	40	41					177,3
	Mutlu, Polat ve Supciller (2013)	İşçi -5	32	36	6	27	28	29	12		178,3
	irace	İşçi-2	14	15	18	19	21	26	5	16	170,3
	Mevcut Durum	İşçi-6	2	34	28	29	38	36			177,6
7.İstasyon	Tam Faktöriyel Deney Tasarımı	İşçi -1	17	20	9	48					162,1
	Mutlu, Polat ve Supciller (2013)	İşçi -4	14	15	16	19	21	18	17	9	174,4
	irace	İşçi-8	17	6	20	2					170,2
	Mevcut Durum	İşçi-7	26	39	42	43					182,9
8.İstasyon	Tam Faktöriyel Deney Tasarımı	İşçi -8	6	10	32	36					135,8
	Mutlu, Polat ve Supciller (2013)	İşçi -1	3	10	20						140,5
	irace	İşçi-1	3	39	40	41	48				156,4
	Mevcut Durum	İşçi-8	40	41	44	45	45	47	48		174,7

Tablo 3.8’de kullanılan parametre belirleme yöntemlerine ve mevcut duruma göre elde edilen amaç değerleri verilmektedir. Buna göre, $w_1=0,5$ ve $w_2=0,5$ amaç ağırlıkları için en iyi çevrim süresi amaç değeri, 178,3 saniye ile Mutlu, Polat ve Supciller (2013)’in parametreleri kullanılarak elde edilirken, en iyi karesel yük atama amaç değeri ise, 217899,34 tam faktöriyel deney tasarımı parametre belirleme ile elde edilmiştir. Mevcut durumda elde edilen çevrim süresi ve karesel yük atama amaç değerleri önerilen algoritma ile elde edilenlerden daha kötü çıkmıştır. Mevcut durumda, ortalama 2 yıl çalışan bir teknisyenin, iş ve işçi atama işlemi ortalama 46 dakika sürerken, önerilen algoritma ile daha iyi sonuçlara ortalama, 130 saniyede ulaşılmaktadır.

Tablo 3.8: Ele Alınan Parametre Belirleme Yöntemleri ve Mevcut Duruma Göre Elde Edilen Amaç Değerlerinin Karşılaştırılması

	Çevrim Süresi	Karesel Yük Atama
Tam Faktöriyel Deney Tasarımı	178,8	217899,34
Mutlu, Polat ve Supciller (2013)	178,3	225129,09
irace	179,0	222100,68
Mevcut Durum	182,9	245959,40

