

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR SAVUNMA SANAYİİ FİRMASINDA UÇAK KOMPONENTİ MONTAJ
HATTI DENGELEME VE İŞGÜCÜ ATAMA PROBLEMİ İÇİN GENETİK
ALGORİTMA UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İREM KILIÇ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Tahir HANALIOĞLU
Eş Danışman: Doç. Dr. Babek ERDEBİLLİ

AĞUSTOS 2021



TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

İrem KILIÇ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BİR SAVUNMA SANAYİİ FİRMASINDA UÇAK KOMPONENTİ MONTAJ HATTI DENGELEME VE İŞGÜCÜ ATAMA PROBLEMİ İÇİN GENETİK ALGORİTMA UYGULAMASI

İrem KILIÇ

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Tahir HANALIOĞLU
Eş Danışman: Doç. Dr. Babek ERDEBİLLİ
Tarih: Ağustos 2021

Montaj hattı, belli bir büyüklükteki üretim kapasitesine sahip, nihai veya ara ürünlerin üretilmesi için gerekli operasyonların belirli bir sırayla gerçekleştirildiği iş istasyonlarından oluşan üretim yapısıdır. Montaj Hattı Dengeleme, üretimde gerçekleştirilmesi gereken operasyonlar arası öncelik ilişkisini sağlayacak şekilde, önceden belirlenen diğer kaynak, kapasite, işgücü, yerleşim gibi kısıtları göz önünde bulundurarak operasyonların farklı iş istasyonlarına atanması yaklaşımıdır. Bu çalışmada bir savunma sanayii firmasında tek modellenmiş bir uçak komponenti montaj hattı ele alınmıştır. Operasyon süreleri zaman etüdü çalışmaları ile ölçülmüştür ve uygulama kapsamında deterministik olarak kabul edilmiştir. Yapılan iş etüdü çalışmaları ile ele alınan tek modellenmiş uçak komponenti montaj hattında gerçekleştirilecek operasyonların hangi sıra ile gerçekleştirileceği bilgisi elde edilmiştir. Montaj hatlarının tasarımı ve dengelenmesi başta otomotiv olmak üzere, beyaz eşya ve elektronik sektöründe de üretim verimliliği açısından oldukça önemlidir. Uçak komponenti montaj hattı, diğer sektörlerdeki montaj hatlarından farklı olarak daha fazla emek yoğunluklu çalışmaktadır. İşgücü atamasının verimliliği arttıracak şekilde yapılması kritik öneme sahiptir. Her bir operasyon için farklı araç/gereçleri, takımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kısıt ile birlikte her montaj

operasyonunun her montaj istasyonunda gerçekleştirilemeyeceği bilinmektedir. Çalışmada konu alınan tek modellenmiş uçak komponenti montaj hattında, montaj hattı dengeleme ve işgücü atama problemi için yapılan uygulamada her bir operasyon ve her bir operasyonun gerçekleştirilebileceği potansiyel montaj istasyonları kısıt olarak yansıtılmıştır. Firmanın ele alınan uçak komponenti montaj hattı için ayıracağı işgücü ve bütçe önceden belirlenmiş olup kısıt olarak uygulamaya yansıtılmıştır. Operasyon sürelerinin operasyonu gerçekleştiren operatörün beceri seviyesiyle ilişkili olarak farklılık göstermesi dikkate alındığında problem için bütçe kısıtlı montaj hattı çevrim süresi minimizasyonu amaçlayan bir matematiksel model geliştirilmiştir. Belirlenen kısıtlar ve varsayımlar göz önünde bulundurularak, görevler arası öncelik ilişkisi sağlanacak şekilde, çevrim süresi minimizasyonu hedefleyen matematiksel modelin doğruluğu küçük boyutlardaki problem verileriyle GAMS programında modellenerek test edilmiş ve en iyi çözüm elde edilmiştir. Büyük boyuttaki gerçek hayat verileri, Python 3.7.6 programı aracılığıyla geliştirilen genetik algoritma ile uygun çözüme ulaşılmıştır. Böylelikle minimum çevrim süresi hedeflenen uçak komponenti montaj hattında, hangi istasyonda hangi operasyonunun çalışacağı ve hangi operasyonda hangi operatörün çalışacağı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Matematiksel model, Montaj hattı dengeleme, İşgücü atama, Genetik algoritma.

ABSTRACT

Master of Science

A GENETIC ALGORITHM APPLICATION FOR AIRCRAFT COMPONENT ASSEMBLY LINE BALANCING AND LABOR ASSIGNMENT PROBLEM IN A DEFENSE INDUSTRY COMPANY

İrem KILIÇ

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Department of Industrial Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Tahir HANALIOĞLU
Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Babek ERDEBİLLİ
Date: August 2021

The assembly line which known as a production structure composing of workstations with a certain production capacity, where the operations required for the production of final or intermediate products are carried out in a certain order. Assembly Line Balancing is the approach of operation assignment to different workstations, taking into account other predetermined constraints such as resource, capacity, workforce, and placement, in a way to ensure the priority relationship between operations that should be performed in production. In this study, a single model aircraft component assembly line in a defense industry company is discussed. Operation times were measured by time study studies and were considered deterministic within the scope of the application. In this study, the precedence relationship between the operations are determined with using work study techniques. Line balancing is very important in terms of production efficiency, especially in the automotive, white goods and electronics sectors. Unlike assembly lines in other industries, the aircraft component assembly line is more labor intensive. It is critical to assign workforce in a way that increases productivity. Different tools / equipments are required for each operation. With this constraint, it is known that not every assembly operation can be performed at every assembly station. In the single-model aircraft component assembly line,

which is the subject of the study, each operation and the potential assembly stations where each operation can be carried out is shown as a constraint in this problem type. The manpower and budget to be allocated by the company for the aircraft component assembly line are determined in advance and have been reflected in the application as a constraint. Considering that the operation times vary depending on the different skill levels of the each operator performing the operation, a new mathematical model has been formulated for budget constrained assembly line cycle time minimization for the problem of assembly line balancing and manpower assignment. Considering the determined constraints and assumptions, this mathematical model aiming at cycle time minimization was resolved in the GAMS program by modeling it with small-sized problem data, and the best solution was obtained, so as to provide priority relationship between tasks. Real life problem data with big-sized were modeled in Python 3.7.6 program with genetic algorithm to reached the feasible solution. In this way, it was determined which operation will be worked in which station and which operator will work in which operation in the aircraft component assembly line, for which the minimum cycle time is aimed.

Keywords: Assembly line balancing, Mathematical model, Labor assignment, Genetic algorithm.

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanma sürecinde, aktardığı değerli bilgi ve birikimleriyle beni en doğru şekilde yönlendiren, üzerimde büyük bir emeği olan saygıdeğer tez danışmanım ve Endüstri Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Tahir Hanalioğlu'na, çok kıymetli deneyimlerine güvendiğim ve bilgilerini benimle paylaşmaktan asla vazgeçmeyen, her koşulda bana destek olan ve olmaya devam edeceğine inandığım ikinci tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Babek Erdebilli'ye,

Hayata dair attığım ilk adımdan bu zamana kadarki son adıma kadar bana her koşulda sonsuz güven ve sevgi ile yaklaşan, maddi ve manevi olarak hep yanımda ve bana destek olmaya hazır olan canım annem ve canım babama, hayatıma renk katan ve sevgileriyle beni her zaman motive eden kardeşlerime,

Sevgileriyle beni her zaman şımartan, her konuda bana destek olan ve hep yanımda hissettiğim canım dostlarım Fatma Zehra Hayırcı, Ecem Tümsekçalı, Güzde Sert, Aslıhan Paksoy'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
KISALTMALAR	xii
SEMBOL LİSTESİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	2
2. MONTAJ HATTI Dengeleme ve İşçi Atama	5
2.1. Montaj Hattı Dengelemede Temel Kavramlar	5
2.2. Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinin Sınıflandırılması	8
2.2.1. Amaç fonksiyonları açısından MHDP	8
2.2.2. Amaç sayısı açısından MHDP	8
2.2.3. Model sayısı açısından MHDP	9
2.2.4. Hat yerleşimi açısından MHDP	9
2.3. MHDP için İşgücü Faktörü	10
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	11
3.1. Montaj Hattı Dengeleme Problemi	11
3.2. Montaj Hattı Dengeleme ve İşgücü Atama Problemi	15
4. PROBLEMİN TANIMI İLE ÖNERİLEN MATEMATİKSEL MODEL	23
4.1. Problemin Tanımı.....	23
4.2. Önerilen Matematiksel Model.....	23
5. MONTAJ HATTI Dengeleme ve İşçi Atama Probleminin GENETİK ALGORİTMA İLE ÇÖZÜLMESİ	29
5.1. Genetik Algoritma İle İlgili Genel Bilgiler	29
5.2. GA Kullanım Alanları	30
5.3. GA Temel Kavramlar	30
5.4. GA Temel Çalışma Prensipleri.....	32
5.5. Genetik Algoritma Parametreleri	33
5.6. GA’da Kullanılan Operatörler.....	34
5.7. Problem Çözümü İçin Önerilen GA	36
5.7.1. Problem tanımı	36
5.7.2. Problemin genetik algoritma çözümü	37
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	41
KAYNAKLAR	43
EKLER	51
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1: Montaj hattı dengeleme problemleri çözümünde yaygın olarak kullanılan yöntemler	2
Şekil 2.1: Örnek L-tipi hat.	9
Şekil 2.2: Örnek U-tipi hat	9
Şekil 5.1: Genetik algoritma işlem adımlarının şematik gösterimi.....	33
Şekil 5.2: Uçak komponenti bileşenleri.	37
Şekil 5.3: Elde edilen en iyi çözüm.....	40

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1: Örnek öncelik matrisi.	7
Çizelge 2.2: Amaç fonksiyonlarına göre MHDP.	8
Çizelge 2.3: Örnek atama matrisi.	10
Çizelge 4.1: Montaj hattı operasyonları öncelik matrisi.	26
Çizelge 4.2: Operasyonların istasyonlarda gerçekleştirilebilirliği.	26
Çizelge 4.3: Beceri seviyesine karşılık gelen çarpım katsayısı.	27
Çizelge 4.4: Her bir operatörün her bir operasyonu gerçekleştirme süreleri.	27
Çizelge 4.5: Her bir operatörün her bir operasyonu gerçekleştirme maliyetleri.	27
Çizelge 4.6: İstasyonlara atanan operasyonlar.	28
Çizelge 4.7: İstasyonlara atanan operatörler.	28
Çizelge 5.1: İstasyon ve operasyon uygunluk matrisi.	38
Çizelge 5.2: Beceri seviyesi ve katsayı ilişkisi.	39
Çizelge 5.3: İşçi ve operasyon süre ilişkisi.	39

KISALTMALAR

BMHDP	: Basit montaj hattı dengeleme problemi
ÇS	: Çevrim süresi
DK	: Denge kaybı
EO	: Esneklik oranı
GA	: Genetik algoritma
GAMS	: The general algebraic modeling system
max	: Maximum
MHDİAP	: Montaj hattı dengeleme ve işçi atama problemi
MHDP	: Montaj hattı dengeleme problemi
min	: Minimum
OS	: Ortalama iş istasyonu süresi
Pc	: Çaprazlama olasılığı
Pm	: Mutasyon olasılığı
PMHD	: Paralel montaj hattı dengeleme

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
V_j	Her j
V_s	Her s
$V_{s,j}$	Her s,j
V_w	Her w
a_{jw}	j operasyonunun s istasyonunda gerçekleştirilebilirli
d_{jw}	Beceri seviyesi w olan operatörün j operasyonunda gerçekleştirme maliyeti
N	Operasyon sayısı
pre_j	Operasyon j'nin genel öncelik diyagramındaki öncelikli işler kümesi
S	Dengeleme sonundaki iş istasyonu sayısı
t_{jw}	Beceri seviyesi w olan operatörün j operasyonunda gerçekleştirme süresi
W	Operatör sayısı
X_{sj}	1, eğer operasyon j, iş istasyonunu s'ye atanmış ise; 0, diğer durumlar
Y_{sj}	1, eğer işçi j, iş istasyonunu s'ye atanmış ise; 0, diğer durumlar

1. GİRİŞ

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte üretim sektöründeki rekabet artmıştır. Üretim sektöründe yer alan firmalar için kısıtlı kaynakları verimli şekilde kullanarak, müşteri isterlerine uygun kalitede ve hacimde ürünler üretebilmek önemlidir. Minimum maliyet ile kaynakların verimli şekilde kullanılması ve maksimum verimlilik hedeflenmektedir.

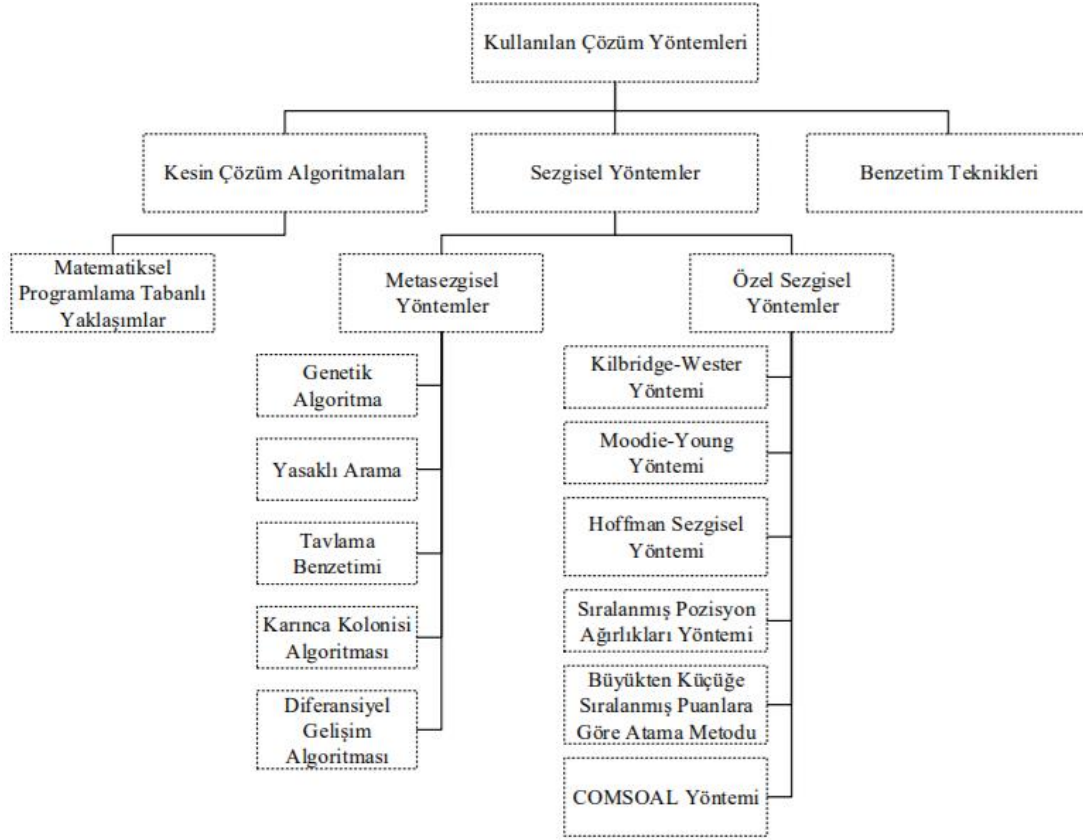
Montaj hatları yeniden tasarlanarak, üretim hızında artış sağlanır ve değişen talebin karşılanması amaçlanır. Montaj işleminin yapılabilmesi için gerekli operasyonlar, bu operasyonların gerçekleştirilebilmesi için gerekli süreler ve operasyonlar arasındaki öncelik ilişkisi verildiğinde, operasyonlara ait bir performans ölçüsünün optimize olacak montaj istasyonlarına atanması, MHDP olarak ifade edilir (Gökçen ve diğ., 2002).

Montaj hatları, bir ürünün üretilmesi için belirli kısıtlar altında gerekli montaj operasyonlarının işgücü veya konveyör gibi kaynaklardan faydalanılarak gerçekleştirildiği iş istasyonlarından oluşan sistemlerdir. Montaj istasyonlarında çalışanlar tarafından her bir montaj istasyonuna ürün geldiğinde atamaları yapılan operasyonları tamamlarlar (Çalkın, 2003).

Geleneksel montaj hattı dengeleme probleminde belirli montaj istasyonlarına atanan, ürünün üretilmesinde gerekli tüm operasyonların tamamlandığı üretim süreci ele alınmaktadır. Operasyonların istasyonlardaki işyükü dağılımı, operasyonlar için önceden belirlenmiş öncüllük ilişkisi yanında operasyonları gerçekleştirmek için gereken montaj süresine de bağlıdır (Ağpak ve Gökçen, 2002).

Geleneksel montaj hattı dengeleme problemi senaryosu, iki farklı tipte optimizasyon problemi olarak ele alınır. Tip I problemde, sabit çevrim süresi alınır ve istasyon sayısı minimizasyonu hedeflenir. Tip II problemde ise istasyon sayısı sabittir ve çevrim süresinin minimizasyonu istenir.(Ajenblit ve Wainwright, 1998). Hedefe ulaşabilmek için, öncelik ilişkileri göz önünde bulundurarak çevrim süresini aşmayacak şekilde montaj operasyonlarının sıralı montaj istasyonlarına atanmasına

dengeleme adı verilmektedir (Kaymaz ve Çavdur, 2018). Şekil 1.1’de montaj hatlarının dengelenmesi için sıkça kullanılan çözüm yöntemleri gösterilmiştir.



