

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ESNEK ATÖLYE TİPİ HÜCRE ÇİZELGELEME PROBLEMLERİ
İÇİN ÇOK AMAÇLI MATEMATİKSEL MODEL VE GENETİK
ALGORİTMA İLE ÇÖZÜM ÖNERİSİ**

DOKTORA TEZİ

Derya DELİKTAŞ

Enstitü Anabilim Dalı : ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Orhan TORKUL

Temmuz 2017

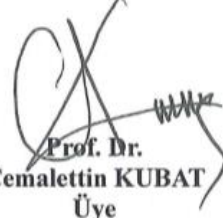
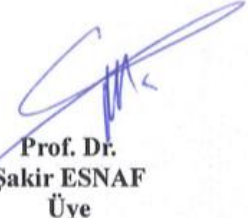
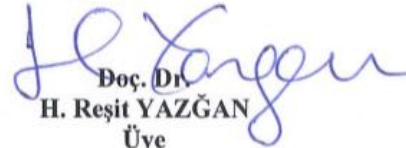
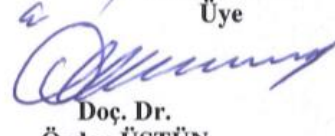
T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ESNEK ATÖLYE TİPİ HÜCRE ÇİZELGELEME PROBLEMLERİ
İÇİN ÇOK AMAÇLI MATEMATİKSEL MODEL VE GENETİK
ALGORİTMA İLE ÇÖZÜM ÖNERİSİ**

DOKTORA TEZİ

Derya DELİKTAŞ

Bu tez 05 / 07 /2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

 Prof. Dr. Orhan TORKUL Jüri Başkanı	 Prof. Dr. Cemalettin KUBAT Üye	 Prof. Dr. Şakir ESNAF Üye
 Doç. Dr. H. Reşit YAZGAN Üye		 Doç. Dr. Özden ÜSTÜN Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Derya DELİKTAŞ

30.05.2017

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca değerli bilgi ve deneyimleriyle yol gösteren hiçbir zaman desteğini esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Orhan TORKUL'a ve tez izleme komitemde yer alan değerli hocam Doç. Dr. H. Reşit YAZĞAN'a teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim. Ayrıca her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren ve tez izleme komitemde de yer alan kıymetli hocam Doç. Dr. Özden ÜSTÜN'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam süresince, bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım değerli hocalarım Prof. Dr. A. Sermet ANAGÜN ve Öğr. Gör. Ferzende TEKÇE'ye teşekkür ederim.

Doktora eğitimim boyunca sağladıkları maddi destek sebebiyle Türkiye Bilimsel ve Teknoloji Araştırma kurumuna (TÜBİTAK) teşekkürlerimi iletirim.

Teşekkürlerimin en özelini ise; hayatım boyunca her zaman olduğu gibi doktora eğitimim sürecinde de sonsuz destekleri, anlayışları ve ilgileriyle yanımda olan sevgili babam Ali DELİKTAŞ'a, canım annem Şefika DELİKTAŞ'a, bir tanecik kardeşlerim İnci, Merve Gül ve Ali Oğulcan'a sunarım. Her durumda desteklerini, sevgilerini esirgemedikleri ve bu zorlu süreçte beni cesaretlendirdikleri için değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi iletirim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ÖZET.....	x
SUMMARY	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
TEMEL TANIMLAR ve LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	9
2.1. Çok Amaçlı Atölye Tipi Çizelgeleme Problemi Literatür Araştırması ..	9
2.2. Hücre Çizelgeleme Problemi Literatür Araştırması	14
2.3. Optimizasyonda Kullanılan Çok Amaçlı Çözüm Yaklaşımları.....	23
2.3.1. Ağırlıklı toplam yöntemi	25
2.3.2. ε -kısıt yöntemi	25
2.3.3. Konik skalerleştirme yöntemi.....	26
2.3.4. Literatür araştırması.....	27
BÖLÜM 3.	
PROBLEMİN TANIMI ve ÇOK AMAÇLI KARMA TAMSAYILI	
DOĞRUSAL OLMAYAN MATEMATİKSEL MODEL.....	31
3.1. Problemin Tanımı	33
3.2. Matematiksel Modeller	34

3.2.1. Halat ve Bashirzadeh'in modellerinin uyarlamaları.....	35
3.2.2. Yeni bir model formülasyonu: EATHÇP için doğrusal olmayan matematiksel modeller	37
3.3. Örnek Problem Çözümü ve Problem Boyutunun Araştırılması	39
3.4. İki Amaçlı Hücre Çizelgeleme Modeli.....	45

BÖLÜM 4.

İKİ AMAÇLI ESNEK ATÖLYE TİPİ HÜCRE ÇİZELGELEME PROBLEMİ

İÇİN GENETİK ALGORİTMA YAKLAŞIMI.....	49
4.1.1. Operasyon sıralama vektörünün gösterimi	53
4.1.2. Makine atama vektörünün gösterimi	54
4.1.3. Parça ailesi ve hücre atama vektörünün gösterimi	55
4.2. Başlangıç Popülasyonu.....	56
4.3. Uyum Fonksiyonu	57
4.4. Genetik Operatörler	60
4.5. Parametre Tasarımı	65
4.5.1. Tam faktöriyel deney tasarımı	66
4.5.2. Taguchi deney tasarımı.....	67
4.5.3. Genetik algoritma parametrelerinin ve düzeylerinin belirlenmesi	69
4.6. Önerilen Genetik Algoritma Yaklaşımının Gerçek Bir Sisteme Uygulanması.....	77

BÖLÜM 5.

SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	94
KAYNAKLAR	99
EKLER.....	112
ÖZGEÇMİŞ	123

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ATÇP	: Atölye Tipi Çizelgeleme Problemi
ATHÇ	: Atölye Tipi Hücre Çizelgeleme
ATHÇP	: Atölye Tipi Hücre Çizelgeleme Problemi
ATY	: Ağırlıklı Toplam Yöntemi
B_i	: i . amaç fonksiyonu için referans değeri
C_{enb}	: En büyük tamamlanma süresi
C_{ijq}	: q . makinede i . işin j . operasyonunun tamamlanma zamanı
C_{max}	: Makespan
D_i	: i . işin teslim süresi
DT	: Deney Tasarımı
EA	: Evrimsel Algoritma
EATP	: Esnek Atölye Tipi Çizelgeleme Problemi
EATHÇ	: Esnek Atölye Tipi Hücre Çizelgeleme
EATHÇP	: Esnek Atölye Tipi Hücre Çizelgeleme Problemi
$F_i(x)$	: i . amaç fonksiyonu
FJSCSP	: Flexible Job Shop Cell Scheduling Problem
GA	: Genetik Algoritma
HA	: Harmoni Arama
HİS	: Hücresel İmalat Sistemleri
HTS	: Hücrelerarası Taşıma Süresi
K	: Çok büyük pozitif bir sayı
KKO	: Karınca Koloni Optimizasyonu
KSY	: Konik Skalerleştirme Yöntemi
KTDP	: Karma Tamsayılı Doğrusal Olmayan Programlama
KTDP	: Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama

MA	: Memetik Algoritma
MM	: Matematiksel Model
MTS	: Makine tamamlanma süresi
N	: Noise factors
O_{ij}	: i . işin j . operasyonu
P_{ijq}	: q . makinedeki i . işin j . operasyonunun işlem süresi
PAHS	: Parça aileleri arası hazırlık süresi
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyon
PTS	: Parça tamamlanma süresi
S	: Signal factors
$S_{ll'}$	: l' . parça ailesi l . parça ailesinden hemen sonra işlem görüyorsa oluşan hazırlık süresi
SBPAHS	: Sıra Bağımlı Parça Ailesi Hazırlık Süreleri
SBZPAHS	: Sıra Bağımsız Parça Ailesi Hazırlık Süreleri
SiH	: Sanal İmalat Hücreleri
SPM	: Swap Position Mutation
$T_{cc'}$	: c . hücreden c' . hücreğine taşıma süresi
t_i	: i . işin gecikmesi
TA	: Tabu Arama
TB	: Tavlama Benzetimi
TOPS	: Toplam operasyon süresi
TS	: Toplam süre
$v_1(r)$	: r . pozisyonndaki operasyon sıralama kromozom vektör gösterimi
$v_2(s)$	: s . pozisyonndaki makine atama kromozom vektör gösterimi
$v_3(t)$	: t . pozisyonndaki parça ailesi atama kromozom vektör gösterimi
$v_4(t)$	: t . pozisyonndaki hücre atama kromozom vektör gösterimi
W_i	: i . amaç fonksiyonunun öncelik derecesi
YBS	: Yapay Bağışıklık Sistemi

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Esnek imalat hücrelerinin örnek bir yapısı	3
Şekil 1.2.	Çizelgeleme problemlerinin ağaç diyagramıyla gösterimi	4
Şekil 1.3.	Tezin genel çerçevesi	6
Şekil 2.1.	Parça-makine diyagonal blok matrisi (darboğaz makine, istisnai parça ve hücre içi boşluk).....	20
Şekil 2.2.	Hücre oluşturma problemi için ideal çözüm	20
Şekil 2.3.	Endüstrinin tarihsel gelişimi	22
Şekil 2.4.	İki amaçlı doğrusal olmayan bir örnek problemin amaç uzayı.....	28
Şekil 3.1.	Önerilen metodolojinin ana akış şeması	32
Şekil 3.2.	(a) Model 1 kullanılarak test problem 7 için oluşturulan Gantt şeması (b) Model 3 kullanılarak test problem 7 için oluşturulan Gantt şeması	44
Şekil 3.3.	(a) Model 1 kullanılarak test problem 7 için oluşturulan Gantt şeması (b) Model 3 kullanılarak test problem 7 için oluşturulan Gantt şeması	44
Şekil 3.4.	Ana skalerleştirme yöntemlerine göre oluşturulan Pareto yüzeyi	47
Şekil 4.1.	Popülasyon, kromozom, gen ve alel için örnek gösterim	50
Şekil 4.2.	Önerilen genetik algoritmanın çalışma prensibi	51
Şekil 4.3.	Operasyon sıralama vektörünün gösterimi	53
Şekil 4.4.	Makine atama vektörünün gösterimi	54
Şekil 4.5.	Şekil 4.4.'teki ilk 3 gen için detaylı makine atama vektör gösterimi ..	55
Şekil 4.6.	Parça ailesi ve hücre atama vektörünün gösterimi.....	55
Şekil 4.7.	(a) Başlangıç makine-operasyon matrisi (b) Başlangıç operasyon-makine matrisi	57
Şekil 4.8.	Popülasyondaki ebeveynlerin eşleşmesine örnek gösterim	62
Şekil 4.9.	Rassal anahtarlar süreci.....	63

Şekil 4.10. Önerilen kromozom yapısı için rassal anahtarlar ile tek nokta çaprazlama gösterimi.....	64
Şekil 4.11. Çocuk 1 kromozomu iş sırası kodunun çözülmesi için örnek gösterim.....	64
Şekil 4.12. Değiş-tokuş pozisyon mutasyon operatörüne bir örnek.....	65
Şekil 4.13. GA parametreleri için varyans analizi sonuç tablosu (test problemi 21)	71
Şekil 4.14. Ortalama için ana etki grafikleri (test problemi 21).....	72
Şekil 4.15. Ortalama için bileşik etki grafikleri (test problemi 21)	72
Şekil 4.16. Test problemi 42 için GA yakınsama grafiği.....	76
Şekil 4.17. S/N oranı için ana etkiler grafiği.....	84
Şekil 4.18. Ortalamalar için ana etkiler grafiği	85
Şekil 4.19. Uygulama problemi için GA yakınsama grafiği	85
Şekil 4.20. Uygulama probleminin önerilen GA ile çözüldükten sonra bulunan en iyi C_{enb} değeri için operasyon sıralama vektörünün gösterimi	87
Şekil 4.21. $W_1=0.4$ ve $W_2=0.6$ ağırlıkları ile uygulama problemine ait C_{enb} amacı için yakınsama hızı	92
Şekil 4.22. $W_1=0.4$ ve $W_2=0.6$ ağırlıkları ile uygulama problemine ait toplam gecikme süresi amacı için yakınsama hızı	92
Şekil 4.23. Amaçların farklı ağırlıkları dikkate alınarak her bir amacın KSY'ye ve ATY'ye göre sonuçlarının karşılaştırılması	93