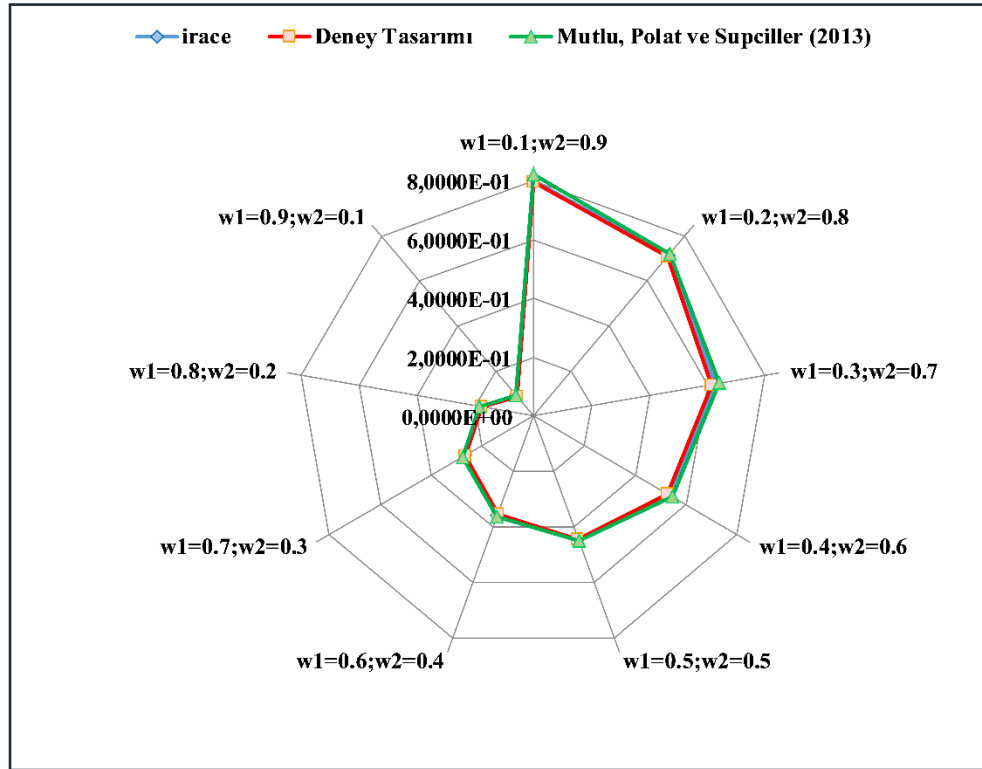
3.3.7. Duyarlılık Analizi

Duyarlılık analizi, bir karar vericinin sonucunu kontrol etmek, ilgili riskleri görmek ve parametrelerin değerlerini analiz etmek için uygulanmaktadır (Tinç, 2007). Bir modelin girdi faktörlerinin, modelin çıktılarındaki varyasyonlar üzerindeki etkisinin belirlenmesini içermektedir. Buna göre, kurulan model veya sistemde kullanılan girdi değişkenlerinin performans üzerinde hangi verinin daha fazla veya daha az etkiye sahip olduğunu teşhis etmek için bir duyarlılık analizi uygulamak faydalı bir yöntemdir (Kermanshachi ve Rouhanizadeh, 2019). Tinç (2007), çalışmasında amaç fonksiyonu ağırlıklarını değişime duyarlı olması nedeniyle duyarlılık analizi yapılması çalışmada önemli bir yere sahip olduğunu ifade etmiştir.

Bu çalışmada, parametre belirleme yöntemlerinin farklı amaç ağırlıkları ile çalıştırıldığı zaman sonuç üzerine etkisi incelenmiştir. Buna göre, Şekil 3.14’te görüldüğü gibi, deney tasarımı parametre belirleme yöntemi $w_1=0,7$ ve $w_2=0,3$ amaç ağırlıkları

haricinde diğer amaç ağırlıkları için daha iyi sonuç verirken, Mutlu, Polat ve Supciller (2013)'in parametreleri ile daha kötü performans sağlamıştır. $w_1=0,7$ ve $w_2=0,3$ amaç ağırlıkları için de **irace** parametre belirleme yöntemi ile elde edilen sonuç daha iyi çıkmıştır.

Şekil 3.14: Farklı Amaç Ağırlıkları İçin Parametre Belirleme Yöntemlerinin Karşılaştırma Grafiği



SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Endüstrileşmenin önem kazanmasıyla birlikte işletmeler ellerinde olan kısıtları en verimli bir şekilde kullanmaya çalışmaktadırlar. Kaynakları etkin bir şekilde kullanabilmek, maliyetleri en aza indirmek, üretim adetlerini ve üretim verimi arttırmak işletmeler açısından oldukça önemli bir yere sahip olmuştur. Bu sebeple ortaya montaj hatları ve beraberinde bu hatların dengelenmesi çalışmaları ortaya çıkmıştır.

Hat dengeleme yapılırken işçilerin özellikleri ve performanslarının farklı olduklarının göz ardı edilmemesi gerekmektedir. Her işçinin aynı görev için farklı kabiliyette olduğu kabul edilmiş ve hat dengeleme çalışması yapılırken işçi atamalarının da yapılması gerektiğine karar verilmiştir.