Şekil 1.1: Montaj hattı dengeleme problemleri çözümünde yaygın olarak kullanılan yöntemler (Altunay ve diğ., 2017).

Geleneksel yaklaşımla çözülen bu problem tiplerinde montaj istasyonlarına atanacak operasyonların tamamlanma sürelerinin operasyonlara atanacak her bir işçi için standart olduğu varsayılmaktadır. Fakat gerçek hayat problemlerinde belirli bir montaj hattında çalışan her bir işçinin performansı farklılık göstermektedir. Bu farklılık, montaj hattında tamamlanması gereken operasyon sürelerini doğrudan etki etmektedir. Operasyon gerçekleşme süreleri hesaplanırken, işçilerin yaş, deneyim ve operasyon bazlı beceri seviyeleri dikkate alınmaktadır. Tez kapsamında yapılan çalışmada, uçak komponenti montaj hattında yer alan operasyonların tamamlanma süreleri, operasyonlara atanan işçilerin beceri seviyelerine göre değişmektedir.

1.1. Tezin Amacı

Montaj hattı dengeleme problemlerinde belirli varsayımlar ile çözüme ulaşılacak istenmektedir. Her işçinin her operasyonu gerçekleştirme potansiyeline sahip olduğu

ve operasyon sürelerinin değişkenlik göstermediği varsayılmaktadır. Buna karşın, gerçek hayat problemlerinde her işçinin her bir operasyonu gerçekleştirme süresi beceri seviyesine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Montaj hattı dengeleme ve işçi atama probleminde, gerçek hayata yakın olarak her işçinin beceri seviyesini göz önünde bulunduran birçözüm yaklaşımı benimsenmektedir. Bu problem tiplerinde her bir operasyon potansiyel iş istasyonlarına, her bir işçi de beceri seviyesine ve belirlenen kısıtlara göre operasyonlara atanmaktadır.

Tez kapsamında, tek modelli bir uçak komponenti montaj hattı ele alınmıştır. Operasyonlar arası öncüllük ardılık ilişkileri, toplam işçilik için ayrılan bütçe göz önüne alınarak operasyonların istasyonlara atanmasını ve operatör beceri seviyelerine göre operatörlerin istasyonlara atanmasını sağlayacak çevrim süresi minimizasyonu hedefleyen bir matematiksel model önerilmiştir. Ele alınan problemde metasezgisel bir yöntemle başvurulmuş genetik algoritma geliştirilmiştir.

İkinci bölümde montaj hattı için dengeleme ve işçi atama konusunda yapılan bu zamana kadarki çalışmalar için literatür araştırması verilmiştir. Üçüncü bölümde ise temel kavramlara, hat dengeleme ve hat dengeleme çalışmalarında işgücü faktörüne ilişkin bilgiler sunulmuştur. Dördüncü bölümde önerilen matematiksel model ve GAMS optimizasyon program çözümü ile elde edilen en iyi çözüm gösterilmiştir. Beşinci bölümde çalışmada kullanılan genetik algoritma hakkında teorik bilgiler ve ele alınan tek modelli bir uçak komponenti montaj hattı için hat dengelemenin yanı sıra işçi atamaya yönelik geliştirilen genetik algoritmanın Python 3.7.6 programı ile ulaşılan en iyi çözümü yer almaktadır. Son bölümde ise bu çalışmaya ait sonuçların genel bir değerlendirmesi yapılmıştır.



2. MONTAJ HATTI DENGELEME VE İŞÇİ ATAMA (MHDİAP)

2.1. Montaj Hattı Dengelemede Temel Kavramlar

Montaj hattı, istasyon olarak adlandırılan üretim birimlerinde seri şekilde operasyonların gerçekleştirildiği akış odaklı bir üretimdir. Montaj hatları, standartlaştırılmış yüksek hacimli üretim ve düşük hacimli endüstriyel üretim sistemlerinde büyük öneme sahiptir. Her iş parçası başarılı bir şekilde istasyonlarda bir çeşit ulaştırma sistemiyle ilerler (Becker ve Scholl, 2006).

Hat boyunca, komponentler nihai ürüne ulaşıncaya kadar arka arkaya montaj işlemleri gerçekleştirilir. Nihai ürünü oluşturan komponentler, montaj hattının sonuna ulaşıncaya kadar birbiri takip eden istasyonlar arasında hareket eder. Her bir istasyondaki her bir ürün komponenti için çevrim süresi boyunca, montajı oluşturan belirli görev setleri tekrarlı bir şekilde gerçekleştirilir (Özcan ve Peker, 2007).

Montaj hattı dengeleme, üretkenliğin iyileştirilmesi ve üretim maliyetlerinin minimizasyonu açısından üretim şirketleri için kritik bir görevdir. Büyük ölçekli problemleri çözmek için kesin yöntemlerde bazı ilerlemelere rağmen, basit sezgisel yöntemler uygulayan yazılımlar endüstride hala en yaygın kullanılan araçlardır (Lapierre ve Ruiz, 2004).

İlk montaj hattı 1915'te Henry Ford tarafından kurularak çeşitli üretim sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaya devam etmektedir. Montaj hatlarının bu şekilde tanınması, seri üretim sistemlerinde elde edilen yüksek verimlilik seviyelerine bağlanabilir. 1955'e kadar montaj hattı tasarımı için yalnızca deneme yanılma yöntemi kullanılmıştır. Salveson (1955) tarafından problem için matematiksel analiz yapılmıştır. Bowman (1960) tarafından iki doğrusal programlama formülasyonu önerilmiştir. O zamandan beri, tamsayılı programlama, doğrusal programlama gibi algoritmalar ve sezgisel yöntemlere kadar çeşitli metotlar geliştirilmiştir (Gökçen ve Erel, 1999)

Günümüzün son derece rekabetçi, hızlı iş ortamı üretim sistemlerini etkili bir şekilde optimize etmeyi mutlak bir gereklilik haline getirmiştir. Bu şartlar, tasarım ve ürün model değişimlerine duyarlı hızlı bir üretim sistemi gereksinimini ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca proses teknolojilerini entegre edebilen, yüksek çeşitlilik ve öngörülemeyen miktarlarda ürün üretebilen bir üretim sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu iş ortamında, ürünlerin, süreçlerin ve ürünlerin tasarımını içeren bu tür üretim sistemlerinin kritik bir öneme sahiptir. Özellikle verimli bir montaj hattı tasarlamak endüstriyel açıdan büyük önem taşımaktadır (Baykasoğlu ve diğ., 2017).

Montaj hattı dengelemede temel kavramları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

Operasyon: Montaj hattında nihai ürünü üretmek amaçlı iş istasyonlarında gerçekleştirilen işlemlerdir. Montaj süresi boyunca gerçekleştirilmesi gereken en küçük iş parçalarıdır. Montaj hatlarında öncelik sırasına göre operasyonlar tamamlanmaktadır.

İş İstasyonu: Montaj hattında, operasyonların operatörler tarafından tamamlandığı alanlardır. Amaç tipine göre iş istasyonu minimize edilmek istenen montaj hattı problemleri mevcuttur.

Toplam İş Süresi: Nihai ürünü üretmek için tamamlanması gereken operasyonların standart sürelerinin toplamıdır.

İş İstasyonu Süresi: Bir istasyonda gerçekleştirilecek operasyonların tamamlanması için gereken toplam süredir (Atahan ve diğ., 2018).

Çevrim Süresi: Montaj operasyonları, farklı istasyonlarda gerçekleştirerek nihai ürün montajı tamamlanır. Her bir istasyonda geçen süre, iş istasyonu süresi olarak tanımlanmaktadır ve ÇS montaj istasyonuna ayrılan süreye eşit ya da daha fazla olabilir. İş istasyonlarında operasyonların gerçekleştirilebilmesi için gerekli en fazla süreye eşittir. Bu nedenle, bir ürünün çevrim süresi dolmadan herhangi bir istasyondaki operasyonları tamamlanmış olabilir (Kaymaz ve Çavdur, 2018).

Öncelik Matrisi: Montaj hattında operatörler tarafından gerçekleştirilecek tüm operasyonların gerçekleştirilme sırasını tanımlayan matristir. Operasyonlar arasındaki öncüllük ardıllık ilişkileri “0”, “1” şeklinde ifade edilir. Örneğin, üçüncü operasyon 2. Operasyondan sonra gerçekleştirilecekse, öncelik matrisinde 2. Satır, 3. Sütun “1” değeri alır. Çizelge 2.1’de örnek olarak gösterilmiştir.

Çizelge 2.1: Örnek öncelik matrisi.

	A	B	C	D
A	-	0	1	1
B	0	-	1	1
C	0	0	-	1
D	0	0	0	-

Düzensizlik indeksi: Bu indeks, opeasyonların iş istasyonlarına ne kadar düzensiz atandığını göstermektedir. DI düzensizlik indeksi, t_{enb} en yüksek süreye sahip istasyon, t_s s iş istasyonu süresi, S hattın dengelemesi sonucu elde edilen iş istasyon adedi, ζS çevrim süresi ile Denklem 2.1' de formülize edilmiştir (Erkut ve Baskak, 2003):

$$DI(\%) = \frac{\sqrt{\sum (t_{enb} - t_s)^2}}{S * \zeta S} * 100 \quad s=[1,2,\dots,S] \quad (2.1)$$

Hat etkinliği: Montaj hattı dengelemeden önceki montaj operasyonlarının tamamlanması için gereken toplam etkin sürenin, dengeleme sonrası iş istasyonları toplam süresiyle oranlanan bir performans ölçütüdür (Özcan ve Toklu, 2009).

Esneklik oranı: N operasyon sayısı, Y öncelik matrisinde "0" değeri alan eleman sayısı ile EO esneklik oranı Denklem 2.1 ile tanımlanabilir (Gökçen ve Erel, 1998):

$$EO = \frac{2 * Y}{N * (N - 1)} \quad (2.2)$$

Denge kaybı: Montaj hattı dengeleme ile tam dengeye yanı denge kaybında sıfır değerine ulaşmak hedeflenir. Operasyonların ve operatörlerin montajda yer alan istasyonlara atamasının dengeli olarak gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. D ile gösterilen denge kaybı, bir iş istasyonunda birim üretim için istasyona ayrılan süreyle montajın toplam süresi arasındaki farkın montaja ait süreye oranı ile ifade edilir. Denklem 2.2 ile hesaplanmaktadır (Erkut ve Baskak, 2003):

$$DK(\%) = \frac{\zeta S - OS * S}{\zeta S} * 100 = \frac{S * OS - \sum t_s}{S * \zeta S} * 100 \quad s=[1,2,\dots,S] \quad (2.3)$$

DK , denge kaybı; OS , iş istasyonuna ait ortalama süre; ζS , çevrim süresi; S , istasyon adedi; t_s s montaj istasyonuna ayrılan süre.

Darboğaz: İş istasyonlarındaki operasyon işyüklerinin farklılığı dolayısıyla zaman zaman takip eden iş istasyonuna ürün ilerlememekte ve darboğaz oluşturmaktadır.

Montaj hattı dengeleme ile darboğaz problemi minimize edilebilir (Doğan ve Sakallı, 2016).

Güvenlik düzeyi: İş istasyonlarına atanan operasyonların, çevrim süresi içerisinde tamamlanabilme olasılığıdır (Polat, 2008).

Ürün karışımı: Çok modelli hatların özelliğidir, her bir model için üretim hacmi oranını belirtir.

2.2. Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinin Sınıflandırılması

2.2.1. Amaç fonksiyonları açısından MHDP

Geleneksel yaklaşım ile bu tür problemler, amaç fonksiyonu açısından dört sınıfta incelenmektedir ve Çizelge 2.2’de verilmiştir:

Çizelge 2.2: Amaç fonksiyonlarına göre MHDP.

	TİP -1	TİP-2	TİP-E	TİP-F
Çevrim süresi	enküçüklenecek	belirli	enküçüklenecek	belirli
İş İstasyonu sayısı	belirli	enküçüklenecek	enküçüklenecek	belirli
Hat etkinliği			enbüyüklenecek	

Tip-1 probleminde, iş istasyonu sayısı verilmiş ve çevrim süresi enküçüklenmeye çalışılmaktadır. Tip-2 probleminde, çevrim süresi verilmiş ve iş istasyonu sayısı enküçüklenmesi hedeflenmektedir. Tip-E montaj hattı dengeleme probleminde ÇS ve montaj hattında yer alan istasyonu sayısının enküçüklenmesi hedeflenirken, hat etkinliğinin enbüyüklenmesi hedeflenmektedir. Tip-F için ise ÇS ve montaj hattında yer alan istasyonu sayısı verilmiştir, olurlu bir hat dengesini amaçlayan problem tipidir.

Montaj hattının yeniden tasarlanmasını gerektiren durumlardan biri montaj prosesindeki değişikliklerdir. Tip-2 problemleri, yeniden dengeleme problemleri çözümü için kullanıma uygundur. Belirli bir etkinlik fonksiyonunun enbüyüklenmesi veya enküçüklenmesi amaçlanıyor ise Tip-E problemi şeklinde çözülebilir. Uygun atama çözümü için ise Tip-F problemi kullanılır (Alağaç ve diğ., 2016).

2.2.2. Amaç sayısı açısından MHDP

Bir ve birden fazla amaca sahip bu problem tipi iki başlık altında incelenir. Birden fazla amaca sahip problem tipi daha karmaşık yapıdadır. Amaç fonksiyonu aynı anda iki farklı ölçütün optimizasyonunu ifade etmektedir.

2.2.3. Model sayısı açısından MHDP

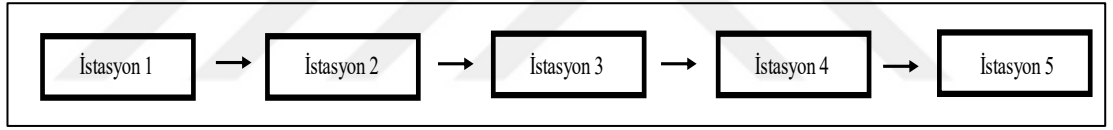
MHDP üçe ayrılır. Tek ve karma modellenli olanlar diğerlerine göre daha basit yapıdadır. Çok modellenli problem türü, parti tipi üretim sistemlerinde gerçekleştirilmektedir ve her model değişiminde yeni bir kurulumu ihtiyaç duymaktadır.

2.2.4. Hat yerleşimi açısından MHDP

Hat yerleşimi açısından montaj hattı dengeleme problemleri dört farklı sınıfta incelenebilir.

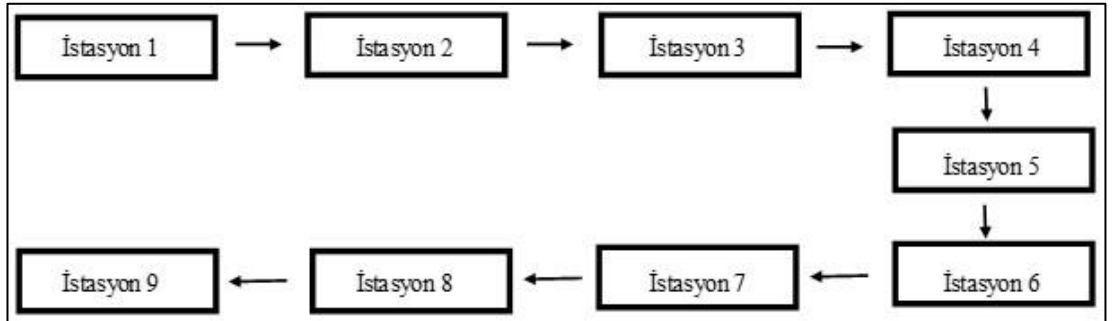
L-tipi montaj hattı dengeleme problemlerinde operasyonların gerçekleştirileceği iş istasyonları düz bir hat üzerinde sıralanmıştır. Montaj hızı diğer hat tiplerine kıyasla daha hızlı ve kolaydır. Bu tip montaj hatlarında meydana gelecek talep değişikliğinde montaj tamamlanma süresi artmaktadır. Montaj hattında gerçekleştirilecek operasyonların gruplanma olasılığı daha azdır.

Şekil 2.1’de örnek bir L-tipi hat gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Örnek L-tipi hat.

U-tipi montaj hattı dengeleme problemlerinde montaj operasyonlarının gerçekleştirileceği iş istasyonları U şeklinde dizilmiştir. Şekil 2.2’de bir örnek gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Örnek U-tipi hat

U-tipi montaj hattı tasarımı ile daha az atıl zaman oluşturulur. Üretim verimliliği çapraz istasyonlar sayesinde arttırılır. Ürün talep değişikliklerini karşılamak, diğer hat tiplerine

göre daha kolaydır. Montaj hattında çalışan her bir işçinin, rotasyon sıklığından dolayı her bir operasyon hakkında bilgi sahibi olması ve deneyim kazanması sağlanır.

Paralel montaj hattı dengeleme problemlerinde birbirine paralel konumlandırılmış hatlar bulunmaktadır ve her birinde aynı, benzer veya birbirinden farklı ürünler üretilmektedir. Birden fazla düz hat eş zamanlı dengelenmektedir.