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Çok amaçlı esnek atölye tipi çizelgeleme problemleri için sezgisel temelli modellerin özeti	11
Tablo 2.2.	Hücre çizelgeleme problemleri üzerine yapılan çalışmaların kısa bir özeti.....	15
Tablo 2.3.	Çizelgeleme alanındaki ana skalerleştirme yöntemlerinin özeti.....	29
Tablo 3.1.	Test problemleri için oluşturulan veri seti	39
Tablo 3.2.	Her bir hücreye atanan makine grupları ve parça aileleri.....	40
Tablo 3.3.	Matematiksel modeller göz önüne alınarak CPU sürelerinin ve C_{enb} değerlerinin karşılaştırılması.....	41
Tablo 3.4.	Sayısal örnek 1 için örnek parça-makine matrisi, işlem süreleri ve rotalama	42
Tablo 4.1.	Sayısal örnek 2 için örnek parça-makine matrisi, işlem süreleri ve rotalama	52
Tablo 4.2.	Başlangıç popülasyonunun oluşturulması	56
Tablo 4.3.	Uyum fonksiyonunun hesaplanması	58
Tablo 4.4.	Taguchi deney tasarımının adımları	69
Tablo 4.5.	GA yaklaşımı için faktör ve faktörlerin düzeyleri	70
Tablo 4.6.	Test problemi seti için her bir probleme ait kritik faktörlerin özeti....	73
Tablo 4.7.	Test problemleri için faktör düzeylerinin en etkin kombinasyonları.....	74
Tablo 4.8.	GA yaklaşımı ve Lingo 11.0 yazılımı ile çözülen küçük ve orta boyutlu test problemleri için hesaplama sonuçları	76
Tablo 4.9.	GA yaklaşımı ile çözülen büyük boyutlu test problemleri için hesaplama sonuçları	76
Tablo 4.10.	Tülomsaş Motor Fabrikası'nda üretilen kritik ürünler	78
Tablo 4.11.	Motor fabrikasının makine parkı	79

Tablo 4.12. Uygulama problemi için örnek parça-makine matrisi, işlem süreleri ve rotalama.....	80
Tablo 4.13. L_9 ortogonal dizisi ile oluşturulan GA parametreleri kullanılarak C_{enb} değerinin hesaplanması	83
Tablo 4.14. S/N oranı ve ANOVA sonuçları	84
Tablo 4.15. Uygulama problemi için hesaplama sonuçları.....	86
Tablo 4.16. Uygulama problemi için her bir makineye ait operasyon sırası ve makinelerdeki en son operasyonun tamamlanma süresi.....	86
Tablo 4.17. Uygulama problemi için her bir parçaya ait makine sırası ve parçaların en son operasyonun tamamlanma süresi.....	89



ÖZET

Anahtar kelimeler: Hücre Çizelgelemesi, Karma Tamsayılı Doğrusal Olmayan Programlama, Genetik Algoritma, Deney Tasarımı, Konik Skalerleştirme Metodu

Günümüz rekabetçi iş ortamında, müşteriler daha düşük maliyetle daha yüksek kalitede çeşitli ürünleri satın almak istemektedir. İmalat firmaları, talep çeşitliliğini karşılamak için yüksek derecede ürün çeşitliliğine ve küçük imalat parti büyüklüğüne ihtiyaç duymaktadır. Üretimdeki ürün çeşitlilikleri, uzun hazırlık ve taşıma süreleri, karmaşık çizelgeleme problemleri gibi birçok probleme neden olmaktadır. Geleneksel imalat sistemleri, bu tip değişikliklere cevap vermede yeterince esnek değilken Hücresel Üretim Sistemleri üreticilerin bu ihtiyaçlarına cevap verebilecek özelliklere sahiptir. Ayrıca gerçek hayat problemlerinin çoğunda, bir parçanın bazı ya da bütün operasyonları birden fazla makinede işlem görebilmekte ve bazen de bu operasyonlar bir makineyi ya da iş merkezini birden fazla kez ziyaret etmektedir. Bu seçenek sisteme esneklik kazandırırken bu kadar karmaşık bir üretim sisteminin başarılı ve doğru bir şekilde işletilebilmesi kaynakların etkin kullanılmasını da gerektirmektedir.