Bu çalışmada, çok amaçlı montaj hattı işçi atama ve dengeleme problemi ele alınmıştır. Ele alınan algoritmanın amacı, görevler arası öncelik diyagramları, işçi bazlı görev süreleri ve işçilerin yürüme sürelerini dikkate alarak çevrim süresini ve iş istasyonuna atanacak işlerin dengeli dağıtılmasını hedefleyen karesel yük atamasını enküçükleme. Önerilen çok amaçlı algoritma, kablo donanım üretimi yapan bir otomotiv yan sanayisinde gerçek-hayat problemi üzerinde uygulanmıştır. İşletmedeki montajı yapılacak ürün, 48 işten oluşan bir aracın tavan tesisat donanımına aittir ve 8 işçi bu işlem için görevlendirilmiştir. Problemin çok amaçlı olması ve Np-zor yapısı nedeniyle, problemin çözümü için Çok Amaçlı Genetik Algoritma yaklaşımı (ÇAGA) önerilmiştir. Algoritmada kullanılan parametre değerleri sonuca doğrudan etki sağladığı için uygun değerlerin kullanılması büyük öneme sahiptir. Önerilen ÇAGA'nın parametre ve kalibrasyonunun belirlenmesi için tam faktöriyel deney tasarımı ve otomatik parametre belirleme yöntemlerinden biri olan **irace** ile $w_1=0,5$ ve $w_2=0,5$ amaç ağırlıkları için ele alınan operatörlerin parametreleri belirlenmiştir. Bulunan uygun parametre değerleri ile ele alınan problem önerilen ÇAGA ile çözülmüştür. Ek olarak, Mutlu, Polat ve Supciller (2013)'in kullandıkları parametreler ile ele alınan problem çözülmüş ve elde edilen sonuçlar birbiriyle ve mevcut durumla karşılaştırılmıştır. Deney tasarımının diğerlerine göre daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, farklı amaç ağırlıkları kullanılarak da parametre belirleme yöntemlerinin durumları duyarlık analizi ile test edilmiştir. Buna göre, farklı amaç ağırlıklarında da deney tasarımının çoğunlukla diğerlerine göre daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Önerilen algoritma ile mevcut durumda işlerin ve işçilerin istasyonlara atanmasında oluşabilecek hataların ve istasyonlardaki yük dengesizliğinin önüne geçilmeye çalışılmıştır.

Gelecek çalışmalarda, her içinin her işte kabiliyeti olmadığı dikkate alınarak önerilen algoritma çözdürülebilir. Önerilen algoritmanın performansı, literatürde bulunan kıyaslama problemleriyle test edilerek sonuçlar karşılaştırılabilir. Ele alınan probleme farklı amaç fonksiyonları eklenerek genişletilebilir. Ayrıca, MHİAD Tip-2 probleminde ergonomik risk faktörleri de eklenebilir. Önerilen algoritmanın, ele alınan işletmede çalışanların kullanabileceği kullanıcı dostu ara yüze sahip bir karar destek sistemi tasarlanabilir.



KAYNAKÇA

- Acar, N., ve Eştaş, S. (1991). *Kesikli seri üretim sistemlerinde planlama ve kontrol çalışmaları* (3. baskı). Ankara: Milli Prodaktivite Yayınları.
- Akpınar, S., & Bayhan, G.M. (2011). A hybrid genetic algorithm for mixed model assembly line balancing problem with parallel workstations and zoning constraints. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 24(3), 449-457.
- Altunay, H., Özmutlu, H.C., ve Özmutlu, S. (2017). Paralel görev atamalı montaj hattı dengeleme problemi için yeni bir matematiksel model önerisi. *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 18(1), 15-33.
- Anagün, M. (2002). *Kalite kontrol excel destekli* (1. Baskı). İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Andres, C., Miralles C., & Pastor, R. (2008). Balancing and scheduling tasks in assembly lines with sequence-dependent setup times. *European Journal of Operational Research*, 187 (3), 1212–1223.
- Araújo, F. F., Costa, A. M., & Miralles, C. (2015). Balancing parallel assembly lines with disabled workers. *European Journal of Industrial Engineering*, 9(3), 344-365.
- Arıkan, M. (2017). İş yükü dengelemeli ikinci tip basit montaj hattı dengeleme problemi için bir tabu arama algoritması. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32(4), 1169-1179.
- Aryanezhad, M.B., Deljoo, V., & Mirzapour Al-e-hashem S.M.J. (2009). Dynamic cell formation and the worker assignment problem: a new model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41(3), 329-342.
- Bean, J.C. (1994). Genetic algorithms and random keys for sequencing and optimization. *ORSA J. Comput*, 6(2), 154–160.
- 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.
- Blum, C., & Miralles, C. (2011). On solving the assembly line worker assignment and balancing problem via beam search. *Computers & Operations Research*, 38(1), 328-339.