Çift taraflı montaj hattı dengeleme problemlerinde büyük boyutlu komponentlerin montaj işlemleri yer almaktadır. Montaj hattının iki tarafında eş istasyonlar bulunmakta ve karşılıklı olarak montaj operasyonları tamamlanmaktadır.

2.3. MHDP için İşgücü Faktörü

Montaj hattı dengeleme problemlerinde montajı tamamlamak için gerekli montaj operasyonları belirli bir işlem sırasında ve süresinde gerçekleştirileceği varsayılmaktadır. Gerçek hayat montaj hattı dengeleme problemlerinde ise montaj operasyonlarının tamamlanma süreleri işgücü faktörüne bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Montaj hattında çalışan her bir işçi, her bir montaj operasyonunu gerçekleştirebilmek için farklı beceri seviyesine sahiptir. Hatta bir işçi bir montaj operasyonunu gerçekleştiremeyebilir. Yaş, tecrübe, eğitim seviyesi, fiziksel özellik gibi faktörlerden kaynaklı montaj operasyonlarının tamamlanma süreleri her bir işçiye göre farklılık göstermektedir. Örnek bir atama matrisi Çizelge 2.3'teki gibidir.

Çizelge 2.3: Örnek atama matrisi.

İşçiler/ Operasyonlar	A	B	C	D	E	F
1	4	5	3	3	-	-
2	-	3	5	4	4	-
3	2	-	4	5	3	5

Çizelge 2.3. örnek atama matrisinde A operasyonunu yalnızca birinci ve üçüncü işçinin yapabileceği; B operasyonunu yalnızca birinci ve ikinci işçinin yapabileceği; C ve D operasyonlarını tüm işçilerin yapabileceği; E operasyonunu yalnızca ikinci ve üçüncü işçinin yapabileceği; F operasyonunu ise yalnızca üçüncü işçinin yapabileceği gösterilmiştir.

Montaj hattı dengeleme ve işçi atama problemlerinde, montaj hattında çalışan işçilerin beceri seviyeleri göz önünde bulundurulmaktadır. Her bir montaj operasyonunun iş istasyonlarına ve işçilerin iş istasyonlarına ataması yapılmaktadır.

Operasyonların tamamlanma süreleri açısından uygun işçi atamasının yapılması büyük önem taşımaktadır.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatürde ele alınan MHDİAP, üç bölüm şeklinde sunulmuştur. Farklı çözüm yöntemleri kullanılarak yapılan teorik çalışmalar ile ilgili bilgiler verilmiştir. Her iki problemi eş zamanlı ele alan teorik çalışmalar da literatür araştırmasında incelenmiştir.

3.1. Montaj Hattı Dengeleme Problemi

Literatürde ilgili konuyu ele alan ilk çalışma 1954 yılında Bryton (1954) tarafından yapılmıştır. Northwestern Üniversitesi'nde yüksek lisans tezi kapsamında montaj hattı dengeleme problemi üzerine çalışan Bryton literatürde ilk kez MHDP için bir model sunmuştur.

Salveson (1955), montaj hattı dengeleme problemini analitik olarak ele alan literatürdeki ilk çalışmayı sunmuştur. Görevlerin bölünebilirliği esasına dayanan Tip-1 BMHDP adı verilen problemi ele alarak, her bir görevin birden fazla montaj istasyonuna atanabilir olduğu model formülize etmiştir.

Jackson (1956), literatürde BMHDP için operasyon öncüllük ardıllık ilişkisini göz önüne alan ilk algoritmayı geliştirmiştir. Geliştirilen algoritma, BMHDP çözümü için operasyon kombinasyonlarının yer aldığı mümkün atama setlerinin oluşturulmasına dayanmaktadır.

Hoffman (1963) tarafından BMHDP için literatürdeki ilk sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Oluşturulan operasyonlar arası öncelik matrisini temel alan algoritma, montaj istasyonları için mümkün operasyon kombinasyonları üretmektedir. Montaj

istasyonlarında boşluk zamanını en azlayacak çözüme ulaştıran mümkün operasyon kombinasyonu seçilmesi amaçlanmaktadır.

Moodie ve Young (1965), literatürde yer alan ilk stokastik zamanlı montaj hattı dengeleme çalışmasını ortaya koymuşlardır. Operasyonların tamamlanma durumları göz ardı edilerek, çevrim süresi sabit varsayılan bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir.

Thomopoulos (1967), literatürde ilk kez Karışık Modelli MHDP için yeni bir yöntem geliştirmiştir. Üretilen tüm modeller için birleşik görev seti ve birleşik öncelik diyagramı kurmuştur. Her bir çalışma vardiyası için toplam üretim süresi hesaplayan bir formül kullanmıştır. Formül, her bir model için birim proses süresinin, her bir çalışma vardiyasındaki her modele ait üretim adedi ile çarpımların toplanması sonucu elde edilmektedir.

Talbot ve Patterson (1975), literatürde ilk kez tam sayılı programlama algoritmasına giriş yapmışlardır. Tam sayılı programlama ve tüm olası operasyon atamalarını numaralandırmaya dayanan bir yöntem önermişlerdir.

Hoffman (1992) tarafından literatürde ilk defa Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemi için dal sınır algoritması yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, ağaçtaki her bir seviye, görev atamalarını dikkate alarak oluşturulan istasyonları göstermektedir. Her bir montaj istasyonu için her bir olası görev kombinasyonları üretilerek, bir sonraki montaj istasyonuna geçilir. Minimum boşluk zamanı amaçlanır ve geliştirilen yöntem optimal çözüm bulunana kadar devam eder.

Gökçen ve Erel (1996) tarafından literatürde ilk kez Karışık Modelli MHDP'de Öncelikli Hedef Programlama yaklaşımı önerilmiştir. Montaj operasyonları için birleşik öncelik diyagramı oluşturulmuştur. Her bir operasyonun gerçekleştirilme süresi model bazında farklılık göstermektedir. Kullanılan yöntemde, her operasyon model değişkenliğinden bağımsız olarak aynı montaj istasyonuna atanmaktadır. İlk amaç, toplam istasyon sayısını belirli bir seviyenin altında tutmaktır. İkinci amaç tüm modeller için çevrim süresinde üst sınır elde etmektir. Son hedef ise iki operasyon arasında bölgeleme kısıtını sağlamaktır.

Sarker ve Pan (2001), karışık modelli açık istasyon montaj hattı problemi için toplam boşa kalma zamanını minimize eden bir matematiksel model geliştirmişlerdir.

Simaria ve Vilarinho (2004) tarafından karışık modelli MHDP için detaylı bir çalışma sunulmuştur. Çalışmanın ilk kısmında problemin çözümü için 0-1 tam sayılı

programlama formülize etmişlerdir. Amaç fonksiyonunu iki değer oluşturmaktadır: Çevrim süresi ve operasyonların istasyonlara dağılımını gösteren değişkenin aldığı 0-1 değeri. Kurulan matematiksel model problem yapısı ve boyutları gereği çözümlenememiştir. Çalışmanın ikinci kısmında ise genetik algoritma geliştirilmiştir. İlk olarak, çevrim süresi için alt sınır hesaplanmıştır. Sonrasında her bir iterasyonda uygun işgücü kullanımı ile çevrim süresini azaltacak şekilde genetik algoritma uygulanmıştır.

Liu ve Huang (2005) tarafından önceden belirlenmiş istasyon sayısı ile minimum çevrim süresi hedefleyen bir sezgisel algoritma sunulmuştur.

Becker ve Scholl (2006), kaynak seçimi ve proses alternatiflerine, stokastik ve deterministik operasyon sürelerine göre, atama kısıtlarını göz önüne alarak maliyet açısından hat dengeleme çalışması yapmışlardır.

Özcan ve Peker (2007), karışık modelli MHDP için tabu araması algoritması kullanarak istasyon sayısını en azlamayı hedefleyen bir sezgisel çalışma ortaya koymuşlardır.

Kim ve diğ. (2009), yaptıkları bir çalışmada, Çift Taraflı MHDP için yeni bir model önermiş ve genetik algoritma sunmuşlardır. Matematiksel model, atama değişkeni ve her bir görevin bitiş zamanını gösteren değişkenden oluşmaktadır. Formülasyonda verilen işgücü ile çevrim süresini en azlamak amaçlanmaktadır. Çalışmanın ikinci kısmında genetik algoritma sunulmuştur.

Paksoy ve diğ. (2009) tarafından maliyeti en azlayacak doğrusal olmayan karışık tamsayılı bir matematiksel model geliştirilmiştir.

Pastor ve diğ. (2010) çevrim süresi minimizasyonu amaçlayan Karışık Tamsayılı Programlama yöntemi geliştirdi. Üretim esnekliğinin, dönemsel talep değişikliklerini karşılamak amaçlı çok önemli bir faktör olduğunu vurgulamıştır.

Yang ve diğ. (2013), karışık modelli MHDP için montaj istasyonu sayısını minimize etmeyi hedefleyen ve bir görevin farklı modeller için değişkenliğini göz ardı ederek aynı istasyona atanmasını sağlayan bitişik görev çoğaltma yöntemi önermişlerdir.

Kara ve diğ. (2014), basit montaj hattı dengeleme problemine ergonomi kısıtı dahil ederek maliyeti en azlayacak bir model geliştirmişlerdir. Yeni bir matematiksel

model geliştirerek ergonomi ve kaynak kısıtları altında toplam maliyeti minimize etmeyi amaçlamışlardır.

Tapkan ve diğ. (2016) tarafından sunulan çalışmada yürüme mesafeleri dikkate alınarak çift taraflı PMHD problemine önerilen Arılar ve Yapay Arı Kolonisi algoritması aracılığıyla çözüm aranmıştır.

Li ve diğ. (2017) yaptıkları bir çalışmada, çift taraflı MHDP inceleyerek, daha önceki yapılmış çalışmalar değerlendirilmiştir. Sezgisel ve metasezgisel algoritmalar kullanılan çalışmalar derlenmiştir.

Özcan ve diğ. (2019) enerji sektöründe faaliyet gösteren bir firmada montaj hattı dengeleme problemini istatistiksel verilerle ele almışlardır. Kaynak kullanım maksimizasyonu ve katma değersiz görevlerin minimizasyonu ile geliştirilen yalın üretim teknikleri kullanan bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. İstatistiksel veri analizleri ile montaj hattında mevcut ve gelecek durumu değerlendirmişlerdir.

Palamut ve Akpınar (2019) tarafından Alternatif Altgraf Montaj Hattı Dengeleme Problemleri ele alınarak operasyonlar arası öncelik diyagramında ortaya çıkan alt süreçler sunulmuştur. Farklı montaj sırası alternatiflerine sahip problemlerde montaj sürelerinin değişkenliği yeni önerilen metasezgisel yöntemlerle belirlenmiştir.

Asl ve diğ. (2019) tarafından yaptıkları bir çalışmalarında, çevrim süresi minimizasyonu, istasyonlar arası işyükü dağılımı düzgünlüğü maksimizasyonu amaçlayan ve her bir ortak operasyonun aynı montaj istasyonuna atanmasını sağlayan bir matematiksel model önermişlerdir.

Damayanti ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmada, otomotiv sektöründe bir vaka çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. MHDP için öncelik kural tabanlı sezgisel yöntem (Priority Rule-Based) ve genetik algoritma kombinasyonu kullanılarak çözüm aranmıştır.

Hongjun ve diğ. (2020) yaptıkları bir çalışmada, robot montaj hattında verimliliği arttırmak ve enerji tüketimini minimize etmek amaçlı optimizasyon şeması tasarlanmıştır. Kurulan matematiksel modelde pürüzsüzlük indeksi, enerji tüketimi ve girdi maliyeti dikkate alınmıştır.

Zhang ve diğ. (2020) yaptıkları bir çalışmada, Endüstri 4.0 kullanılarak elde edilen gerçek zamanlı bilgiler kullanılarak montaj hattı dengeleme problemi

çözümlemişlerdir. Gerçek zamanlı veriler ile montaj hattındaki makinelerin performansları ölçülerek hattın ne zaman yeniden dengeleneceği ve üretim oranlarının nasıl ayarlanacağını belirlemek için bir bulanık kontrol sistemi geliştirilmiştir.

Khan ve diğ. (2020), dişli kutusu montaj hattı ele alınmışlardır. Endüstri 4.0 ile gerçek zamanlı veriler toplanarak dengeleme prosedüründe yeniden görev atamaları gerçekleştirilmiştir.

Lei ve diğ. (2021), montaj hatlarının belirsizliğini ölçmek için karmaşıklık teorisi geliştirilmişlerdir. Belirsiz olan talebin karşılanması amaçlı üçgen bulanık sayı kullanılmış ve istasyon karmaşıklığı göz önünde bulundurularak yeni bir optimizasyon modeli kurulmuştur.

Yuan ve diğ. (2021) tarafından yapılan çalışmada, önceden belirlenmiş çevrim süresi ile Benders ayrıştırma tabanlı kesin algoritma kullanılarak istasyon uzunluğunu minimize etmek amaçlanmıştır.

Tang ve diğ. (2021) tarafından yapılan çalışmada, maliyete odaklanarak MHDP çözümlenmiştir. Robot satın alma maliyetini enazlamak için karma tamsayılı programlama modeli geliştirilmiştir. Sonrasında göçmen kuş optimizasyon algoritması problem çözümünde kullanılmıştır.

3.2. Montaj Hattı Dengeleme ve İşgücü Atama Problemi (MHDİAP)

Bukchin ve diğ. (1997) yaptıkları çalışma ile takım odaklı montaj hattı için yeni bir tasarım yaklaşımı sunulmuştur. Yeni yaklaşım sayesinde takım odaklı montaj sistemleri, modern montaj hattı sistemlerini desteklemekte ve daha yeterli bir çalışma ortamı yaratmaktadır. Her bir takımın sorumlulukları detaylı tanımlanmıştır. Tasarım parametreleri, takımların sayısı, öncelik ilişkisi, takımların büyüklüğü ve her bir takımın iş içeriği şeklindedir. Problem çözüm yaklaşımı ise ürün odaklı ve ürün ağacı birimlerinin her bir takıma atanmasını temel almaktadır.

Lee ve Vairaktarakis (1997) tarafından yapılan çalışmada, otomobil uçak, yangın motoru fabrikaları gibi emek yoğun operasyonlardan oluşan seri üretim montaj hatları için işgücü planlaması problemi çözümlenmiştir. Karma modellenmiş montaj hattı ele alınarak minimum işgücü ihtiyacı amaçlanmıştır. Tüm işçilerin beceri seviyeleri her istasyon ve operasyonda çalışacak yeterlilikte varsayılmıştır. Her bir istasyon için

kalıcı ve geçici işgücü atama yaklaşımı geliştirilmiştir. Genel problemin çözümünde alt ve üst sınır bulmak amaçlı sezgisel algoritmalar geliştirilmiştir. Hesaplamalar sonucu geliştirilen bazı sezgisellerin optimal sonuca en yakın sonucu verdiği belirlenmiştir.

Nakade ve Ohno (1999), çok işlevli işçilerin atanması ile U tipi montaj hattı ele alınmışlardır. Talepleri karşılayacak şekilde minimum işçi sayısı ile montaj hattı çevrim süresi minimizasyonu amaçlanmıştır. Klasik montaj hattı dengeleme probleminden farklı olarak, işçilerin makinalara atanmasını optimize etmek için bir algoritma önerilmiştir.

Doerr ve diğ. (2000), üç faktör üzerinden montaj hattında gerçekleşen operasyon tamamlama sürelerinin değiştiği tanımlamışlardır: operasyon farklılığı, operasyona atanan işçi performansı kaynaklı farklılık ve operasyonun yapıldığı çevre kaynaklı farklılık geliştirilen algoritma ile operasyon tamamlama süresindeki farklılıkların etkilendiği en önemli faktörün işçi performansı kaynaklı olabileceği durum üzerinden bir yaklaşım modellenmiştir. Operasyona atanan işçi ile değişen operasyon tamamlama süreleri stokastik varsayılmıştır. Sezgisel algoritmalar geliştirilerek modelin büyük boyutlardaki problemler için uygulanabilirliği sağlanmıştır.

Heike ve diğ. (2001), verimli makina ve işgücü kullanımıyla düşük hacimli üretim yapan karma modelli montaj hattını ele alınmışlardır. İşgücü ve stokta tutma maliyetlerine dayanan çevrim süresi ve işgücü atama alternatiflerinin değerlendirilmesi için dört model geliştirilmiştir. Doğrusal ve soğrusal olmayan programlamalar içeren modeller için sabit ve farklılık gösteren çevrim süresi yaklaşımları değerlendirilmiştir. Uçak montaj hattı operasyonları için geliştirilen dört model başarılı bir şekilde uygulanmıştır.

Gronalt ve Hartl (2003) yaptıkları bir çalışmada, orta büyüklükte kamyon fabrikası montaj hattına ilişkin işgücü ataması ele alınmıştır. İşgücü maliyetini minimize etmeyi amaçlayan bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda ileri planlama sistemi ile işgücü maliyeti için tasarruf sağlanabildiği belirlenmiştir.