Bu çalışma, istisnai parçaları, hücrelerarası hareketleri, hücrelerarası taşıma sürelerini, sıra bağımlı parça ailesi hazırlık sürelerini ve yeniden işlem gören parçaları dikkate alarak hücresel imalat ortamında esnek atölye tipi çizelgeleme probleminin çözümüne dair bir matematiksel model ve çözüm yöntemi sunmaktadır. Mevcut bilgilerimiz ışığında yapılan bu çalışma Esnek Atölye Tipi Hücre Çizelgeleme Probleminde (EATHÇP) çok amaçlı matematiksel model ve meta-sezgiselinin kullanımı için ilk girişimdir. Bununla birlikte gerçek hayat uygulamaları için EATHÇP süreci, birçok çelişen amacı dikkate almayı gerektirdiği için ele alınan skalerleştirme metodu pratik uygulama ve teorik araştırma açısından oldukça önemlidir. Önerilen karma tamsayılı doğrusal olmayan matematiksel modelle küçük ve orta boyutlu problemler çözülebilmektedir. Büyük boyutlu problemlerin çözümü, doğrusal olmayan modellerle makul zamanlarda olamayacağı ya da çok uzun süreceği için konik skalerleştirmeli çok amaçlı matematiksel modeli kullanan bir Genetik Algoritma (GA) meta-sezgisel çözüm yöntemi önerilmiştir. GA yaklaşımının en iyi veya en iyiye yakın çözüme ulaşmasına etki eden parametrelerin en iyi kombinasyonu belirlemek amacı ile bir deney tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışması için Eskişehir Tülomsaş Motor Fabrikası'nda bir uygulama çalışması yürütülmüştür. Yürütülen bu çalışma, altı farklı amaç ağırlık değerleri kullanılarak hem konik skalerleştirmeli GA yaklaşımı ile hem de ağırlıklı toplam skalerleştirmeli GA yaklaşımı ile çözülmüştür. Amaç ağırlıklarının beşinde çok amaçlı konik skalerleştirme GA yaklaşımının daha baskın sonuçlara ulaşabildiği vurgulanmıştır. Ayrıca, önerilen çok amaçlı modelin gerçek hayat problemleri için de makul zamanda uygun çözümler üretebildiği gösterilmiştir.

A MULTI-OBJECTIVE MATHEMATICAL MODEL AND GENETIC ALGORITHM SOLUTION APPROACH FOR FLEXIBLE JOB SHOP CELL SCHEDULING PROBLEMS

SUMMARY

Keywords: Cell Scheduling, Mixed Integer Nonlinear Programming Model, Genetic Algorithm, Experimental Design, Conic Scalarization Method

In today's highly competitive business environment, customers desire to buy various products with higher quality at lower costs. Manufacturing firms require a high degree of product variety and small manufacturing lot sizes to meet the demand variability. The product variations in manufacturing cause many problems such as lengthy setup and transportation times, complex scheduling. Cellular Manufacturing Systems contain the characteristics, which will respond to the needs of manufacturers, even though Conventional Manufacturing Systems are not flexible enough to respond to changes. In addition, in most real life manufacturing problems, some or all operations of a part can be processed on more than one machine, and sometimes operations may visit a machine or work center more than once. It is necessary to use resources effectively in order to run such a complex production system successfully.

In this study, a mathematical model and a solution approach that deals with a flexible job shop scheduling problem in cellular manufacturing environment is proposed by taking into consideration exceptional parts, intercellular moves, intercellular transportation times, sequence-dependent family setup times, and recirculation. To the best of our knowledge, this is the first attempt to use multi-objective mathematical model and meta-heuristic approach for a Flexible Job Shop Cell Scheduling Problem (FJCSP). However, in the real-life applications, the scalarization method considered is highly important in terms of theoretical research and practical application because the FJCSP process is not easy because of many conflicting objectives. The proposed mixed integer non-linear model can be used for solving small and middle scaled problems. Solution of large scaled problems is not possible in reasonable time or takes too long time, so a Genetic Algorithm (GA) meta-heuristic approach that uses a multi-objective mathematical model with conic scalarization has been presented. An experimental design was used to determine the best combination of parameters which are affected performance of genetic algorithm to achieve optimum or sub-optimum solution. In this thesis study, a case study was conducted in Tülomsaş Locomotive and Engine Factory in Eskişehir. This study was solved by using both conic scalarization GA approach and weighted sum scalarization GA approach with six different weights of objective. It is emphasized that the multi-objective conic scalarization GA approach has better quality than other approach for five different weights of objective. In addition, it has been shown that the multi-objective model could also obtain optimum results in reasonable time for the real-world problems.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzün rekabetçi iş ortamında, müşteriler daha düşük maliyetle daha yüksek kalitede çeşitli ürünler satın almak istemektedir. İmalat firmaları, talep çeşitliliğini karşılamak için yüksek derecede ürün çeşitliliğine ve küçük imalat parti büyüklüklerine ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca, imalat firmaları teknolojik değişimlerin ve değişen müşteri taleplerinin harekete geçirdiği hızlı değişimlerle karşılaştıklarından, bu şirketlerin daha esnek ve daha etkili olması gerekmektedir. Buna ek olarak, çoğu firma, müşterilerinin gereksinimlerine cevap verme hızına da odaklanmaktadır. Bu nedenle, imalatçıların müşteri siparişlerine yanıt verme sürelerini azaltmaları da gerekmektedir. Sisteme böyle bir esneklik kazandırmak ve karmaşık üretim sistemlerini başarılı bir şekilde çalıştırmak, sistemin kaynaklarını etkili bir şekilde kullanma ihtiyacını doğurmaktadır.

Üretimdeki ürün çeşitliliği, uzun hazırlık ve taşıma süreleri ve maliyetleri, karmaşık çizelgeleme ve yükleme, yüksek takım giderleri ve yüksek kalite kontrol maliyetleri gibi birçok probleme neden olmaktadır. Bununla birlikte küresel pazarda rekabet edebilmek için küçük kitle (batch) üretim endüstrilerinde üretkenliğin geliştirilmesi önemlidir. Bu nedenle, hazırlık sürelerini ve süreç içi envanterleri azaltmak, termin sürelerini azaltmak, üretim maliyetlerini azaltmak ve pazar payını ve karlılığı arttırmayı sağlayan üretim kalitesini arttırmak için bazı yenilikçi yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Geleneksel imalat sistemleri, bu tip değişikliklere cevap vermede yeteri kadar esnek değildir. Grup teknolojisi, imalat ve tasarım arasında böyle bir bağ sağlayabilmektedir (Jeon ve Leep, 2006).

Hücreyel İmalat Sistemi (HİS), benzer imalat özelliklerine göre parçaların parça aileleri, bu aileleri işleyecek makinelerin de makine grupları halinde bir araya getiren grup teknolojisi anlayışının bir uygulamasıdır (Groover, 2008).