- Borba, L., & Ritt, M. (2014). A heuristic and a branch-and-bound algorithm for the assembly line worker assignment and balancing problem. *Computers & Operations Research*, 45, 87-96.
- Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl, A. (2006). A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research*, 183(2), 674-693.
- Bozkurt, K.E. (2021). *Parametre konfigürasyon araçlarının bir yapay arı kolonisi çatısı üzerinden karşılaştırılması* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kütahya.
- Box, G. E. P., & Draper, N. R. (2007). *Response Surfaces, Mixtures and Ridge Analysis* (2nd ed.). India: CBS Publishers.
- Cáceres, L.P., vd. (2017, June). *An experimental study of adaptive capping in irace*. In Learning and Intelligent Optimization- 11th International Conference, Russia.
- Campana, N.P., Lori, M., & Moreira, C.O. (2021). Mathematical models and heuristic methods for the assembly line balancing problem with hierarchical worker assignment. *International Journal of Production Research*, 60(7), 2193-2211.
- Çengil, M.F. (2018). *Heuristic approaches for assembly line balancing and competent worker assignment problem (ALWABP)* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Özyeğin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Carr, J. (2014). An introduction to genetic algorithm. *Journal of Computer and Communications*, 4(7), 1-40.
- Carlson, J. G. (1962). Production standarts for small lot manufacturing. *Journal of Industrial Engineering*, 13(3), 496-502.
- Çerçioğlu, H. (2009). *Stokastik paralel MHD problemi için yeni modeller* (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Cevikcan, E., Durmusoglu, M. B., ve Unal, M. E. (2009). A team-oriented design methodology for mixed model assembly systems. *Computers & Industrial Engineering*, 56, 576-599.

- Chaves, A. A., Lorena, L.A.N., & Cristóbal, M. (2007). *Clustering search approach for the assembly line worker assignment and balancing problem*. Paper presented at the Proceedings of the 37th International Conference on Computers and Industrial Engineering, Alexandria, Egypt.
- Cristóbal, M. vd. (2008). Branch and bound procedures for solving the assembly line worker assignment and balancing problem: application to sheltered work centers for disabled. *Discrete Applied Mathematic*, 156, 352–67.
- Delice, Y., vd. (2018). An ant colony optimisation algorithm for balancing two-sided U-type assembly lines with sequence-dependent set-up times. *Computer Science*, 43(12), 199-214.
- Diaz-Gomez, P. A., & Hougen, D.F. (2007, June 25-28). *Initial population for genetic algorithms: A metric approach*. International Conference on Genetic and Evolutionary Methods, Las Vegas, Nevada.
- Doğan, A., ve Sakallı, Ü.M. (2016). Bulanık işlem zamanlı geleneksel montaj hattı dengeleme problemi için yeni bir yaklaşım: Savunma sanayii uygulaması. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 8(1), 31-50.
- Elmas, Ç. (2007). *Yapay Zekâ Uygulamaları* (1. baskı). Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- Erkut, H., ve Başkak, M. (1997). *Tesis Tasarımı: Stratejiden Uygulamaya* (2. baskı). İstanbul: İrfan Yayıncılık.
- Erten, K. (2021). *Darboğaz genelleştirilmiş atama problemi için bir çözüm yaklaşımı* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Falkenauer, E. (2005). *Line balancing in the real world*. Proceedings Of The International Conference On Product Lifecycle Management PLM 05, Lumiere University Of Lyon, France.
- Fathi, M., vd. (2019). An improved genetic algorithm with variable neighborhood search to solve the assembly line balancing problem. *Engineering Computations*, 37(2), 501-521.
- Gao, J., vd. (2009). An efficient approach for type II robotic assembly line balancing problems. *Computers and Industrial Engineering*, 56, 1065–1080.