Hopp ve diğ. (2004) yaptıkları çalışmada, çapraz eğitilmiş işçilerin ve çevik işgücü politikalarının potansiyel lojistik üzerinde sağlanacak faydalarına ilişkin yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. Çalışmalarında, basit modeller kurularak seri üretim

sistemlerinde çevik işgücü politikasının montaj hattında verimliliği artırdığına yönelik sonuçlar elde edilmiştir.

Dimitriadis (2006), aynı ürün ve iş istasyonlarında çalışan işçi gruplarına odaklanılmıştır. İşçilerin beceri seviyelerinin aynı olduğu ve montaj hattında gerçekleştirilecek operasyon sürelerinin deterministik olduğu varsayılmıştır. Montaj hattında üretilen ürünün boyutları göz önüne alınarak, işçilerin aynı iş istasyonunda farklı operasyonlara atanması durumunda birbirlerini engellemeyecek şekilde atanmaları dikkate alınmıştır. İş istasyonu sayısının minimizasyonu hedeflenmiştir. Çalışmada sezgisel bir yaklaşım geliştirilerek her bir iş istasyonu için optimal işgücü sayısı belirlemek amaçlanmıştır.

Song ve diğ. (2006), insan merkezli üretim hattını iyileştirmek için montaj hattı dengeleme probleminde bir optimizasyon modelini geliştirmişlerdir. Bu problem tipinde operatör verimliliği çok önemli bir önem taşımaktadır. Operatörlerin operasyonlara ve iş istasyonlarına atanmasında, operatörlerin verimliliği göz önünde bulundurulmaktadır. Problem çözümünde çok amaçlı bir algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmada operasyon verimliliği standart sapmasının en azlanması, üretim hattı verimliliğinin en büyüklenmesi ve toplam operasyon verimlilik kaybının en azlanması hedeflenmiştir.

Miralles ve diğ. (2007), engelli işçilerin normal işçiler gibi montaj hattında gerçekleştirilecek operasyon ve iş istasyonlarına atanabilirliği için korunmuş iş merkezlerinin göz önünde bulundurulduğu bir yaklaşım sunulmuştur. İşçiler ve işlerin bir iş istasyonuna atandığı varsayılarak bir matematiksel model kurulmuştur. Kurulan matematiksel modelde, iş istasyon sayısını ve çevrim süresini minimize etmek amaçlanmaktadır. Problemin çözümünde dal sınır algoritması geliştirilmiştir.

Bock (2008) tarafından yapılan çalışmada, otomotiv endüstrisinin belirli yönlerini entegre eden yeni bir karma modellenmiş montaj hattı dengeleme yaklaşımı sağlanmıştır. Çalışmada, işgücü planlama, iş ve proseslerin planlanması problemleri kompleks hale dönüştürmüştür. Tabu Arama (Tabu Search) algoritması kullanılarak problem çözümlenmiştir.

Chaves ve diğ. (2009), operatörlerin beceri seviyelerinin farklılığı göz önünde bulundurularak operasyonların tamamlanma sürelerinin farklılık gösterdiği sunulmuştur. İşçi atama yaklaşımında, her bir istasyona bir işçi atanacağı

varsayılarak işçi ve iş istasyonu sayısı eşit kabul edilmiştir. Çevrim süresi minimizasyonu amaçlayan çözüm için kümeleyerek arama (Clustering Search) çözüm yaklaşımı kullanılmıştır.

Moreira ve diğ. (2012), bir montaj hattında iş rotasyon çizelgelemesi değerlendirirken heterojen işgücü ile çalışan montaj hattı dengeleme problemini araştırmışlardır. Karışık tamsayı programlama kullanan bir hibrit algoritma önermişlerdir. Bu algoritma ile sezgisel olarak oluşturulan çözüm havuzundan uygun çizelgeleri seçmeyi amaçlamışlardır. Bu yaklaşım ile literatürdeki metotlara kıyasla daha hızlı, esnek ve doğru sonuçlar elde edilmiştir.

Araújo ve diğ. (2012), heterojen işçiler arasındaki işbirliğine izin veren iki yeni değişkenli model sunulmuşlardır. Bu yeni yaklaşımlarda hat tasarımı ve işçi atama sürecinde ek karmaşıklık ve yüksek esneklik varsayılmaktadır. Problem çözümünde doğrusal programlama modelleri ve sezgisel yöntemler geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, farklı düzenlerdeki hatlar için yeni yaklaşımın verimliliğini göstermiştir.

Özbakır ve diğ. (2012), PMHD problemini ele alınmışlardır. Her bir montaj istasyonunun boş zamanlarının ve hat verimliliğinin optimizasyonu amaçlanmıştır. Bu amaçla, montaj hattı dengeleme yapılarak yeni çok kolonili karınca algoritması kullanılmıştır.

Zacharia ve Nearchou (2012) yaptıkları bir çalışmayla, ilk olarak düzgünlük indeksi ve çevrim süresini en azlamayı, sonrasında da çevrim süresi, her bir montaj istasyonunun denge kaybı ve toplam maliyetin eş zamanlı en azlamayı hedeflemişlerdir. Bu hedef doğrultusunda, üçgensel bulanık sayılar cinsinden operasyon süreleri ele alınmıştır.

Mutlu ve diğ. (2013) yaptıkları çalışmada, Montaj Hattı Dengeleme ve İşgücü Atama Tip-2 Problemi ele alınmıştır. Görev süreleri beceri seviyesi farklı operatörlere atanan görevler ve istasyonlara atanan operatörler açısından farklılık gösteren bir montaj hattı işlenmiştir. Çevrim süresini minimize etmek amacıyla tekrarlı genetik algoritma geliştirilmiş ve problem çözülmüştür. Arama çeşitliliği ve verimliliği amacıyla üç arama yaklaşımı benimsenmiştir. Elde edilen sonuçlar sezgisel ve metasezgisel yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlara bakıldığında sonuçlar daha verimli ve güçlüdür.

Borba ve Ritt (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, klasik montaj hattı dengelemede kullanılan her operatör için görev sürelerinin aynı olması durumunun aksine aralarındaki farklılık ele alınmıştır. Montaj hattında çalışan operatör sayısı sabit ve her birinin beceri seviyesi görev süreleri üzerinde farklılık göstermektedir. MHDİAP için görevler arası öncelik ilişkisini göz önünde bulundurarak üretim oranını maksimize edecek bir sezgisel algoritma geliştirmişlerdir. Geliştirilen sezgisel algoritmanın yanı sıra problemi çözmek için yeni indirgeme kuralları ve alt sınırlar kullanan görev odaklı dal sınır algoritması önermişlerdir. Büyük boyutlardaki örnekler üzerinde yapılan hesaplama testlerinde, elde edilen sonuçların verimli ve literatürde var olan yöntemlerden daha gelişmiş olduğu belirlenmiştir.

Ramezian ve Ezzatpanah (2015) yaptıkları bir çalışmada, işçi atama problemi, atama sırasında operasyon gerçekleşme maliyeti ve işçi beceri seviyesini dikkate almaktadır. Yapılan çalışmada, toplam çevrim süresini ve işçilerin beceri seviyesine göre değişkenlik gösteren operasyon tamamlama süresini kullanmışlardır. Zorluk seviyesi yüksek bu problem için hedef programlama kullanılmıştır. Önerilen algoritmanın verimliliğinin belirlenmesi amacıyla deneysel sonuçlar genetik algoritma ile karşılaştırılmıştır.

Sungur ve Yavuz (2015) tarafından yapılan çalışmada, görevlerin kalifikasyon gereksinimlerine göre ve işçilerin kalifikasyon seviyelerine göre hiyerarşik olarak sıralandığı bir montaj hattı ele alınmıştır. Görevlerin işçilere ve işçilerin istasyonlara optimal bir şekilde atanması ile toplam maliyet minimizasyonu için yeni bir model kurulmuştur.

Polat ve diğ. (2016) yaptıkları bir çalışmada, tip-2 problemini ele almışlardır. Çevrim süresini minimize edecek şekilde, aynı anda işçi ve görevlerin önceden belirlenmiş sabit sayıda iş istasyonlarına atamasını gerçekleştirmek amaçlı komşu arama algoritması geliştirmişlerdir. Geliştirilen algoritma LCD TV üretimi yapan bir şirkette gerçek bir vaka çalışmasında uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, algoritmanın uygulanması kolay olduğunu ve final montaj hattında önemli ölçüde performansı iyileştirdiğini göstermiştir.

Zacharia ve Nearchou (2016) yaptıkları bir çalışmada, çok amaçlı evrimsel algoritma sunulmuşlardır. Hedefler doğrultusunda, en iyi işçi- görev ataması ve işçi- iş istasyonu ataması belirlenmeye çalışılmıştır. İş istasyonu işyükü düzgünlük indeksi

ve çevrim süresi minimizasyonu optimizasyon kriterleri olarak belirlenmiştir. Yapılan analizlerle çözüm açısından yeterli bir performans elde edilmiştir.

Öksüz ve diğ. (2017), montaj hattı verimliliği maksimizasyonu hedeflenen çalışmada, her bir işçinin operasyonları gerçekleştirme süresinin beceri seviyelerine göre değişkenlik göstereceği göz önünde bulundurulmuştur. Problem çözümünde, öncelikle doğrusal olmayan bir model kurulmuş ve sonrasında doğrusal bir model oluşturulmuştur. Sonrasında literatürde bulunan veri setleri kullanılarak önerilen genetik algoritma ile daha kısa sürede çözüme ulaşılmıştır.

Janardhanan ve diğ. (2018) yaptıkları bir çalışmada, üç farklı yapay arı kolonisi algoritması sunulmuşlardır. İlk çözüm orijinal yapay arı kolonisi algoritması ile elde edilmiş, sonrasında bu algoritma geliştirilerek iki farklı yapay arı kolonisi algoritmasıyla da çözüm aranmıştır. Sunulan üç yapay arı kolonisi algoritmasıyla elde edilen sonuçlar, literatürdeki diğer en iyi bilinen metasezgisel algoritma çözümleriyle karşılaştırılmıştır. En iyi sonucu geliştirilen iki yapay arı kolonisi algoritmasının verdiği belirlenmiştir.

Efe ve diğ. (2018), montaj hattında çalışan işçilerin yaş ve cinsiyetlerine bağlı olarak üretken işyükü farklarına odaklanmışlardır. Fazla işyükü sonucu, kalite problemlerinde artış, montaj hattı verimliliğinde düşüşlerin oluşabileceği konularına değinmişlerdir. Önerilen regresyon modeli ile yaş ve cinsiyet bazlı fiziksel işyükü kapasitesi belirlenmiştir. Altı farklı yaş kategorisi analiz edilmiştir. Önerilen 0-1 tamsayı doğrusal programlama modeli ile yaş ve cinsiyeti göz önünde bulunduran bir MHDİAP çözülmüştür. Kurulan modelin verimliliği, test verilerinde bir tekstil firmasından alınan verilerle gösterilmiştir. Tüm iş istasyonları fiziksel işyükü ve operasyon süreleri açısından dengelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ile ilerleyen ortalama yaşın istasyon sayısını arttırdığı ve bu durumun hat verimliliğinde ve fiziksel işyükü kapasitesi kullanım oranında azaltmayı tetiklediği gösterilmiştir.

Akyol ve Baykasoğlu (2019) tarafından yapılan çalışmada, ergonomik riskleri göz önünde bulunduran MHDİAP ele alınmıştır. Atanan işçilere göre proses süreleri farklılık göstermektedir. Klasik montaj hattı dengeleme problemlerinde proses süreleri sabit varsayılmasına rağmen, proses süreleri prosesin atandığı işçiye göre farklılık göstermektedir. Geleneksel açıdan bakıldığında iki farklı istasyonda çalışan iki işçi, aynı iş istasyonu süresinde prosesi gerçekleştirmekteyken aynı işyüküne

sahip oldukları varsayılmaktadır. Gerçek montaj hattı konfigürasyonunda işçiler, aynı iş istasyonu süresinde proseslerin birbirinden farklı yürütülmesinden dolayı farklı işyüklerine sahip prosesler gerçekleştirmektedir.

Janardhanan ve diğ. (2019) yaptıkları çalışmada, çift taraflı montaj hattı dengelem ve işçi atama problemi ele alınarak çevrim süresi minimizasyonu hedeflenmiştir. Karışık tamsayı programlama modeli geliştirilerek, CPLEX programı küçük boyutlu problemin çözümü için kullanılmıştır. Büyük boyutlu problem çözümü için ise metasezgisel yöntemlerden göçmen kuşlar optimizasyon algoritması uygulanmıştır.

Zhang ve diğ. (2020) yaptıkları bir çalışmada, eş zamanlı olarak çevrim süresi ve ergonomik risk minimizasyonunu hedeflenmişlerdir. Çizelgeleme problemleri çözümündeki başarısı nedeniyle, her iki hedefi de optimize etmek için yeniden başlatılan tekrarlanan pareto açgözlü (Restarted Iterated Pareto Greedy) algoritması kullanılmıştır. İstatiksel analizlerle desteklenen kapsamlı hesaplama sonuçlarına göre, önerilen çok amaçlı algoritmanın mevcut yöntemlerden daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir.

Chica ve diğ. (2020), otomotiv ve elektronik endüstrisinde yer alan .oklu işçinin çalıştığı istasyonlara sahip montaj hattı ele almışlardır. Operasyonlar arası öncelik sırası, çevrim süresi, sıralama ve görev atamadan oluşan bir model kurulmuştur. Karışık tamsayı programlama ve karınca kolonisi ile MHDİAP çözüm aranmıştır.

Bayram ve diğ. (2021), bir bulaşık makinesi fabrikasında montaj hattı ele alarak montaj hattında yer alan benzer operasyonlar gruplandırmışlardır. Çalışmada tamsayı programlama kullanılarak çevrim süresi azaltılmış, işçi kapasitesi düşürülmüştür.

Chu ve diğ. (2021), enerji tüketimini dikkate alan farklı beceri seviyelerine sahip işçilerin ataması ve hat dengeleme üzerine çalışmışlardır. Toplam işçilik maliyeti ve enerji tüketim maliyeti minimize edilir. Küçük ölçekli veri ile yapılan problem çözümünde doğrusal programlama, büyük ölçekli veri ile yapılan problem çözümünde ise genetik algoritma kullanılmıştır.



4. PROBLEMİN TANIMI İLE ÖNERİLEN MATEMATİKSEL MODEL

4.1. Problemin Tanımı

Tez kapsamında uçak komponenti üretimi yapılan tek tip ürün üreten montaj hattı için bu çalışma gerçekleştirilmiştir. Uçak komponenti montaj hatları, diğer montaj hatlarına kıyasla emek yoğunluklu çalışmaktadır. Otomatik montaj ekipmanları kullanılmaya başlansa da (otomatik perçinleme, delme gibi), %80 oranında iş gücü ile montaj operasyonları tamamlanmaktadır.

Uçak komponenti montaj hatlarında zamanında teslimat ve hat verimliliğinin sağlanması için işgücü en önemli ve baskın kaynaktır. İşgücü dağılımı montaj hattı verimliliğine direkt etki eder. Uçak yapısının karmaşıklığı farklı uçak komponentlerinin çalışıldığı istasyonlara ait işyükleri arasında farklılıklara neden olur. Uçak kanat komponent montaj hattı istasyonları, gövde paneli montaj hattındakilere kıyasla daha fazla işyüküne sahiptir.

Çalışmada, spesifik montaj hattı problemi olarak da bilinen montaj hattı işgücü atama ve dengeleme problemine çözüm aranmıştır. Farklı beceri seviyelerine sahip sabit sayıda işçiden oluşan uçak komponenti montaj hattında önceden belirlenen bütçeyi aşmayacak şekilde operasyonların işçilere, işçilerin istasyonlara atanmasına yönelik çalışılmıştır.

4.2. Önerilen Matematiksel Model

Ramezani ve Ezzatpanah (2015)'in sundukları, karışık modelli MHDİAP çözümü için geliştirilen matematiksel model referans alınmıştır. Önceden belirlenmiş varsayımlar ve kısıtlar doğrultusunda çevrim süresini minimizasyonu amacıyla, karma tamsayılı doğrusal olmayan programlamayla bir matematiksel model geliştirilmiştir.

Varsayımlar:

1. Tek modellenli montaj üretim hattı ele alınmıştır.
2. Montaj operasyonlarını tamamlayacak her bir operatör farklı beceri seviyesine sahiptir. (1-5 aralığında)
3. Operasyon süreleri deterministik olarak bilinmektedir.
4. Operasyonlar arasındaki öncelik ilişkileri bilinmektedir.
5. Montaj operasyonlarınının tamamlanma süreleri atanmış operatörün beceri seviyesine göre farklılık göstermektedir.
6. Öncelik diyagramında belirtilen sıra ve paralellikte operasyonlar tamamlanmaktadır.
7. Kurulan modelde her operatörün her operasyona atanabileceği varsayılmıştır.
8. Kurulan modelde bir istasyona birden fazla operasyon ve operatör atanabilmektedir.
9. Kurulan modelde bir operasyon bölünemez ve yalnızca bir istasyona atanabilir.
10. Kurulan modelde bir operatör yalnızca bir istasyona atanabilir.
11. Kurulan modelde bir istasyona yalnızca bir operatör atanabilir.
12. Kurulan modelde her operasyonun gerçekleştirilebileceği potansiyel montaj istasyonları önceden belirlenmiştir.
13. Toplam işçilik için ayrılacak bütçe önceden belirlenmiş olup, 40.000 TL'dir.