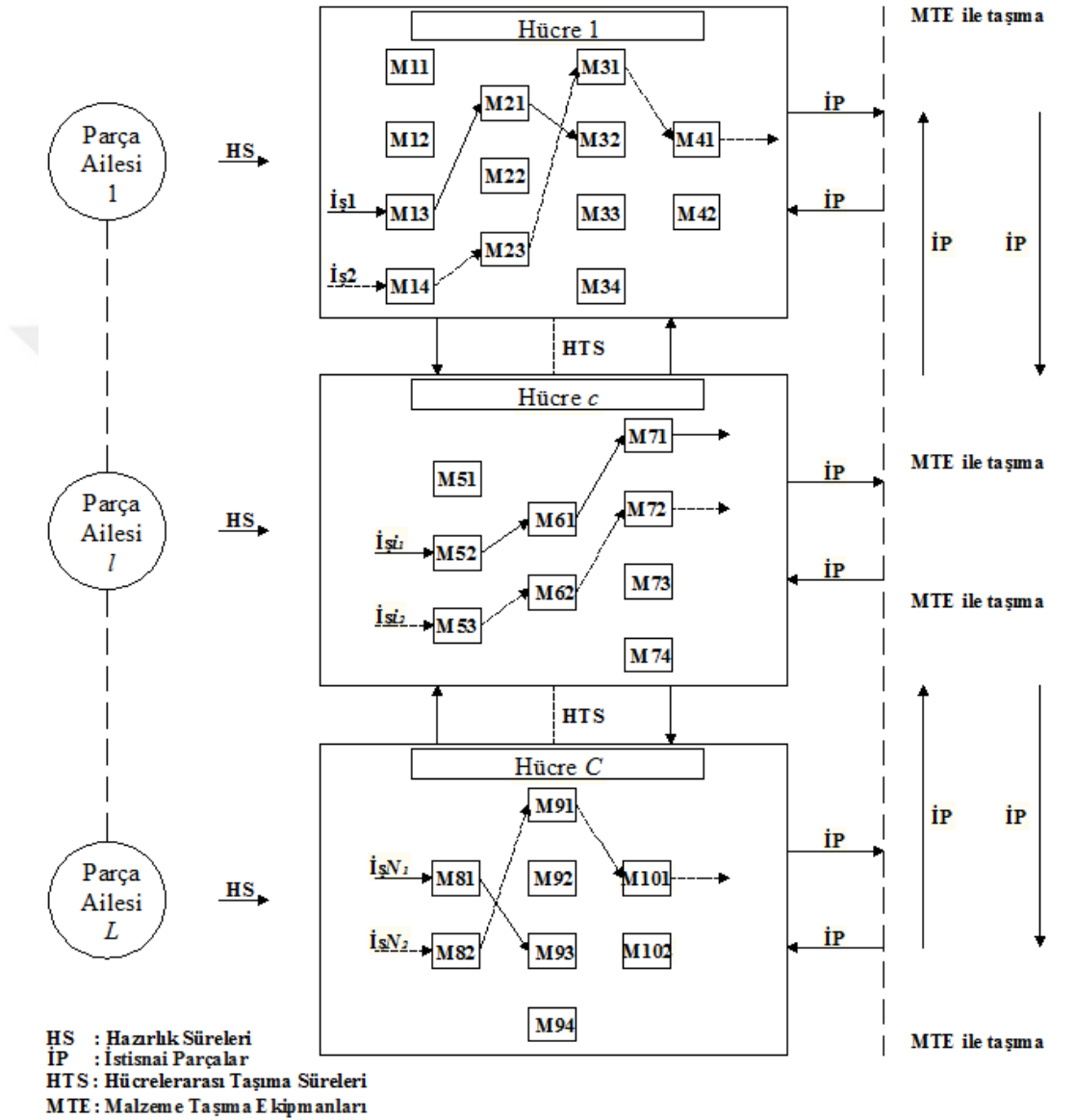
HİS’de hücrelerarasındaki parça akışı ortadan kaldırılmakta ve bunun sonucu olarak istisnai parçaların (exceptional parts) neden olduğu hücrelerarası hareketler, hücrelerarası taşıma süreleri ve malzeme taşıma maliyetleri azaltılmaktadır. Buna ek olarak, benzer işleme gerek duyan parçalar bir hücrede işlendiği için hazırlık süresi, süreç içi envanter, akış süresi ve üretim termin süreleri de azalmaktadır (Logendran, 1998).

Üretim gereksinimlerindeki benzerlik, kümelemeyi kolaylaştırmada kullanılmaktadır. Her bir parça ailesi için, parça ailesinin tüm işlem gereksinimleri ilgili makine hücresinde tamamlanacağından özel bir makine hücresi oluşturulur. Bununla birlikte gerçek hayat uygulamalarında bazı parçaların iki ya da daha fazla hücrede işlem görülmesine izin verilmektedir. Benzer şekilde, bazı makineler de iki veya daha fazla parça ailesi tarafından ihtiyaç duyulabilmektedir. Bu parçalar ve makineler sırasıyla istisnai parçalar ve dar boğaz makineler olarak adlandırılmaktadır (Shanker ve Vrat, 1998).

İhmal edilebilir ya da küçük bir hazırlık süresi genellikle her bir işin işlem süresine dâhil edilmesine rağmen büyük bir hazırlık süresi bir parça ailesinden diğerine işlem gören işlerin değişmesine neden olabilmektedir. Parça ailesi hazırlığı, çeşitli parça ailelerinin işlem gördüğü sıraya bağımlı ya da bağımsız olabilmektedir. Hazırlık sürelerini içeren hücre çizelgeleme problemleri, sıra bağımsız parça ailesi hazırlık süreleri ve sıra bağımlı parça ailesi hazırlık süreleri (SBPAHS) şeklinde iki sınıfa ayrılabilir.