- Goldberg, D.E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning* (13th ed.) USA: Addison-Wesley Professional.
- Gökçen, H. (1994). *Karışık modelli deterministik montaj hattı dengeleme problem için yeni modeller* (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Gräßler, I., vd. (2021). Skill-based worker assignment in a manual assembly line. *Procedia CIRP*, 100, 433-438.
- Gümüş, D.B., vd. (2023). An investigation of F-Race training strategies for cross domain optimisation with memetic algorithms. *Information Sciences*, 619, 153–171.
- Güven, Ü. (2021). *Sürekli optimizasyon problemleri için ters bakış açılı bir yapay arı kolonisi algoritması* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kütahya.
- Hinkelmann, K., & Kempthorne, O. (2007). *Design and analysis of experiments* (2nd ed.). Hoboken: Wiley-Interscience.
- Holland, J. H. (1992). *Adaptation in Natural and Artificial Systems* (1st ed.). Cambridge: MIT Press.
- Jackson, J.R. (1956). A computing procedure for a line balancing problem, *Management Science*, 2(3), 261-271.
- Janardhanan, M.N., vd. (2019). *Artificial bee colony algorithms for two-sided assembly line worker assignment and balancing problem*. Distributed Computing and Artificial Intelligence, 14th International Conference, Advances in Intelligent Systems and Computing 620, Springer, Cham.
- Janardhanan, M.N., Li, Z., & Nielsen, P. (2018). Model and migrating birds optimization algorithm for two-sided assembly line worker assignment and balancing problem. *Soft Computing*, 23(21), 11263-11276.
- Kaçar, T. (2020, 9 Kasım). Üretim Planlama ve Kontrol Nedir?. Erişim adresi: <https://mektebiendustri.com/index.php/2020/11/09/uretim-planlama-ve-kontrol-nedir>.

- Kalayci, T.E. (2016, June). *Solving GENOPT functions with the reactive affine shaker using irace for parameter tuning*. Learning and Intelligent Optimization Conference LION 10, Napoli, Italy.
- Karaca, M.K. (1996). Montaj hatları. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 1(1), 117-128.
- Karas, A., & Ozcelik, F. (2021). Assembly line worker assignment and rebalancing problem: A mathematical model and an artificial bee colony algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 156(4), 1-16.
- Karp, R. M. (1972). Reducibility among combinatorial problems. In R. E. Miller, J. W. Thatcher, & J. D. Bohlinger (Eds.), *Complexity of computer computations* (pp. 85–104). New York: Plenum Press.
- Karsu, Ö., & Azizoglu, M. (2014a). Bicriteria multiresource generalized assignment problem. *Naval Research Logistics*, 61(8), 621-636.
- Karsu, Ö., & Azizoglu, M. (2019b). An exact algorithm for the minimum squared load assignment problem. *Computers & Operations Research*, 106, 76-90
- Katiraei, N., vd. (2021). Consideration of workforce differences in assembly line balancing and worker assignment problem. *IFAC PapersOnLine*, 54(1), 13–18.
- Kermanshachi, S., & Rouhanizadeh, B. (2019, June 12- 15). *Sensitivity analysis of construction schedule performance due to increased change orders and decreased labor productivity*. CSCE Annual Conference, Laval, Greater Montreal.
- Keskintürk, T., ve Küçük, B. (2006). Karışık modellenli montaj hatlarının genetik algoritma kullanarak dengelenmesi. *Yönetim*, 17(53), 52-63.
- Kılınçcı, Ö. (2023). Assembly line balancing problem with resource and sequence-dependent setup times (ALBPRS). *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38(1), 557-570.
- Kilbridge, M., & Wester, L. (1961). The balance delay problem. *Management Science*, 8(1), 69- 84.

- Klazar, R., & Engelbrecht, A.P. (2014, July). *Parameter optimization by means of statistical quality guides in f-race*. IEEE Congress on Evolutionary Computation, Beijing, China.
- Kobu, B. (2014). *Üretim yönetimi* (17. baskı). İstanbul: Beta Yayınevi.
- Kulak, O., Yılmaz, I.O., ve Günther, H.O. (2008). A GA-Based solution approach for balancing printed circuit board assembly lines. *OR Spectrum*, 30(3), 469-491.
- Küçükkoç, İ. (2011). *Karışık modelli montaj hattı dengeleme problemleri ve genetik algoritmalar ile bir uygulama* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Liu, R., vd. (2021). Eco-friendly multi-skilled worker assignment and assembly line balancing problem. *Computers & Industrial Engineering*, 151(2), 1-22.
- López-Ibáñez, M., vd. (2016). The irace package: Iterated racing for automatic algorithm configuration. *Operations Research Perspectives* 3, 43-58.
- Marler, R.T., & Arora, J.S. (2005). Function-transformation methods for multi-objective optimization. *Engineering Optimization*, 37(6), 551–570.
- Massen, F., vd. (2013, May). *Experimental Analysis of Pheromone-based Heuristic Column Generation using irace*. Conference: International Workshop on Hybrid Metaheuristics, Springer, Berlin.
- Meng, K., vd. (2019a). An improved lexicographical whale optimization algorithm for the type-II assembly line balancing problem considering preventive maintenance scenarios. *IEEE Access*, 99, 1-16.
- Meng, K. vd. (2022b). Mixed-model assembly line balancing problem considering preventive maintenance scenarios: MILP model and cooperative co-evolutionary algorithm. *Applied Soft Computing*, 127, 109341.
- Miettinen, K. (2014). Survey of methods to visualize alternatives in multiple criteria decision-making problems. *OR Spectrum*. 36, 3–37.
- Mitchell, M. (1996). *An Introduction To Genetic Algorithms* (1st ed.). Cambridge: MIT Press.
- Montgomery, D.C. (2008). *Design and analysis of experiments* (8th ed.). Hoboken: John Wiley & Sons.