Notasyonlar

N: Operasyon sayısı $i, j = 1, 2, 3 \dots N$

W: Operatör sayısı $w = 1, 2, 3 \dots W$

S: Önceden belirlenmiş iş istasyonu sayısı $s = 1, 2, 3 \dots S$

d_{jw} : Beceri seviyesi w olan operatörün j operasyonunu gerçekleştirme maliyeti

t_{jw} : Beceri seviyesi w olan işçinin j operasyonunu gerçekleştirme süresi

a_{js} : j operasyonunun s istasyonunda gerçekleştirilebilirliği

pre_j : operasyon j'nin genel öncelik diyagramındaki öncelikli işler kümesi

Karar değişkenleri

İki tip karar değişkeni kullanılmıştır. Modelde kullanılan karar değişkenlerinden ilki operasyonların, ikincisi işçilerin farklı iş istasyonlarına atanması içindir.

X_{sj} : 1, eğer operasyon j, istasyon s'ye atanmış ise; 0, diğer durumlar.

Y_{sw} : 1, eğer işçi w, istasyon s'ye atanmış ise;

0, diğer durumlar.

Model:

$$\min z = \max_s \{ \sum_{j=1}^N \sum_{w=1}^W t_{jw} \cdot X_{sj} \cdot Y_{sw} \} \quad (4.1)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{s=1}^S s \cdot X_{sj} \geq \sum_{s=1}^S s \cdot X_{si} \quad \forall j, \forall i \in \text{pre}_j \quad (4.2)$$

$$\sum_{s=1}^S X_{sj} = 1 \quad \forall j \quad (4.3)$$

$$\sum_{j=1}^N X_{sj} \geq 1 \quad \forall s \quad (4.4)$$

$$\sum_{s=1}^S Y_{sw} = 1 \quad \forall w \quad (4.5)$$

$$\sum_{w=1}^W Y_{sw} = 1 \quad \forall s \quad (4.6)$$

$$\sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^N \sum_{w=1}^W d_{jw} \cdot Y_{sw} \leq 40000 \quad (4.7)$$

$$a_{js} \geq X_{sj} \quad \forall s, j \quad (4.8)$$

Amaç fonksiyonu, ele alınan montaj hattı çevrim süresinin minimizasyonunu hedeflemektedir. İlk kısıt, operasyonlar arası öncüllük ilişkisini uygulamaktadır. İkinci kısıt, her bir operasyonun tek bir istasyonda gerçekleştirilmesini sağlar (Operasyonlar bölünemez). Üçüncü kısıt her bir iş istasyonuna en az bir operasyonun atanmasını sağlar. Dördüncü kısıt, bir işçinin yalnızca bir istasyona atanmasını sağlar. Beşinci kısıt, bir istasyona yalnızca bir işçinin atanmasını sağlar. Yedinci kısıt ise bir iş istasyonunda gerçekleştirilecek operasyon veya operasyonlara atanacak işçilerin, ilgili iş istasyonunda gerçekleştirilecek operasyon veya operasyonları tamamlamak için gerekli toplam işçilik maliyetlerinin montaj hattı için belirlenen toplam işçilik bütçesini aşmamasını sağlar. Son kısıt, her bir operasyonun gerçekleştirilebilirliği açısından uygun olan istasyona atanmasını sağlar.

Tez kapsamında ele alınan montaj hattında, tek tip uçak komponenti üretimi yapılmaktadır. Geliştirilen matematiksel model, küçük boyutta veri seti için uygulanmıştır. Kullanılan veri setinde 7 adet montaj istasyonu, beceri seviyeleri farklı 10 adet işçi ve 17 farklı montaj operasyonu ele alınmıştır. İşçilerin saatlik çalışma ücretleri her bir işçi için aynıdır ve sabittir.

Montaj operasyonları için Çizelge 4.1'deki matris gösterilmiştir..

Çizelge 4.1: Montaj hattı operasyonları öncelik matrisi.

Operasyonlar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Her bir operasyonun gerçekleştirilme potansiyeli olan montaj istasyonları Çizelge 4.2'dedir.

Çizelge 4.2: Operasyonların istasyonlarda gerçekleştirilebilirliği.

Operasyon/ İstasyon	1	2	3	4	5	6	7
1	1	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0	0
4	0	1	1	0	0	0	0
5	0	1	1	0	0	0	0
6	0	1	1	0	0	0	0
7	0	1	1	0	0	0	0
8	0	0	0	1	1	0	0
9	0	0	0	1	1	0	0
10	0	0	0	1	1	0	0
11	0	1	1	0	0	0	0
12	0	1	1	0	0	0	0
13	0	1	1	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	1	0
15	0	0	0	0	0	1	0
16	0	0	0	0	0	0	1
17	0	0	0	0	0	0	1

Aynı montaj operasyonlarının tamamlanma süresi operasyonun atandığı operatörlerin farklı beceri seviyelerine sahip olmaları nedeniyle farklılık göstermektedir. Beceri seviyeleri 1-5 aralığında kategorize edilerek belirli çarpım katsayılarıyla operasyon sürelerini ve işçilik maliyetini etkilemektedir.

Beceri seviyelerine karşılık gelen çarpım katsayıları Çizelge 4.3'tedir.

Çizelge 4.3: Beceri seviyesine karşılık gelen çarpım katsayısı.

Beceri Seviyesi	Çarpım Katsayısı
1	3
2	2,5
3	2
4	1,5
5	1

Her bir operatörün her bir operasyonu tamamlama süresi Çizelge 4.4'tedir.

Çizelge 4.4: Her bir operatörün her bir operasyonu gerçekleştirme süreleri.

Operasyon/ Operatör	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	70	70	70	70	105	105	140	140	105	105
2	70	70	70	70	105	105	140	140	105	105
3	70	70	70	70	105	105	140	140	105	105
4	60	60	60	60	90	90	120	120	90	90
5	30	30	30	30	45	45	60	60	45	45
6	23	23	23	23	35	35	46	46	35	35
7	8	8	8	8	11	11	15	15	11	11
8	68	68	68	68	90	90	45	45	90	90
9	80	80	80	80	106	106	53	53	106	106
10	68	68	68	68	90	90	45	45	90	90
11	20	20	20	20	26	26	13	13	26	26
12	20	20	20	20	26	26	13	13	26	26
13	26	26	26	26	13	13	20	20	13	13
14	15	15	15	15	8	8	11	11	8	8
15	15	15	15	15	8	8	11	11	8	8
16	100	100	100	100	50	50	75	75	50	50
17	130	130	130	130	65	65	98	98	65	65

Her bir operatörün her bir operasyonu tamamlaması için gerekli işçilik maliyeti

Çizelge 4.5'tedir.

Çizelge 4.5: Her bir operatörün her bir operasyonu gerçekleştirme maliyetleri.

Operasyon/ Operatör	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1750	1750	1750	1750	2625	2625	3500	3500	2625	2625
2	1750	1750	1750	1750	2625	2625	3500	3500	2625	2625
3	1750	1750	1750	1750	2625	2625	3500	3500	2625	2625
4	1500	1500	1500	1500	2250	2250	3000	3000	2250	2250
5	750	750	750	750	1125	1125	1500	1500	1125	1125
6	575	575	575	575	862,5	862,5	1150	1150	862,5	862,5
7	187,5	187,5	187,5	187,5	281,25	281,25	375	375	281,25	281,25
8	1687,5	1687,5	1687,5	1687,5	2250	2250	1125	1125	2250	2250
9	1987,5	1987,5	1987,5	1987,5	2650	2650	1325	1325	2650	2650
10	1687,5	1687,5	1687,5	1687,5	2250	2250	1125	1125	2250	2250
11	487,5	487,5	487,5	487,5	650	650	325	325	650	650
12	487,5	487,5	487,5	487,5	650	650	325	325	650	650
13	650	650	650	650	325	325	487,5	487,5	325	325
14	375	375	375	375	187,5	187,5	281,25	281,25	187,5	187,5
15	375	375	375	375	187,5	187,5	281,25	281,25	187,5	187,5
16	2500	2500	2500	2500	1250	1250	1875	1875	1250	1250
17	3250	3250	3250	3250	1625	1625	2437,5	2437,5	1625	1625

Çizelge 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 ve 4.5'teki veriler kullanılarak geliştirilen karma tamsayılı lineer olmayan programlama ile kurulan matematiksel model GAMS ile çözülmüştür.

Küçük veri seti kullanılarak çözülen MHDİAP için elde edilen en iyi çözümde çevrim süresi değeri 210 saat olarak 0,297 saniyede belirlenmiştir. Atama sonucu elde edilen elde edilen en iyi çözüm Çizelge 4.6, Çizelge 4.7'tedir.

Çizelge 4.6: İstasyonlara atanan operasyonlar.

Operasyon/ İstasyon	1	2	3	4	5	6	7
1	1	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0	0
4	0	0	1	0	0	0	0
5	0	1	0	0	0	0	0
6	0	1	0	0	0	0	0
7	0	1	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	1	0	0
9	0	0	0	1	0	0	0
10	0	0	0	1	0	0	0
11	0	0	1	0	0	0	0
12	0	0	1	0	0	0	0
13	0	0	1	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	1	0
15	0	0	0	0	0	1	0
16	0	0	0	0	0	0	1
17	0	0	0	0	0	0	1

Çizelge 4.7: İstasyonlara atanan operatörler.

Operatör/ İstasyon	1	2	3	4	5	6	7
1	1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	1	0
3	0	0	1	0	0	0	0
4	0	0	0	1	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0
7	0	1	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	1

5. MONTAJ HATTI DENGELEME VE İŞÇİ ATAMA PROBLEMİNİN GENETİK ALGORİTMA İLE ÇÖZÜLMESİ

5.1. Genetik Algoritma İle İlgili Genel Bilgiler

Genetik algoritmalar (GA), biyolojik evrimi referans alan sezgisel arama yöntemleridir. John Holland 1975 yılında ilk kez makine öğrenmesi ile çalışmıştır. Genetik algoritmalar, evrimsel prosesi ve doğal seçim yasalarını simüle eden optimizasyon olasılığı arama metodolojisidir. Populasyon arama stratejisinde birincil karakter, popülasyondaki bireyler arasında alışverişidir.

Genetik algoritmaların diğer metasezgisel algoritmalarından en büyük farkı, tek güncel çözümü tutmak yerine, optimale yakın bir çözüm grubunu tutmaktır. Genetik algoritmalar, doğal seçilime bağlı olarak “hayatta kalma” ilkesiyle birçok nesil boyunca popülasyonların evrimsel sürecine olanak tanıyarak uyarlanabilen metotlardır.

Genetik algoritmalar en iyi çözüme ulaşmayı hedeflerken bir önceki bulduğu en iyi çözüm ile sürekli iyileştirme halindedir. Uygunluk (fitness) fonksiyonu ile iyi çözümleri belirlemeye çalışır. Çaprazlama (crossover) ve mutasyon (mutation) ile yeni çözümler üretilir. Genetik algoritmalar bir grup çözüm ile çalışmakta ve bu sırada iyi çözümleri seçerken kötü çözümleri elemektedir. Seçim faktörü genetik algoritmaların ayırıcı özelliklerinden biridir.

Genetik algoritmalar sayesinde geleneksel yöntemlerle çözümü imkansız ve zor olan problemler daha kısa işlem süresinde çözülmektedir. Mekanik öğrenme, gezgin satıcı problemi, çizelgeleme problemi, montaj hattı dengeleme problemi gibi birçok problem tipinde kullanılmaktadır (Kocakoç ve Pulat, 2017).

5.2. GA Kullanım Alanları

Optimum çözümleri çok zor olan karmaşık problemlerin çözümleri için genetik algoritmalar kullanılır. Farklı problem tiplerinde kullanılacak kadar geniş bir alana sahip olan genetik algoritmalar, genel yapı olarak basittir. Bazı kullanım alanları aşağıdaki gibidir (Mitchell, 1996):

- Bağışık sistemler,
- Ekoloji,
- Yığın genetiği,
- Optimizasyon problemleri,
- Yapay zeka çalışmaları,
- Bilgisayar işlemci devre tasarımı,
- Makine öğrenmesi
- Ekonomik modellerin geliştirilmesi
- Sosyal sistemler,
- Otomatik programlama,
- Evrim ve öğrenme.

5.3. GA Temel Kavramlar

Gen: organizmanın karakterlerinin atanmasını sağlayan ve kalıtsal molekülde yer alan

kalıtsal birimlere denir (Oraler, 1990).

Kromozom (Birey): Temsil ettiği çözüm ile ilgili bilgi içeren kromozom, birçok genin birleşerek ortaya çıkardığı dizidir. Belli bir parametre kodlama sistemi ile oluşturulan bir diziden meydana gelmişlerdir. Bir dizi ile bir sayıya işaret edebildiği gibi, bu diziye ait bit olarak ifade edilen sayılardan her biri çözümün bir karakteristiğini gösterebilir (Engin, 2001).

Kromozomların kritik önem taşıması nedeniyle, bilgisayar ortamında net bir şekilde doğru ifade edilmesi gerekmektedir. Hangi kısmında hangi tür bilgi ve anlam taşıyacağı algoritmayı anlamak açısından önemlidir.

Genom: Kromozom bütünüyle ifade edilen ve genetik materyal olarak adlandırabileceğimiz yapıdır. Genotip ise, genom içinde yer alan genlerin belirli bir

kısmına denmektedir. Fenotip olarak adlandırdığımız terim ise genotipin doğum sonrası ortaya çıkan fiziksel özellikleridir. Buna örnek olarak zihinsel özellikler, zeka vb. verilebilir (Özkaya, 2002).

Popülasyon: Kromozomların oluşturduğu geçerli alternatif bir çözüm kümesi olarak ifade edilir.. Birey sayısı diğer adıyla kromozom sayısı sabit tutulmaktadır. Birey sayısındaki artış iterasyon sayısında azalmaya yol açar ve çözüm süresi azalır. popülasyon büyüklüğü, problem büyüklüğüne göre (10 ile 100) arasında alınabilir (Ghedjati, 1999).

Seçim (Selection): Farklı metotlar ile mutasyona ve çaprazlama işlemine alınacak bireylerin popülasyondan seçilmesidir. Literatürde en çok yer alan seçim metodu rulet tekerleği seçimidir. Algoritmanın çalışma performansını etkileyen önemli faktörlerden biri seçimdir. çalışma hızını dolaylı olarak etkiler (Özkan, 2003).

Elitizm: Popülasyondaki bireyler içerisinde yüksek uygunluk değerine sahip olanın kendinden bir sonraki kuşağa aktarılama durumu vardır. Bu durumu önlemek ve elit bireylerin bir sonraki nesile aktarılabilmesi için, belirlenen elit birey veya bireyler çaprazlama veya mutasyon gibi işlemlere uğramadan bir sonraki nesile aktarılır (Kahraman ve Özdağlar, 2004).

Evrim (Evolution): Çaprazlama veya mutasyon gibi işlemlerin uygulanarak popülasyondaki genetik bilgiler üzerindeki değişimi ele alan genetik süreçtir.

Evrilmek: Genetik çeşitlilik yaratma yeteneği ile evrim sürecinin gerçekleşmesidir.

Kodlama: GA için önemli bir kısım olan kodlama, geliştirilen algoritmanın hızlı, doğru ve güvenilir çalışmasında büyük role sahiptir.

Uygunluk Fonksiyonu ve Değeri: Popülasyonda yer alan iyi özelliklere sahip kroozomların bir sonraki nesile aktarılması amaçlı oluşturulan uygunluk fonksiyonu ile değerlendirme yapılır.

Uygunluk fonksiyonu kullanılarak elde edilen uygunluk değeri, ulaşılan çözümün kalitesini gösterir. İlgili kromozomun uygunluk değerini, fonksiyonun sonucu verir. GA'nın gücüne dikkat çeken önemli etkenlerden uygunluk değeri, yüksek değerleri içeren kromozomların, kendilerinden sonraki kuşağa aktarılma olasılığını da artırır. Böylece iyi olanlar korunarak daha iyi bir nesil ortaya çıkmaktadır (Yücel, 2016).

5.4. GA Temel Çalışma Prensibi

Genetik algoritmaların kullanımında başarılı çözüme ulaşabilmek için gen gösterimi, uygunluk fonksiyonu tasarımı ve gen operatörlerinin olasılığı kritiktir. Temel adımları şu şekilde sıralayabiliriz (Kahraman, 2004):

Adım 1 Başlangıç: n tane kromozoma sahip bireyler ile başlangıç popülasyonunun oluşturulması.

Adım 2 Uyumluluk: Uygunluk fonksiyonu değerinin her kromozom için bulunması

Adım 3 Seçim: İki ebeveynin uygunluk değerleri ile turnuva ve rulet tekerleği gibi seçme operatörlerinden problem tipine uygun olanın seçilmesi.

Adım 4 Çaprazlama: Yeni bireylerin oluşturulması amacıyla uygunluk değeri iyi olan bireylerin eşleştirilmesi.