HİS’deki problemler, şu iki alt problemten oluşabilmektedir: birincisi, hücrelerin yerleşimi ve hücre oluşturmayı içeren hücre tasarım problemi; ikincisi ise parçaların yüklemesi (loading) ve çizelgelemesi ile ilgili operasyonel problemdir (Elmi ve ark., 2011). Bir hücre yapılandırması, akış tipi yerleşim (flow line layout) ve atölye tipi yerleşim (job shop layout) gibi iki tür içerebilmektedir. Parçalar, atölye tipi hücre yerleşimde çeşitli rotalarla makineleri ziyaret edebilirken akış tipi hücre yerleşimde aynı sırada makine ziyareti gerçekleşmektedir (Tang ve ark., 2010). Şekil 1.1., *C* sayıda hücre ve *L* sayıda parça ailesi içeren hücresel imalattaki esnek atölye tipi

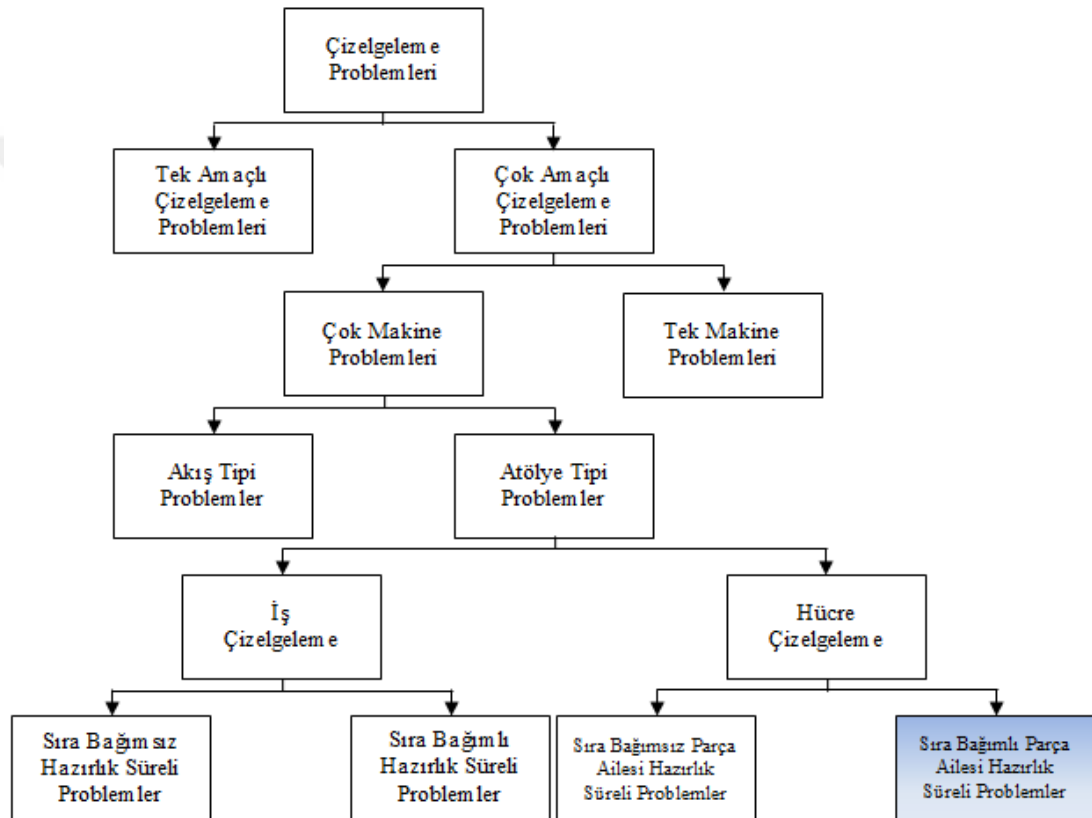
çizelgelemeyi örneklemektedir. Bu şekle göre, her bir hücrede çok sayıda özdeş paralel makineli iş merkezleri bulunmaktadır. Örneğin, Şekil 1.1.'deki M12, hücre 1'deki birinci iş merkezinin ikinci özdeş paralel makinesini ifade etmektedir.



Şekil 1.1. Esnek imalat hücrelerinin örnek bir yapısı

Hücre çizelgeleme problemlerinde, iki ya da daha fazla hücredeki makinelerde işleme tabi tutulan parça anlamına gelen istisnai parçalar ve bir makineyi ya da iş merkezini birden fazla ziyaret edilmesine izin veren parça anlamına gelen yeniden işlenebilir parçalar (reentrant parts) vardır. Pinedo (2002)'ya göre yeniden işlenebilir parça yeniden devir (recirculation) olarak tanımlanmıştır. Ayrıca bir makineye ait olan özdeş

paralel makineler (identical parallel machines) de vardır. Buna ek olarak, gerçek hayat uygulamalarında, birçok çelişen amaç yüzünden esnek bir ortamdaki hücre çizelgeleme süreci çok da kolay olmamaktadır. Tüm bu karakteristikleri dikkate alarak oluşturulan bir problemin makul bir hesaplama süresi içinde en iyi çözüme ulaşmasının zor olacağı öngörülmektedir. Daha anlaşılabilir olmak için, SBPAHS'yi dikkate alan çok amaçlı esnek atölye tipi hücre çizelgeleme problemlerinin (EAHTÇP) çizelgeleme problemi içindeki yeri Şekil 1.2.'de gösterilmiştir.