- Moreira, M.C.O., vd. (2012). Simple heuristics for the assembly line worker assignment and balancing problem. *Journal of Heuristics*, 18, 505–524.
- Mutlu, Ö., Polat, O., & Supciller, A.A. (2013). An iterative genetic algorithm for the assembly line worker assignment and balancing problem of type-II. *Computers & Operations Research*, 40(1), 418-426.
- Mutlu O ve Polat O. (2009). *Montaj hattı işçi atama ve dengeleme probleminin genetik algoritma ile çözümü* [Sözlü bildiri]. X Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu. Eskişehir, Türkiye.
- Moussavi, S.E., Mahdjoub, M., & Grunder, O. (2019). A matheuristic approach to the integration of worker assignment and vehicle routing problems: Application to home healthcare scheduling. *Expert Systems With Applications*, 125(C), 317-332.
- Nabiyev, V. (2012). *Yapay Zekâ* (4. Baskı). Ankara: Seçkin Yayınları.
- Okyay, Y. R. (2018). *Solving assembly line balancing problem with positional constraints and worker assignments using mathematical programming and heuristic solution approaches* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Öksüz, M. K., Buyukozkan, K., & Satoglu, S. I. (2017). U-shaped assembly line worker assignment and balancing problem: A mathematical model and two meta-heuristics. *Computers & Industrial Engineering*, 112, 246–263.
- Özer, E.A., vd. (2021). Bir tekstil fabrikasında montaj hattı dengeleme ve performansa dayalı işçi atama problemi. *Endüstri Mühendisliği*. 32(2), 235-250.
- Perez, L., Lopez-Ibanez, M., & Stutzle, T. (2014). An analysis of parameters of irace, *Computer Science*, 8600, 37-48.
- Petroodi, S.E.H., vd. (2022). Model-dependent task assignment in multi-manned mixed-model assembly lines with moving workers. *Omega*, 113(12), 1-46.
- Polat, O. (2008). *Montaj hattı işçi atama ve dengeleme problemlerinin genetik algoritmalarla çözülmesi* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.

- Polat, O., vd. (2015). A two-phase variable neighbourhood search algorithm for assembly line worker assignment and balancing problem type-II: An industrial case study. *International Journal of Production Research*, 54(3), 722-741
- Ritt, M., Costa, A.M., & Miralles C. (2015). The assembly line worker assignment and balancing problem with stochastic worker availability. *International Journal of Production Research*, 54(3), 1-16.
- Ross, P. J. (1988). *Taguchi techniques for quality engineering: loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design* (1rd ed.). USA: The McGraw-Hill Companies Inc.
- Scholl, A., & Becker, C. (2004). State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168(3), 666-693.
- Scholl, A, & Voss, S. (1996). Simple assembly line balancing—heuristic approaches. *Journal of Heuristics*, 2(3), 217–44.
- Simaria, A.S. (2006). *Assembly line balancing-new perspectives and procedures* (Unpublished PhD Dissertation). Universidade de Aveiro, Portugal.
- Stützle, T., & López-Ibáñez M. (2019). Automated Design of Metaheuristic Algorithms, in: *Handbook of metaheuristics*. Springer, 272, 541-579.
- Souza, M., & Ritt, M. (2016, January). *A study of the automatic design of heuristics for binary quadratic programming*. Conference: XLVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa OperacionalAt, Vitória , ES.
- Sungur, B., & Yavuz, Y. (2014). Assembly line balancing with hierarchical worker assignment. *Journal of Manufacturing Systems*, 37(1), 290-298.
- Süer, G.A., Sinaki, R.Y., & Sadeghi, A. (2019). A hierarchical hybrid heuristic-optimization approach for multi-product assembly line design problem. *Procedia Manufacturing*, 39, 1067–1075.
- Şahin, Ö., ve Akay, B. (2021). Yinelemeli f-yarış algoritması ile yapay arı koloni algoritmasının kontrol parametrelerinin ayarlanması. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 37(1), 12-25.