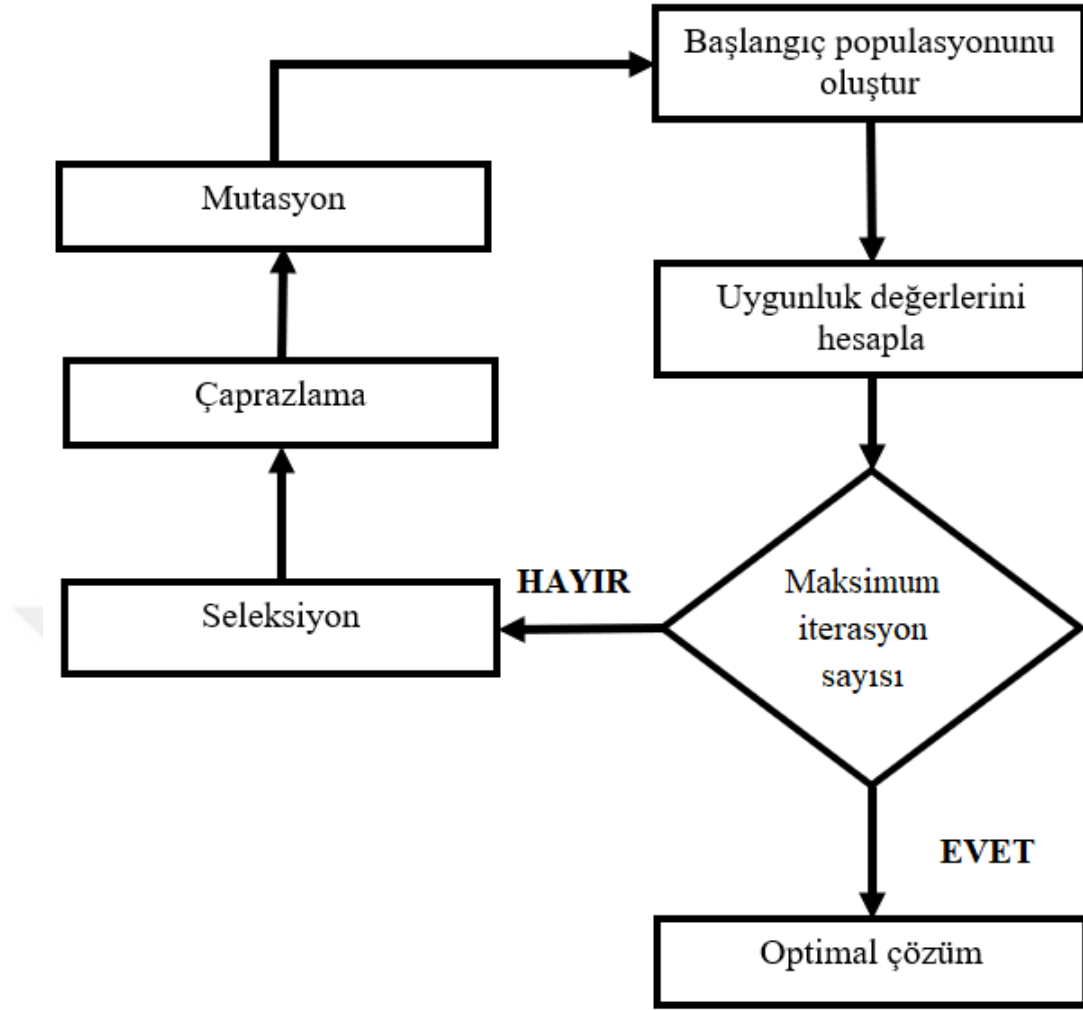
Adım 5 Mutasyon: Seçilen her bir bireyin kromozomlarına ait bir bitin değiştirilmesi.

Adım 6 Elitizm: Yeni popülasyon oluşturulurken mevcut popülasyondaki yüksek uygunluk değerine sahip bireyin bir sonraki popülasyona aktarılması.

Adım 7 Yeni topluluk havuzu: Eski popülasyonda yer alan bireylerin elenerek, yeni bireylerin oluşturduğu bir havuza aktarılması.

Adım 8 Sonuç: İstenilen sonucu veren değer popülasyondak en iyi birey ile gösteriliyorsa algoritmanın sona erdirilmesi. Problem tipine göre istenilen sonuç belirlenerek genetik algortima durdurulur. Durdurucu parametrelere örnek olarak jenerasyon sayısı ve değişiklik olmayacak jenerasyon sayısı verilebilir.

Adım 9 Döngü: Yeni jenerasyona başlaması için 2. Adıma dönülmesi.



Şekil 5.1: Genetik algoritma işlem adımlarının şematik gösterimi.

5.5. Genetik Algoritma Parametreleri

Kullanılan parametrelere göre genetik algoritmanın etkinliğini değiştirmektedir (Chen, 1995).

Başlangıç Popülasyonu:

Sonucun kısa zamanda bulunmasını yüksek değerli popülasyon büyüklüğü seçimi olumsuz etkiler. Yapılan araştırmalar sonucu kromozomların parametre kodlamasından etkilendiğini ortaya koymuştur. Popülasyon büyüklüğünün olması gereken değeri 20-100 arası verilse de sonradan 100-300 arasına kadar arttırılmıştır (Engin, 2002).

Çaprazlama Olasılığı (Pc):

Çaprazlama (Crossover) yöntemi Genetik Algoritmaların sürekliliğini sağlar. Bu parametreyle iki kromozom arasında rassal olarak gen alışverişi gerçekleşir ve her

ebeveynden alınan belirli genotipler ile farklı genotiplerde çocuk kromozomlar oluşur.

Çaprazlama sonucu oluşan yeni birey, her ebeveynden bazı özellikleri almış ve böylece ebeveynlerin kopyası olmuştur. Çaprazlama (Crossover) çeşitli şekillerde yapılabilir. Çaprazlama noktası birden fazla seçilerek, değişik çaprazlamalar ile daha iyi performans almak amaçlanır (Kurt ve Semetay, 2001).

Çaprazlama olmadığı durumda yeni bireyler ebeveynlerin kopyası olacaktır. Eğer çaprazlama olursa, yeni bireyler ebeveynlerin kromozom yapısının belirli bir kısmına sahip olur. Çaprazlama oranı %100 olduğu durumda, tüm yeni bireyler ebeveynlerden üretilir. Tam tersi durumda yani çaprazlama oranı %0 olması halinde yeni bireyler eski popülasyonun tam kopyası olur.

Bir önceki popülasyondaki yüksek uyumluluk değerine sahip bireylerin, kendinden sonraki jenerasyona aktarılması hedeflenir. Çaprazlama oranı problem tipine göre farklılık göstermektedir. Araştırmalar sonucu %60 olasılık ideal olarak belirlenmiştir.

Mutasyon Olasılığı (Pm):

Mutasyon olmadığı durumda çaprazlama ile elde edilen bireylerin tümü yeni jenerasyonu oluşturur. Mutasyon ile kromozom yapısının bir kısmı değişiklik gösterir. Mutasyon oranının %100 olması tamamen değişiklik olacağını ifade eder. Mutasyon oranı popülasyonda yer alan, mutasyona uğrayacak kromozom bölümlerinin yüzde olarak ne sıklıkta mutasyona uğrayacağını belirtir. Çaprazlama oranının aksine, mutasyon oranının düşük olması istenir.

5.6. GA'da Kullanılan Operatörler

GA için üç operatör aşağıda verilmiştir:

- Seçim operatörü
- Mutasyon operatörü
- Çaprazlama operatörü

Seçim Operatörü: Kromozomların uygunluk değerlerine göre kromozomlar eşlenmektedir. Düzenli durum seçimi, Sıralı seçim, Rulet çarkı, ve Elitizm seçimi gibi metotlar kullanılarak seçim yapılmaktadır. Uygunluk değerleri yüksek olan

kromozomlar ile yeni jenerasyon oluşturmak ve uygunlukları küçük olan kromozomların elenmesini amaçlamaktadır (Cengiz, 2004).

Rulet Çarkı

Rulet etrafına kromozomların uyumluluk fonksiyonuna göre gruplanması sağlanır. Belirlenen kriterlerden birine uyan bireylerin seçilmesi için uyumluluk fonksiyonu kullanılır. Çark döndürülerek herhangi bir dilimde durması ön görülür. Kromozoma ait dilim ne kadar fazla ise, okun o dilimi gösterme olasılığı daha yüksektir (Cengiz, 2004).

Sıralı Seçim

Kromozomlar arası uyumluluk çok fazla değişiklik gösteriyorsa rulet seçimi yerine Sıralı seçim kullanılabilir. Sıralı seçimde öncelik vermek amacıyla uygunluk değeri en düşük olan kromozoma 1, bir sonrakine 2 değeri atanır. Bu yöntem, çözümün daha geç yakınsamasına neden olsa da kötü uyumluluk değerlerine sahip kromozomların da seçilme şansını artırır (Obitko, 1998).

Kararlı Durum Seçimi

Ebeveyn belirlenmesinde özel bir yöntem olmamakla birlikte, kromozomların çoğunun bir sonraki jenerasyona aktarılmasını sağlama düşüncesi bu seçimi tercih edilebilir yapar. Yeni bireyleri oluşturmak için her bir nesilde yüksek uyumluluk değerine sahip bazı kromozomlar bu seçim ile belirlenir. Yeni jenerasyona uyumluluk değeri düşük kromozomların aktarılması engellenerek, kalan kromozomlar ile yeni jenerasyon oluşturulur (Obitko, 1998).

Elitizm Seçimi

En iyi kromozomun atılacağı büyük bir değişim yapan çaprazlama ve mutasyonun aksine elitizmde ilk olarak en iyi kromozomun kopyası oluşturulur. Diğer yöntemlere benzer şekilde elitizm adımları gerçekleştirilir. Elitizm, genetik algoritmanın performansını çok hızlı olarak arttırarak, en iyi kromozomun kaybolmasını engeller (Obitko, 1998).

Mutasyon Operatörü: Genetik algoritmada yer alan rastlantısal bir işlemdir. Lokal bir en iyi noktaya takılmayı engeller. Yeni nesilde yer alacak yeni bireylerin içerdiği bilgiler, önceki nesildeki ebeveynlerin içerdiği bilgilerden bağımsızdır. Rastlantısal

bir değişim söz konusudur ve kısıtlamayı önleyen bir işlemdir. Seçilen düğümler yer değiştirir (Obitko, 1998).

Çaprazlama Operatörü: Genetik algoritmanın doğru, güvenilir ve hızlı çalışmasını sağlayan gerçekleştirilmesi gerekli proseslerden biridir.

Çaprazlama operatörü aşağıdaki üç kademedede gerçekleştirilir (Sivanandam and Deepa, 2008):

1. Rassal olarak eşleşme sağlanması için iki kromozom dizisinden yeni çift seçerek seçim operatörü çalıştırılır.
2. Çaprazlanacak nokta rassal olarak seçilir.
3. Nokta değerleri çaprazlama sonucu iki dizi arasında değiştirilir.

Seçim operatörü kullanılarak oluşturulan çiftleşme havuzunda, çaprazlama sonucu ebeveyn bireyler arasında gen alışverişi gerçekleştirilir. Böylece yeni nesil, önceki popülasyonda bulunmayan bireylerden oluşarak çeşitlilik ortaya çıkar (Yücel, 2016).

5.7. Problem Çözümü İçin Önerilen GA

5.7.1. Problem tanımı

Uygulama kapsamında bir savunma sanayii firmasında üretilen uçak komponenti üretim süreci incelenmiştir. MHDİAP çözümünde, GA kullanılmıştır.

Önceki bölümde matematiksel model ile uçak paneline ait küçük veri seti çözümlenmiştir. Uçak orta gövdesine ait büyük ölçekteki veriler alınarak genetik algoritma ile en iyi çözüm elde edilmeye çalışılmıştır.

Varsayımlar:

1. Tek modellenli montaj üretim hattı ele alınmıştır.
2. Montaj operasyonlarını tamamlayacak her bir operatör farklı beceri seviyesine sahiptir (1-5 aralığında)
3. Operasyon süreleri deterministik olarak bilinmektedir.
4. Operasyonlar arasındaki öncelik ilişkileri bilinmektedir.
5. Montaj operasyonlarınının tamamlanma süreleri atanan operatörün beceri seviyesine göre farklılık göstermektedir.
6. Öncelik diyagramında belirtilen sıra ve paralellikte operasyonlar tamamlanmaktadır.

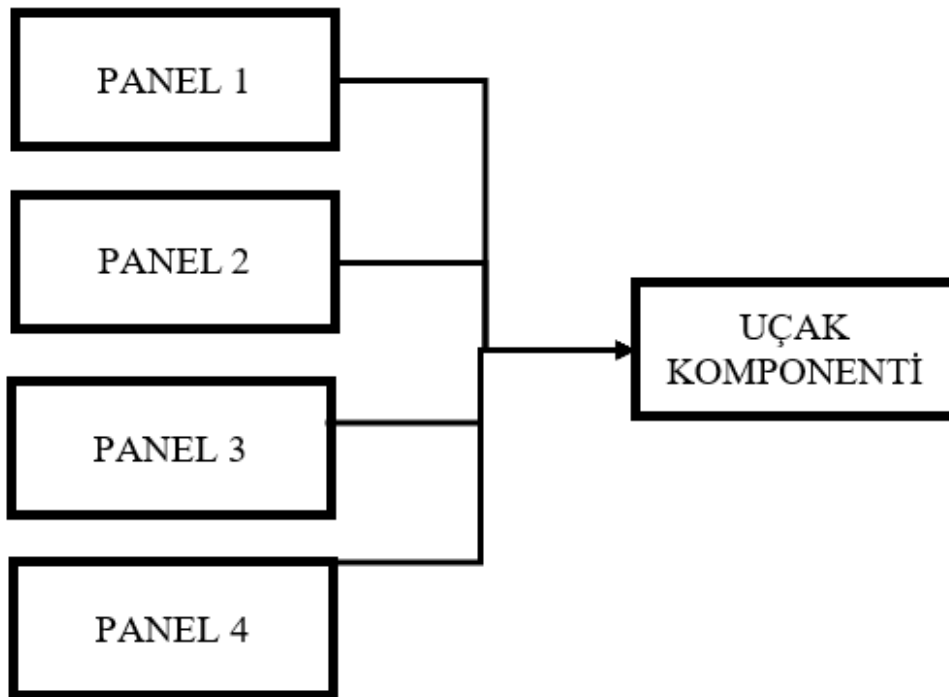
7. Kurulan modelde her operatörün her operasyona atanabileceği varsayılmıştır.
8. Kurulan modelde bir istasyona birden fazla operasyon ve operatör atanabilmektedir.
9. Kurulan modelde bir operasyon bölünemez ve yalnızca bir istasyona atanabilir.
10. Kurulan modelde bir operatör yalnızca bir istasyona atanabilir.
11. Kurulan modelde bir istasyona yalnızca bir operatör atanabilir.
12. Kurulan modelde her operasyonun gerçekleştirilebileceği potansiyel montaj istasyonları önceden belirlenmiştir.
13. Toplam işçilik için ayrılacak bütçe önceden belirlenmiş olup, 40.000TL'dir.

5.7.2. Problemin genetik algoritma çözümü

Genetik algoritma, çözümü zor ve verileri büyük ölçekteki problemlerin çözümü için metasezgisel yöntemlerden biri olarak kullanılmıştır. Montaj hattı dengeleme ve işçi atama problemlerinin probleme ait uygun parametre seçimi ve oluşturulan algoritma büyük önem taşımaktadır.

Probleme yer alan uçak komponenti montaj hattında panel operasyonları ve panellerin birleşim operasyonları gerçekleştirilmektedir. Toplamda 40 operasyon, 28 operatör ve 25 istasyondan oluşan MHDİAP çözümü için bir algoritma önerilmiştir.

Şekil 5.2'de çalışmaya konu alınan montaj hattına ait iş akışı yer almaktadır.



Şekil 5.2: Uçak komponenti bileşenleri.

Algoritma Python 3.7.6 programı ile kodlanmıştır. Algoritma adımları açıklanmıştır ve algoritma parametrelerinin değer seçimi belirtilerek sonuçlar verilmiştir.

Öncelikle kromozomların kodlama yöntemine karar verilmiştir. Çalışmada ele alınan problem, montaj hattında gerçekleştirilen 40 operasyon için kromozom uzunluğu 40 gen olacak şekilde tasarlanmıştır.

Operasyonlar için 1-5 aralığında öncelik değeri verilmiştir. Her bir operasyonun gerçekleştirilebileceği montaj istasyonları önceden belirlenmiştir. Beceri seviyesine göre montaj operasyon süreleri montaj hattında çalışan işçiler arasında farklılık göstermektedir.

Problemde kullanılan bilgiler Çizelge 5.1, 5.2 ve 5.3'tedir.

Çizelge 5.1: İstasyon ve operasyon uygunluk matrisi.

OPERASYON / İSTASYON	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25			
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
5	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
6	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
7	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
8	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
9	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
10	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
11	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
12	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
13	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
14	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
15	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0			
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0			
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0			
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0			
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0			
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0			
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0			
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1		
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1		
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1		
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1		
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0		
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0		
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0		
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0		
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0

Çizelge 5.2: Beceri seviyesi ve katsayı ilişkisi.

Beceri Seviyesi	Katsayı
1	3
2	2,5
3	2
4	1,5
5	1

Çizelge 5.3: İşçi ve operasyon süre ilişkisi.

İşçi/ Operasyon n no	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	55	110	55	110	110	110	110	55	55	110	110	110	110	110	110	110	110	110	82,5	82,5	82,5	82,5	82,5	82,5	110	110	110	110
2	40	80	40	80	80	80	80	60	40	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	100	100	100	100	100
3	22,5	30	22,5	30	30	30	30	22,5	15	30	30	30	30	30	30	30	30	30	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	22,5
4	15	30	15	30	30	30	30	15	22,5	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5
5	90	120	90	120	120	120	120	60	90	120	120	120	120	120	120	120	120	120	60	60	120	120	120	120	120	120	150	150
6	45	90	45	90	90	90	90	45	45	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	67,5	67,5
7	40	80	40	80	80	80	80	40	40	80	80	80	80	80	80	80	80	80	40	40	40	40	40	60	60	60	60	40
8	60	60	60	60	80	80	80	80	80	100	100	100	100	100	100	100	100	100	80	80	80	80	80	100	100	100	100	100
9	52,5	52,5	52,5	52,5	52,5	52,5	52,5	35	35	35	35	35	35	70	70	70	70	35	35	70	70	70	70	70	70	70	87,5	87,5
10	125	125	125	125	125	100	100	100	100	100	75	75	75	75	50	50	50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	75	75
11	120	120	120	120	150	150	150	150	90	90	90	90	90	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	90	90	90	90	60
12	75	75	75	75	60	60	60	60	45	45	45	45	60	60	60	60	45	45	60	60	60	60	60	75	75	75	75	75
13	80	40	80	40	60	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	40	40	80	80	80	80	80	80	80	100	100
14	30	15	30	15	22,5	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	22,5	22,5
15	50	25	50	25	37,5	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	25	25	25	25	25	25	37,5	37,5	37,5	37,5	25
16	30	22,5	30	22,5	15	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5
17	70	52,5	70	52,5	35	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	35	35	70	70	70	70	70	70	70	87,5	87,5
18	55	55	55	55	55	82,5	82,5	82,5	82,5	55	55	82,5	55	82,5	82,5	82,5	82,5	82,5	82,5	82,5	110	110	110	110	110	110	110	110
19	75	75	75	75	75	60	60	60	60	30	30	30	30	30	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	30
20	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
21	30	30	30	30	15	30	30	30	15	22,5	15	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	22,5	22,5
22	60	60	60	60	60	60	60	60	60	30	45	30	60	60	60	60	60	60	60	30	30	30	30	30	45	45	45	30
23	40	40	40	40	40	20	40	40	40	20	30	30	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	20	30	40	40
24	80	80	80	80	80	60	80	80	80	60	40	60	80	80	80	80	80	80	60	80	80	80	80	60	40	40	80	80
25	110	110	110	110	110	82,5	110	110	110	82,5	55	55	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	55	82,5
26	30	30	30	30	30	60	60	60	60	60	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75
27	60	60	60	60	60	80	80	80	80	80	80	80	80	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
28	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	15	22,5	30	30	30	30	15	30	30	30	30	30	30	30	15	22,5	30
29	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	30	45	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
30	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	20	20	40	40	40	20	40	40	40	40	40	40	40	40	20	40
31	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	40	60	60	60	60	40	40	40	40	40
32	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	82,5	55	110	110	110	55	110	110	110	110	110	110	110	110	55	110
33	60	60	60	60	60	45	60	60	60	45	30	45	60	60	60	60	60	45	60	60	60	60	45	30	30	60	60	60
34	80	80	80	80	80	60	80	80	80	60	40	40	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	40	60	80
35	110	110	110	110	110	55	110	110	110	110	110	110	110	110	55	55	82,5	110	110	110	110	110	110	110	110	82,5	55	110
36	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	60	60	120	90	90	90	90	90	60	60	60	60	60	60
37	100	100	100	100	100	50	100	100	100	100	100	100	100	100	50	75	50	100	100	100	100	100	100	100	100	50	50	100
38	90	90	90	90	90	45	90	90	90	90	90	90	90	90	67,5	67,5	45	90	90	90	90	90	90	90	90	67,5	45	90
39	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	30	30	60	45	45	45	45	45	45	45	45	30	30	
40	45	45	45	45	45	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5	45	45	45	45	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5

Python 3.7.6’da tüm bu veriler ve kısıtlar modelin çözülmesiyle sonuçların kaydedileceği şekilde kodlanarak genetik algoritma sınıfı (class) altında toplanmıştır. Genetik algoritma sınıfı (class) içinde fonksiyonlar; rastgele olarak kromozom yaratılması ve kromozomun içinden operasyon geni çıkarılarak kalan genlerin rastgele olarak sıralanması Fonksiyonlar bu şekilde kodlanarak, rastgele olarak ilk başlangıç kromozom oluşturulmuş ve yeni kromozomlar oluşturulmuştur.

Uygulanan algoritmada problem çözümü için durdurma kriteri jenerasyon sayısı kabul edilmiştir. Elde edilen jenerasyon sayısı iterasyon sayısına eşitleninceye kadar algoritma çalışmaya devam etmektedir. Jenerasyon sayısı, iterasyon sayısına eşitlendiğinde, popülasyondaki en iyi olan çözüm değeri, problemin en iyi sonucunu verecektir.

GA parametre değerlerini tespit etmekte geçerli net bir yöntem bulunmadığından, farklı kombinasyonlar denenmiştir. Ek.1’de yer alan tabloda deneye dahil edilen 48 adet farklı kombinasyon için duyarlılık analizi yapılmıştır.

En iyi işlem değerini elde ettiğimiz genetik algoritma probleminde; popülasyon için 1000 kromozom, 1000 iterasyon, çaprazlama oranı 0,9, mutasyon için oran 0,2, son olarak elit yüzde 10 olarak parametre değerleri alınmıştır.

Uçak komponenti MHDP için geliştirilen genetik algoritma sonucunda elde edilen en iyi çözüm Şekil 5.3’de verilmiştir. Çözüm 2 vektörlü olarak verilmiştir; ilk vektör operasyonların atandığı istasyonları göstermektedir. İkinci vektör ise operasyonlara atanan işçileri göstermektedir. Elde edilen en iyi çözümde amaç fonksiyonu değeri 445 olarak hesaplanmıştır.

3	KROMOZOM :					
4	[2, 2, 2, 3, 5, 5, 6, 6, 6, 6, 6, 6, 6, 8, 9, 10, 13, 13, 12, 13, 14, 16, 18, 17, 17, 17, 17, 20, 22, 23, 23, 23, 23, 23, 22, 22, 21, 22, 21, 21]					
5	[3, 9, 8, 3, 20, 3, 8, 3, 9, 15, 22, 12, 20, 23, 2, 2, 2, 10, 10, 23, 11, 19, 19, 5, 11, 4, 14, 6, 13, 13, 13, 16, 26, 25, 7, 27, 17, 7, 17, 1]					
6	ÖNCELİK KOMPONENT	YAPILABİLECEĞİ	İSTASYON	OPERASYON NO	ATANAN İŞÇİ	İŞÇİ SÜRE
7	1	LOWER	[1, 2]	1	3	55.0
8	1	LOWER	[1, 2]	2	9	40.0
9	1	LOWER	[1, 2]	3	8	22.5
10	2	LOWER	[3]	4	3	15.0
11	3	LOWER	[4, 5]	5	20	60.0
12	3	LOWER	[4, 5]	6	3	45.0
13	4	LOWER	[5, 6]	7	8	40.0
14	4	LOWER	[5, 6]	8	3	60.0
15	4	LOWER	[5, 6]	9	9	35.0
16	4	LOWER	[5, 6]	10	15	50.0
17	4	LOWER	[5, 6]	11	22	60.0
18	4	LOWER	[5, 6]	12	12	45.0
19	4	LOWER	[5, 6]	13	20	40.0
20	KOMPONENT SÜRESİ: 190.0					
21	ÖNCELİK KOMPONENT	YAPILABİLECEĞİ	İSTASYON	OPERASYON NO	ATANAN İŞÇİ	İŞÇİ SÜRE
23	1	UPPER	[7, 8]	14	23	30.0
24	2	UPPER	[9]	15	2	25.0
25	3	UPPER	[10, 11]	16	2	22.5
26	4	UPPER	[12, 13]	17	2	52.5
27	4	UPPER	[11, 12, 13]	18	10	82.5
28	4	UPPER	[12, 13]	19	10	30.0
29	4	UPPER	[12, 13]	20	23	60.0
30	KOMPONENT SÜRESİ: 190.0					
31	ÖNCELİK KOMPONENT	YAPILABİLECEĞİ	İSTASYON	OPERASYON NO	ATANAN İŞÇİ	İŞÇİ SÜRE
33	1	RIGHT	[14, 15]	21	11	22.5
34	2	RIGHT	[16]	22	19	30.0
35	3	RIGHT	[17, 18]	23	19	30.0
36	4	RIGHT	[17, 18, 19]	24	5	80.0
37	4	RIGHT	[17, 18, 19]	25	11	55.0
38	4	RIGHT	[17, 18, 19]	26	4	30.0
39	4	RIGHT	[17, 18, 19]	27	14	100.0
40	KOMPONENT SÜRESİ: 182.5					
41	ÖNCELİK KOMPONENT	YAPILABİLECEĞİ	İSTASYON	OPERASYON NO	ATANAN İŞÇİ	İŞÇİ SÜRE
43	1	LEFT	[20, 21]	28	6	30.0
44	2	LEFT	[22]	29	13	30.0
45	3	LEFT	[23, 24]	30	13	20.0
46	4	LEFT	[23, 24, 25]	31	13	60.0
47	4	LEFT	[23, 24, 25]	32	16	110.0
48	4	LEFT	[23, 24, 25]	33	26	60.0
49	4	LEFT	[23, 24, 25]	34	25	80.0
50	KOMPONENT SÜRESİ: 190.0					
51	ÖNCELİK KOMPONENT	YAPILABİLECEĞİ	İSTASYON	OPERASYON NO	ATANAN İŞÇİ	İŞÇİ SÜRE
53	1	MATE	[21, 22]	35	7	55.0
54	2	MATE	[21, 22]	36	27	60.0
55	3	MATE	[21, 22]	37	17	50.0
56	4	MATE	[21, 22]	38	7	45.0
57	5	MATE	[21, 22]	39	17	30.0
58	5	MATE	[21, 22]	40	1	45.0
59	KOMPONENT SÜRESİ: 255.0					
60	61 TOPLAM SÜRE: 445.0					
62						

Şekil 5.3: Elde edilen en iyi çözüm.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan tez çalışması kapsamında bir uçak komponentinin üretim süreci incelenmiştir. MHDİAP için en iyi çözüm aranmıştır. Bu amaç ile küçük veri seti kullanılarak yeni bir matematiksel model kurulmuştur. GAMS optimizasyon programı ile, küçük ölçekli veri seti kullanılarak montaj hattında yer alan istasyonlara operasyonlar ve farklı beceri seviyesine sahip işçilerin atanmasında elde edilen en iyi çözüm gösterilmiştir. Ele alınan montaj hattına ait büyük veri seti içinse belirli varsayımlar ve kısıtlar ile probleme özgü metasezgisel yöntemlerden olan GA önerilmiştir. Önerilen algoritma, Python 3.7.6 programı ile kodlanarak elde edilen en iyi çözüm sunulmuştur.

Doğal seleksiyon ilkelerine dayalı bir arama ve optimizasyon metodu olan genetik algoritmaların temel ilkeleri literatürde ilk defa John Holland tarafından sunulmuştur. Günümüze kadar birçok uluslar arası konferans düzenlenerek genetik algoritmalar hakkında yapılan bilimsel çalışmalar paylaşılmıştır. Genetik algoritmalar için maç fonksiyonu tek gereksinimdir ve olasılık kurallarına göre çalışmaktadır. Diğer metasezgisel yöntemlere kıyasla daha hızlı çözüme ulaşırlar. Çözüm uzayının yalnızca belirli bir kısmını ele almaları etkin bir arama yapmalarını sağlar (Goldberg, 1989).

Birçok avantaj sağlayan genetik algoritmalar için uygulama esnasında farklı sorunlar ile de karşılaşabilmektedir. Karşılaşılan sorunların çözümü için yeni yaklaşımlara ihtiyaç duyulmasına rağmen ceza fonksiyonu yöntemi yapılan çoğu çalışmada etkili olmuştur (Deb, 1998).

Geleneksel MHDİAP'de, montaj hattında çalışan her işçinin montajın tamamlanması için gerçekleştirilmesi gereken operasyonları aynı sürede tamamladığı varsayılmaktadır. İşçiler için yaş, tecrübe gibi farklılıklar göz önünde bulundurularak farklı beceri seviyeleri tanımlanmıştır. Böylece tanımlanan beceri seviyeleri ile operasyonların gerçekleşme süresi değişiklik göstermektedir.

Uçak komponenti montaj hatları, otomotiv, hızlı tüketim ürünleri, elektronik ürün montaj hatlarından farklı olarak emek yoğun operasyonlardan oluşmaktadır. Her bir montaj istasyonu kendine özgü bir konfigürasyona sahiptir. Bu durum, montaj hattı boyunca gerçekleştirilmesi gereken operasyonların, her montaj istasyonunda yapılamayacağını bir kısıt olarak belirtmektedir. Operasyonlar arası öncelik diyagramı ise diğer bir kısıt olarak alınmıştır.

Literatürde incelenen günümüze kadarki çalışmalarda, MHDİAP deterministik, sezgisel ve metasezgisel yöntemler kullanılarak çözüm aranmıştır. Klasik MHDİAP'de, farklı kısıtlar ve varsayımlar altında montaj istasyonu sayısı minimizasyonu veya çevrim süresi minimizasyonu hedeflenmiştir.

Tez kapsamında ele alınan bir uçak komponenti için çözülen problemde, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak bir bütçe kısıtı tanımlanmıştır. Küçük veri seti için geliştirilen matematiksel model ile çevrim süresi minimizasyonu amaçlanmıştır. Büyük veri seti için geliştirilen genetik algoritma ile farklı beceri seviyesine sahip işçilerin, montajı tamamlamak için gerçekleştirilmesi gereken operasyonlara atanması ve bu operasyonların farklı konfigürasyona sahip montaj istasyonlarına atanmasına en iyi çözüm aranmıştır.

KAYNAKLAR

- Ağpak, K., Gökçen H., Saray, N., Özel S.,** (2002). Stokastik Görev Zamanlı Tek Modelli U Tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemleri İçin Bir Sezgisel, J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ., 17(4), 115-124.
- Ağpak, K., Gökçen, H.,** (2002). Basit U Tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemine Bulanık Programlama Yaklaşımı, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi, 4, 29-40.
- Ajenblit, D.A., Wainwright, R.L.,** (1998). Applying Genetic Algorithms To The U-Shaped Assembly Line Balancing Problem, IEEE, 96-101.
- Akyol, D. S., Baykasoğlu, A.** (2019). A Multiple-Rule Based Constructive Randomized Search Algorithm for Solving Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem, J Intell Manuf,30, 557–573.
- Alağaş, H. M., Pınarbaşı, M., Yüzükırmızı M., Toklu, B.,** (2016). Karma Modelli Tip-2 Montaj Hattı Dengeleme Problemi İçin Bir Kısıt Programlama Modeli, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilim Dergisi, 22(4) 340-348.
- Aljinovic, A., Gjeldum, N., Khan, S., Salah, B.,** (2020). Utilization of Industry 4.0 Related Equipment in Assembly Line Balancing Procedure, Processes Journal, 8, 864-880.
- Altunay, H., Özmütlu, H.C., Özmütlu, S.,** (2017). Paralel Görev Atamalı Montaj Hattı Problemi İçin Yeni Bir Matematiksel Model Önerisi, C.Ü. İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 18(1), 15-33.
- Asl J. A., Solimanpur, M., Shankar, R.** (2019). Multi-Objective Multi-Model Assembly Line Balancing Problem: A Quantitative Study in Engine Manufacturing Industry, Opsearch 56, 603–627.
- Atahan, A., Kapuağası, M., Koç, Ü. N., Gençosman, B., İnkaya, T.,** (2018). Bir Otomasyon Teknolojileri Üreticisinde Standart Zaman Hesaplama ve Montaj Hattı Dengeleme Yazılımı Geliştirilmesi, Uludađ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 23(1), 263-284.
- Baş, İ., Bayram, V., Tosun, Ö.,** (2021). Robot Yer Seçimi ve İşçi-İstasyon Ataması Düşünceleri altında Hat Dengeleme Optimizasyonu: Bir Bulaşık Makinesi Fabrikası Vaka Analizi, Pamukkale Univ Muh Bilim Derg.
- Baykasoglu, A., Tasan, S.O., Tasan, A.S., Akyol, S.,** (2017). Modeling and solving assembly line design problems by considering human factors with a real-life application. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries, 27(2), 96-115.