- Tang, Q., vd. (2022). An improved multi-objective multifactorial evolutionary algorithm for assembly line balancing problem considering regular production and preventive maintenance scenarios. *Swarm and Evolutionary Computation*, 68(3), 101021.
- Tanrıtanır, E. (1990). Üretim sistemleri ve imalat sistemleri. *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 40(1), 127-144.
- Thürer, M., vd. (2019). Worker assignment in dual resource constrained assembly job shops with worker heterogeneity: An assessment by simulation. *International Journal of Production Research*, 58(20), 6336-6349.
- Tinç, H.K. (2007). *An algebraic approach to sensitivity analysis in linear programming* (Unpublished M.Sc. Dissertation). İstanbul Technical University, Institute Of Science And Technology, İstanbul.
- Yıldız, Ş.T., Yıldız, G. ve Cin, E. (2020). Bir elektronik firmasındaki işçi atamalı montaj hattı dengeleme problemine matematiksel programlama ve benzetim modelleme tabanlı bir çözüm yaklaşımı. *KOCATEPEİİBF Dergisi*, 22(1), 57-73.
- Vilà, M., & Pereira, J. (2014). A branch-and-bound algorithm for assembly line worker assignment and balancing problems. *Computers & Operations Research*, 44, 105-114.
- Yavuz, G. (2022). L-shade algoritmasının otomatik parametre yapılandırma yöntemi ile iyileştirilmesi. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 15(2), 189-197.
- Yılmaz, H., & Demir, Y. (2019). A new mathematical model for assembly line worker assignment and balancing. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 9(4), 2002-2008.
- Yin, T., vd. (2022). Mixed-integer programming model and hybrid driving algorithm for multi-product partial disassembly line balancing problem with multi-robot workstations. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 73, 102251.
- Zacharia, P.Th., & Nearchou, A.C. (2016). A population-based algorithm for the bi-objective assembly line worker assignment and balancing problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 49, 1-9.

- Zhang, Z., vd. (2020). Ergonomic risk and cycle time minimization for the U-shaped worker assignment assembly line balancing problem: A multi-objective approach. *Computers and Operations Research*, 118(2), 104905.
- Zhao, L., Tang Q., & Zhang Z. (2022). An improved preference-based variable neighborhood search algorithm with ar-dominance for assembly line balancing considering preventive maintenance scenarios. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 109, 104593.



DİZİN

-Ç-

Çevrim Süresi, 44

-D-

Darboğaz, 44
Deney Tasarımı, 59, 60, 82, 83, 84
Denge Kaybı, 46
Duyarlılık Analizi, 84
Düzgünlük İndeksi, 46

-G-

Gen, 51
Genetik Algoritmalar, 50
Gerekli En Az İstasyon Sayısı, 44
Görev (İş Elamanı):, 43
Görev (İş Elemanı) Süresi, 43
Güvenlik Düzeyi, 46

-İ-

irace, 56
İstasyon Yerleşimine Göre Montaj
Hattı, 41
İş İstasyonu, 44
İş İstasyonu Süresi, 44

-K-

Kromozom, 52

Kuramsal Etkinlik, 46
Kurulum Sıklığına Göre Montaj Hattı,
40

-M-

Model Sayısına Göre Montaj Hattı, 38,
39
Montaj, 43
Montaj Hatları, 37
Montaj Hattı Dengeleme, 42

-O-

Ortalama İş İstasyonu Süresi, 45
Otomasyon Seviyesine Göre Montaj
Hattı,39

-P-

Popülasyon (Toplum), 52

-T-

Taşıma Sistemlerine Göre Montaj Hattı,
40
Teknolojik Öncelik Diyagramı, 45
Toplam İş Süresi, 44

-Ü-

Üretim, 33, 34