- Becker, C., Scholl, A.,** (2006). A Survey on Problems and Methods in Generalized Assembly Line Balancing, *European Journal of Operation Research*, 168, 694-715
- Bock S.,** (2008). Using Distributed Search Methods For Balancing Mixed-Model Assembly Lines In The Automotive Industry, *OR Spectrum*, 30,551–578.
- Borba, L., Ritt, M.,** (2014). A Heuristic And A Branch-And-Bound Algorithm For The Assembly Line Worker Assignment And Balancing Problem, *Computers and Operations Research*, 45, 87-96.
- Bowman, E. H.,** (1960). Assembly Line Balancing By Linear Programming. *Operations Research*, 8(3), 385-389.
- Boysen, N., Fliedner, M., Scholl, A.,** (2008). Assembly line balancing: Which model to use when, *International Journal Of Production Economics*, 111(2), 509-528.
- Bryton, B.,** (1954). Balancing of a Continuous Production Line, Unpublished M.S. Thesis, Northwestern University.
- Bukchin, J., Darel, E., Rubinovitz, J.,** (1997). Team-oriented assembly system design: A new approach, *International Journal of Production Economics*, 51(1), 47-57.
- Cengiz, Y.,** (2004). Optimum Performanslı Mikrodalga Kuvvetlendirici Tasarımı, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, YÖK Tez Merkezi.
- Chan, F., Huo, J., Zhang, J.,** (2020). A Fuzzy Control System For Assembly Line Balancing With Three-state Degradation Process In The Era Of Industry 4.0, *International Journal of Production Research*, 58(23), 7112-7129.
- Chaves, A.A., Lorena, L.A.N, Miralles, C.,** (2009). Hybrid Metaheuristic for the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem, M.J. Blesa et al. (Eds.), 5818, 1–14.
- Chica, M., Tang, Q.,Zhang, Z.,** (2020). Multi-Manned Assembly Line Balancing With Time And Space Constraints: A MILP Model And Memetic Ant Colony System, *Computers & Industrial Engineering*, 150, (-).
- Corominas A., Ferrer L., Pastor R.,** (2010). Assembly line balancing: general resource- constrained case, *International Journal of Production Research*, 49 (12), 3527-3542.
- Çılkm, S.,** (2003). Genetik Algoritma İle Montaj Hattı Dengeleme, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 98-99.
- Deb K.,** (1998). Genetic Algorithm in Search and Optimization: The Technique and Applications.
- Dimitriadis, S.G.,** (2006). Assembly Line Balancing And Group Working: A Heuristic Procedure For Workers' Groups Operating On The Same Product And Workstation, *Computers & Operational Research*, 33, 2757-2774.
- Doerr, K.H., Klastorin, T.D., Magazine, M.J.,** (2000). Synchronous Unpaced

Flow Lines with Worker Differences and Overtime Cost, Management Science, 46(3), 421-435.

- Doğan, A., Sakallı, Ü.S.,** (2016). Bulanık İşlem Zamanlı Geleneksel Montaj Hattı Dengeleme Problemi İçin Yeni Bir Yaklaşım: Savunma Sanayii Uygulaması, Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 8(1), 31-50.
- Efe, Ö. F., Efe, B.,** (2015). Tekstil Sektöründe İş Kazalarının Oluşumuna Ait Ergonomik Risklerin Değerlendirilmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 3(3), 623-629.
- Engin. O.,** (2001). Akış Tipi Çizelgeleme Problemlerinin Genetik Algoritma ile Çözümün Performansının Artırılmasında Parametre Optimizasyonu, Yayınlanmamış Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.
- Erkut, H. ve Baskak, M.,** (2003). Stratejiden Uygulamaya Tesis Tasarımı, İrfan Yayınevi, İstanbul.
- Fang, K., Huang, D., Mao, Z., Yuan, B.,** (2021). Combinatorial Benders Decomposition For Mixed-model Two-sided Assembly Line Balancing Problem, International Journal of Production Research,
- Feng, H., Hongjun, W.,** (2020). Research on Robot Assembly Line Balancing Considering Energy Consumption, International Conference on Maintenance Engineering, 2020, 869-881.
- Ghedjati, F.,** (1999), Genetic Algorithms for Job Shop Scheduling Problem with Unrelated Parallel Constraints: Heuristic Mixing Method Machines and Precedence, Computers and Industrial Engineering, 37,39-42.
- Goldberg, D.E.,** (1989), Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning,
- Gökçen, H. ve Erel, E.,** (1995). Karışık Modelli Montaj Hattı Dengeleme Problemi için bir Sezgisel Yöntem, Verimlilik Dergisi, 2, 131–140.
- Gökçen, H. ve Erel, E.,** (1998). Binary Integer Formulation for Mixed-model Assembly Line Balancing Problem, Computers & Industrial Engineering, 34(2), 451-461.
- Gökçen, H., Erel, E.,** (1999). Shortest-Route Formulation of Mixed Model Assembly Line Balancing Problem, European Journal of Operations Research, 116, 194-204.
- Gronalt, M., Hartl, R.F.,** (2003). Workforce Planning And Allocation For Midvolume Truck Manufacturing: A Case Study, Int. J. Prod. Res., 41, 449-463.
- Heike, G., Ramulu, M., Sorensen, E., Shanahan, P., Moinzadeh, K.,** (2001). Mixed Model Alternatives For Low-Volume Manufacturing: The Case Of The Aerospace Industry, Int. J. Production Economics 72, 103-120.
- Hoffman, T.R.,** (1963). Assembly Line Balancing With A Precedence Matrix, Management Science, 9(4), 551-563.

- Hoffmann T.R.**, (1992). EUREKA: A Hybrid System for Assembly Line Balancing, *Management Science*, 38, 39-47.
- Hopp, W.J., Tekin, E., Oyen, M.P.V.**, (2004). Benefits of Skill Chaining in Serial Production Lines with Cross-Trained Workers, *Management Science*, 50(1), 83-98.
- Jackson, J.R.**, (1956). A Computing Procedure For A Line Balancing Problem, *Management Science*, 2(3), 261-271.
- Janardhanan, M.N., Li, Z., Bocewicz, G., Banaszak, Z, Nielsen, P.**, (2018). Metaheuristic Algorithms For Balancing Robotic Assembly Lines With Sequencedependent Robot Setup Times, *Applied Mathematical Modelling*, 65, 256-270.
- Janardhanan, M.N., Li, Z., Tang, Q.**, (2021). Multi-objective Migrating Bird Optimization Algorithm For Cost-oriented Assembly Line Balancing Problem With Collaborative Robots, *Neural Computing and Applications*, 33, 8575-8596.
- Kahraman, M., Özdağlar, D.**, (2004). Su Dağıtım Sistemlerinin Genetik Algoritma İle Optimizasyonu, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6(3), 1-18.
- Kara, Y., Atasagun, Y., Gökçen, H., Hezer, S., Demirel, N.**, (2014). An integrated model to incorporate ergonomics and resource restrictions into assembly line balancing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 27, 997– 1007.
- Kara, Y., Paksoy, T., Chang, C. T.**, (2009). Binary fuzzy goal programming approach to single model straight and U-shaped assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 195(2), 335-347.
- Karaca, M.K.**, (1996). Montaj hatları, *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 1, 1, 117-128.
- Kaymaz, E., Çavdur, F.**, (2018). Montaj Hattı Dengelemede Çevrim Süresinin Minimizasyonu İçin Yeniden İşleme İstasyonunun Kullanımı: Hata Oranı ve İstasyon Pozisyonunun Etkileri, *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, 3, 201-210.
- Kocakoç, İ., Pulat, M.**, (2017). Gezgin Satıcı Probleminin Genetik Algoritmalarla Çözümünde Başlangıç Popülasyonun Belirlenmesi, *Journal Of Emerging Economies And Policy*, 2(1), 95-123.
- Kurt, M., Semetay, C.**, (2001). Genetik Algoritma ve Uygulama Alanları, *Mühendis ve Makine*, 501, 19-24.
- Lapierre, S.D., Ruiz, A.B.**, (2004). Balancing assembly lines: An industrial case study, *Journal of the Operational Research Society*, 55, 589-597, 2004
- Lee, C., Vairaktarakis, G.L.**, (1997). Workforce planning in mixed model assembly systems, *Journal of Operations Research*, 45(4), 553-567.
- Lei, M., Lui, X., Yang, X.**, (2021). Optimisation Of Mixed-model Assembly Line Balancing Problem Under Uncertain Demand, *Journal of*

Manufacturing Systems, 59, 214-227.

- Li Z, Kucukkoc I, Nilakantan JM.,** (2017). Comprehensive review and evaluation of heuristics and meta-heuristics for twosided assembly line balancing problem, *Computers & Operations Research*, 84, 146-161.
- Liu, S. B., Huang, H. C.,** (2005). A Bidirectional Heuristic For Stochastic Assembly Line Balancing Type II Problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25, 71-77.
- Merengo, C., Nava, F., Pozetti, A.,** (2010). Balancing And Sequencing Manual Mixed-model Assembly Lines, *International Journal of Production Research*, 37(12), 2835-2860.
- Miralles, C., Garcia, J.P., Andres, C. ve Cardos, M.,** (2007). Branch and Bound Procedures for solving the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem. Application to Sheltered Work Centres for 74 Disabled., *Discrete Applied Mathematics (special issue of CO 2004 Conference, Lancaster)*.
- Mitchell, M.,** (1996). An introduction to genetic algorithms, The MIT Press.
- Moodie, C. L., Young H.H.,** (1965). A Heuristic Method of Assembly Line Balancing for Assumptions of Constant or Variable Work Element Times, *The Journal of Industrial Engineering*, 16(1): 23-29.
- Moreira, M.C.O., Ritt, M., Costa, A.M., Chaves, A.A.,** (2012). Simple Heuristics for the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem, *Journal of Heuristics*, 18, 505–524.
- Mutlu, O., Polat, O. ve Supciller, A.A.,** (2013). An Iterative Genetic Algorithm for the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem Of Type-II, *Computers and Operations Research*, 40, 418-426.
- Nakade, K., Ohno, K.,** (1999). An Optimal Worker Allocation Problem for a U-shaped Production Line, *International Journal of Production Economics*, 60-61, 353-358.
- Obitko, M.,** (1998). Introduction to genetic algorithms, <http://www.obitko.com/tutorials/genetic-algorithms>.
- Öksüz, M. K., Satoğlu, Ş. I.,** (2014). Balancing U-shaped Assembly Lines by Considering Human Factors, *Proceedings of the Global Conference on Engineering and Technology Management*, Istanbul, Turkey, 23–26 Haziran.
- Özbakir, L., Tapkan, P.,** (2011). Bee colony intelligence in zone constrained two-sided assembly line balancing problem, *Expert Systems with Applications*, 38(9), 11947-11957.
- Özcan B., Dolu İ., Mutlu K.,** (2019). Statistical Analysis in Assembly Line Balancing: Lean Manufacturing Application in Energy Sector *Turkish Journal of Energy Policy*, 4(8), (-).
- Özcan, U., Peker, A.,** (2007). Karışık Modelli U-Tipi Montaj Hatlarında Hat Dengeleme Ve Model Sıralama Problemleri İçin Yeni Bir Sezgisel Yaklaşım., *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 22(2), 277-286.

- Özcan, U., Peker, A.,** (2007). Karışık Modelli U-tipi Montaj Hatlarında Hat Dengeleme ve Model Sıralama Problemleri İçin Yeni Bir Sezgisel Yaklaşım, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 22(2), 277-286.
- Özcan, U., Toklu, B.,** (2009). A Tabu Search Algorithm For Two-Sided Assembly Line Balancing, International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, 43, 822-829.
- Özkan, R.,** (2003). Tek Modelli Deterministik Montaj Hattı Dengeleme Problemlerine Genetik Algoritma İle Çözüm Yaklaşımı, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- Palamut, Ü., Akpınar, Ş.,** (2019). A Firefly Algorithm for the Alternative Subgraphs Assembly Line Balancing Problem, 2019(3), 290-29.
- Patterson J.H., Talbot F.B.,** (1975). An integer programming algorithm with network cuts for solving the assembly line balancing problem, Management Science, 30(1), 85-99.
- Polat, O.,** (2008). Montaj Hattı İşçi Atama ve Dengeleme Problemlerinin Genetik Algoritmalarla Çözülmesi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- Polat, O., Kalaycı, C.B., Mutlu, Ö., Gupta, S.M.,** (2016). A Two-phase Variable Neighbourhood Search Algorithm For Assembly Line Worker Assignment And Balancing Problem Type-II: An Industrial Case Study, Int. J. Prod. Res., 54 (3), 722-74.
- Ramezani, R., & Ezzatpanah, A.,** (2015). Dynamic hoist scheduling problem with multi-capacity and worker assignment problem, Computers& Industrial engineering, 87, (-).
- Salveson, M. E.,** (1955), The assembly line balancing problem, Journal of Industrial Engineering, 6, 18 -25.
- Sarker, B. R., Pan, H.,** (1998). Designing a Mixed-Model Assembly Line to Minimize the Costs of Idle and Utility Times, Computers and Industrial Engineering, 34(3), 609-628.
- Sarker, B. R., Pan, H.,** (2001). Design Configuration for a Closed-Station, MixedModel Assembly Line: A Filling Cabinet Manufacturing System, International Journal of Production Research, 39, 2251-2270.
- Scholl, A. ve Becker, C.,** (2006). State-of-the-art Exact and Heuristic Solution Procedures for Simple Assembly Line Balancing, European Journal of Operations Research, 168, 666–693.
- Simaria, A. S., Vilarinho, P. M.,** (2004). A Genetic Algorithm Based Approach to the Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem of Type II, Computers & Industrial Engineering, 47, 391–407.
- Sivanandam, S.N., Deepa, S.N.,** (2008). Introduction To Genetic Algorithms, Berlin: Springer Science& Business Media.
- Song B.L., Wong W.K., Fan J.T. Ve Chan S.F.,** (2006). A Recursive Operator Allocation Approach For Assembly Line-Balancing Optimization Problem With The Consideration Of Operator Efficiency, Computers

& Industrial Engineering, 51, 585-608.

- Sungur, B. ve Yavuz, Y.,** (2015). Assembly Line Balancing with Hierarchical Worker Assignment, *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 290-298.
- Tapkan P, Özbakır L, Baykasoğlu A, Kulluk S.,** (2016). A cost sensitive classification algorithm: BEE-Miner, *Knowledge-Based Systems*, 95, 99–113.
- Thomopoulos, N. T.,** (1967). Line Balancing-Sequencing For Mixed-Model Assembly, *Management Science*, 14:(2), 59-75.
- Yağmahan, B, Emel, E.,** (2015). Yasak arama algoritmasına dayalı pürüzsüzleştirme yaklaşımı içeren karışık modelli montaj hattı dengeleme, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(1), 57-69.
- Yang C, Gao J, Sun L.,** (2013). A multi-objective genetic algorithm for mixed-model assembly line rebalancing, *Computers & Industrial Engineering*, 65(1), 109-116.
- Yücel, A.,** (2016). Mesafe Kısıtlı Çok Yönlü Kümelenmiş Açık Araç Rotalama Probleminin Genetik Algoritma İle Çözümü, *Doktora Tezi*. İstanbul: İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, YÖK Tez Merkezi.
- Zacharia, P.T, Nearchou, A. C.,** (2012). Multi-Objective Fuzzy Assembly Line Balancing Using Genetic Algorithms, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(3), 615, 627.



EKLER

Ek-1: Duyarlılık Analizi

Populasyon Sayısı	İterasyon Sayısı	Elit Yüzde	Çaprazlama Oranı	Mutasyon Oranı	Sonuç
1000	1000	10	0,9	0,2	445
1000	1000	10	0,95	0,2	460
1000	1000	20	0,95	0,2	472,5
1000	1000	10	0,9	0,15	475
100	1000	10	0,9	0,15	485
1000	100	10	0,9	0,2	485
1000	100	20	0,9	0,15	492,5
1000	1000	20	0,9	0,15	495
1000	1000	20	0,9	0,2	495
1000	1000	20	0,95	0,15	522,5
1000	100	20	0,9	0,2	525
100	100	20	0,9	0,15	542,5
1000	1000	0	0,9	0,2	560
1000	1000	10	0,95	0,15	560
1000	100	10	0,95	0,15	565
1000	100	10	0,95	0,2	585
1000	100	20	0,95	0,2	590
100	1000	20	0,9	0,2	600
1000	100	10	0,9	0,15	605
1000	1000	0	0,9	0,15	612,5
1000	1000	0	0,95	0,15	615
100	100	20	0,9	0,2	660
100	100	10	0,95	0,15	672,5
100	1000	0	0,95	0,2	675
1000	100	20	0,95	0,15	675
100	100	20	0,95	0,2	697,5
100	1000	10	0,95	0,15	700
100	1000	10	0,9	0,2	702,5
100	1000	10	0,95	0,2	705
100	1000	20	0,9	0,15	705
1000	1000	0	0,95	0,2	705
100	1000	0	0,9	0,2	715
100	100	20	0,95	0,15	720
100	100	10	0,9	0,15	732,5
100	100	10	0,9	0,2	735
1000	100	0	0,9	0,15	737,5
1000	100	0	0,9	0,2	740
100	1000	0	0,95	0,15	772,5
100	100	10	0,95	0,2	785
100	1000	20	0,95	0,15	797,5
100	1000	20	0,95	0,2	812,5
1000	100	0	0,95	0,15	927,5
1000	100	0	0,95	0,2	1002,5
100	1000	0	0,9	0,15	1135
100	100	0	0,9	0,2	1255
100	100	0	0,9	0,15	1307,5
100	100	0	0,95	0,15	1355
100	100	0	0,95	0,2	1535