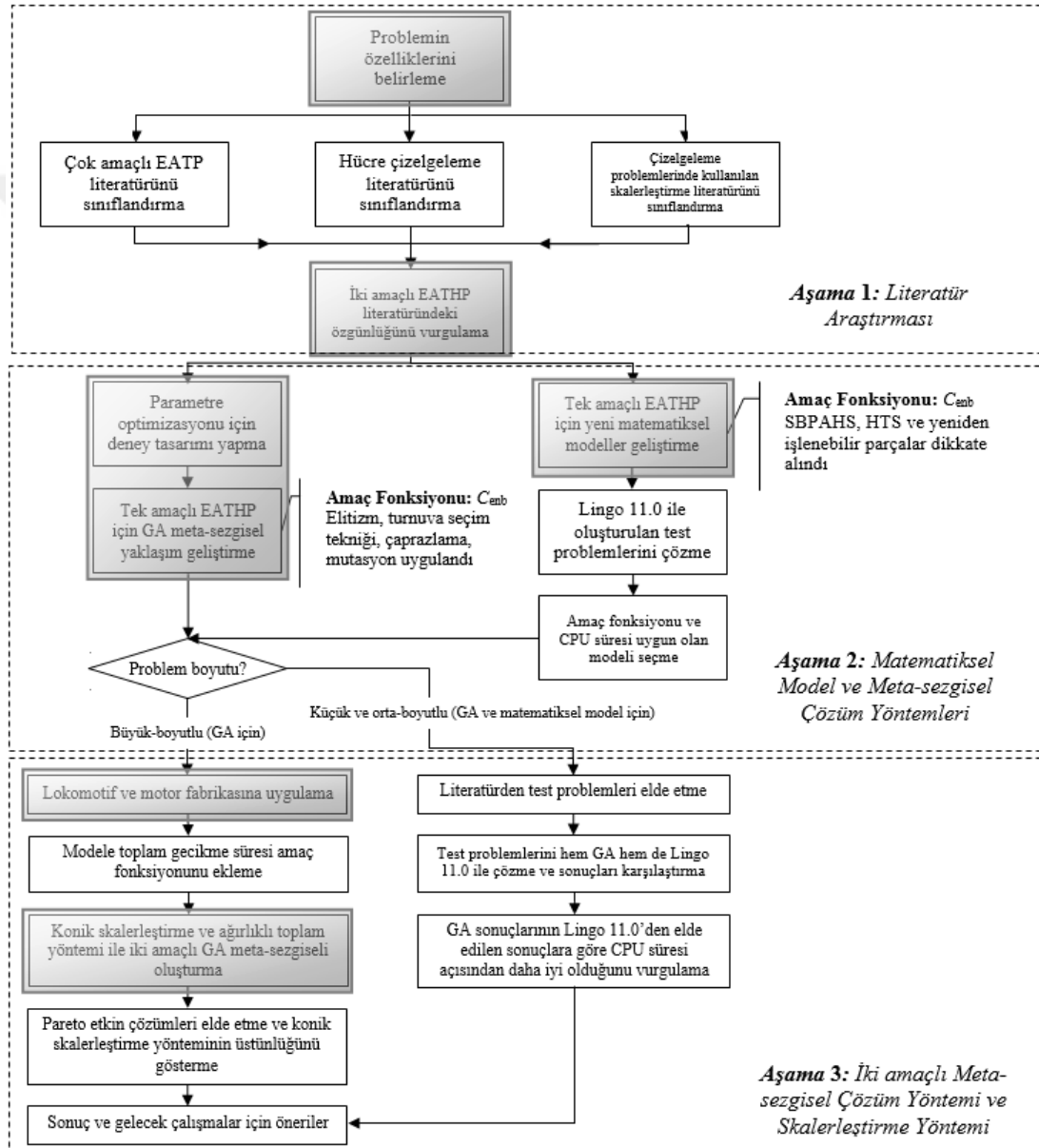
Şekil 1.2. Çizelgeleme problemlerinin ağaç diyagramıyla gösterimi

Bu tez çalışmasında, hücrelerarası taşıma süresi (HTS) ve SBPAHS'yi dikkate alan atölye tipi hücre çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Bu, her makine tam olarak bir hücreye atandıktan ve parça aileleri oluşturulduktan sonra esnek atölye tipindeki her bir işin operasyonu HTS ve SBPAHS dikkate alınarak çizelgelenmesi anlamına gelmektedir. Problemin tüm bu karakteristiklikleri göz önüne alması gerçek hayat problemine olan yakınlığı arttırmaktadır. Literatürde tüm bu karakteristikleri dikkate alarak oluşturulan hücre çizelgelemesine rastlanılmadığından bu boşluğu doldurmak

için söz konusu problem için yeni bir matematiksel model ilk defa Deliktas, Torkul ve Ustun tarafından 2017 yılında önerilmiştir (Deliktas ve ark., 2017). Çalışmada ele alınan problemin özgün olmasının yanı sıra hem yeni bir matematiksel model hem de meta-sezgisel yaklaşımla bir çözüm yöntemi sunarak literatüre katkı sağlanmıştır. HİS'nin avantajından faydalanılarak oluşturulan iyi bir çizelgeleme süreci müşteri taleplerine hızlı cevap verdiği için firmaya rekabet avantajı da sağlayabilmektedir. Bu tezin çerçevesini gösteren bir diyagram Şekil 1.3.'te gösterilmektedir. Kesikli çizgi, bu tezin kapsamına giren her bir aşamayı göstermektedir. Gri renkli kısımlar ana katkıları vurgulamaktadır. Bu üç aşama aşağıdaki gibi açıklanmıştır:

- a. Aşama 1. Literatür araştırması: Bu tez çalışmasında hücreli imalat sisteminde esnek atölye tipi çizelgeleme problemi çalışılmıştır. Ayrıca iki amaçlı EATHÇP'yi çözmede istisnai parçalar, yeniden işlenebilir parçalar, HTS ve SBPAHS dikkate alınmıştır. Literatür incelemesi yapılmış ve tüm bu karakteristikleri dikkate alan EATHÇP ile ilgili bir çalışma yapılmadığı anlaşılmıştır. Bu nedenle, geleneksel sistemlerdeki çok amaçlı esnek atölye tipi çizelgeleme problemleri, hücreli çizelgeleme problemleri ve çizelgeleme problemlerinde kullanılan ana skalerleştirme yöntemleri ile ilgili bir literatür çalışması yapılmış ve iki amaçlı EATHÇP'nin literatürdeki özgünlüğü vurgulanmıştır.
- b. Aşama 2. Matematiksel model ve meta-sezgisel çözüm yöntemleri: Matematiksel model, problemin yapısının anlaşılabilirliği açısından büyük bir önem arz etmektedir. Bu nedenle, EATHÇP'yi çözmede tüm bu karakteristikleri dikkate alan yeni matematiksel modeller üretilmiştir. İleride yapılacak araştırmada kullanılabilmesi ve bu modellerin doğruluğunu test edilebilmesi için yeni test problemleri türetilmiştir. Bu modeller ilk önce en büyük tamamlanma süresi (C_{enb}) amaç fonksiyonu ile tek amaçlı olarak Lingo 11.0 yazılımı ile çözülmüştür. Önerilen tek amaçlı karma tamsayılı doğrusal olmayan matematiksel modeller arasından işlem süresine (CPU süresi) ve en küçük C_{enb} değerine sahip olan model seçilmiştir. Bu matematiksel modelin en fazla 4 hücre, 4 parça ailesi, 15 parça ve 12 makineye kadar çözebildiği tespit edilmiştir. Ayrıca, tek amaçlı modele toplam gecikme süresi amaç fonksiyonu

eklenerek model iki amaçlı hale getirilmiştir. İki amaçlı modeli tek amaçlı modele dönüştürmek için konik skalerleştirme metodu, ağırlıklı toplam metodu ve ε -kısıt yöntemi gibi skalerleştirme metotları önerilmiştir. Orta boyutlu test problemlerinden biri üzerinde bu yöntemler uygulanmış ve bu test problemi için Pareto etkin çözümleri üretilmiştir. Pareto etkin çözümlerine göre konik skalerleştirme metodunun üstünlüğü vurgulanmıştır.



Şekil 1.3. Tezin genel çerçevesi

- c. Aşama 3. İki amaçlı meta-sezgisel çözüm yöntemi ve skalerleştirme yöntemi: Önerilen matematiksel modelle sadece küçük ve orta boyutlu problemler çözülebilmektedir. Büyük boyutlu problemlerin çözümü, doğrusal olmayan modellerle sonlu zamanlarda olamayacağı ya da çok uzun süreceği için önerilen tek ve çok amaçlı matematiksel modelin çözümünde Lingo paket programı büyük boyutlu problemler için yetersiz kalmıştır. Büyük boyutlu problemleri çözebilmek için C_{enb} amaç fonksiyonunu enküçükleyen tek amaçlı bir genetik algoritma meta-sezgisel çözüm yöntemi önerilmiştir. Önerilen genetik algoritmanın optimum veya optimuma yakın çözüme ulaşmasına etki eden parametrelerin en iyi kombinasyonu belirlemek amacı ile bir deney tasarımı gerçekleştirilmiştir. Literatürden elde edilen kırk-iki farklı veri seti ve lokomotif ve vagon fabrikasından elde edilen verilerle bir uygulama çalışması analiz edilmiştir. Hesaplama sonuçları, Lingo 11.0 yazılımı ile elde edilen en iyi sonuçlara önerilen tek amaçlı genetik algoritma çözüm yöntemi ile daha kısa işlem süresi içinde ulaşıldığını göstermiştir. Ayrıca, gerçek hayat problemi için karar vericinin talebi ile modele toplam gecikme süresi olarak ikinci bir amaç fonksiyonu eklendi ve problem, iki amaçlı matematiksel modeli kullanan genetik algoritma çözüm yöntemi ile çözülmüştür. İki amaçlı modelin çözümü için iki farklı skalerleştirme yöntemi kullanılmıştır. İlk olarak, en çok kullanılan skalerleştirme yöntemi olan toplam ağırlıklı skalerleştirme yöntemi kullanılmıştır. İkinci metot ise Gasimov (2001) tarafından önerilen konik skalerleştirme yaklaşımıdır. Bu yaklaşım, çok amaçlı esnek atölye tipi hücre çizelgeleme problemine ilk kez uygulanmıştır. Bu çözüm yönteminin sonucuna göre, konik skalerleştirmeli genetik algoritma yaklaşımının ağırlıklı toplam skalerleştirmeli genetik algoritma yaklaşımına göre avantajları gösterilmeye çalışılmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde, literatürde mevcut olan çok amaçlı esnek atölye tipi çizelgeleme problemi, hücre çizelgeleme problemi ve çok amaçlı çizelgeleme problemi üzerine yapılan çalışmalar incelenmiş ve konu ile ilgili teroik bilgilere yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde, problemin doğru bir şekilde tanımlanabilmesi ve küçük boyutlarda en iyi çözümün araştırılması için yeni bir doğrusal olmayan matematiksel model geliştirilmiştir. Önerilen tek amaçlı matematiksel model bir örnek ile açıklanmış ve farklı test problemleri ile modelin güvenilirliği ve doğruluğu kanıtlanmıştır. Ayrıca modele ikinci bir amaç fonksiyonu eklenmiş ve skalerleştirme metotları kullanılarak Pareto etkin çözümler elde edilmeye çalışılmıştır. Model, Lingo 11.0 yazılımında kodlanmıştır. Bu sonuçlar, büyük boyutlu problemler için geliştirilen meta-sezgisel yöntemin performansının değerlendirilmesinde de kullanılmıştır.

Dördüncü bölümde, büyük boyutlu gerçek hayat problemleri için yeni bir genetik algoritma çözüm yaklaşımı önerilmiştir. Çözüme etki eden faktörler ve bu faktörlerin seviyelerinin belirlenerek en iyi çözümü bulmak için deney tasarımı yaklaşımıyla parametre eniyilemesi gerçekleştirilmiştir. Önerilen genetik algoritma çözüm yaklaşımı literatür problemlerinden türetilen test problemleri üzerinde denenmiş ve elde edilen sonuçlar matematiksel modelin kısıtlı sürede elde ettiği sonuçlarla kıyaslanmıştır.

Beşinci bölümde, lokomotif ve vagon fabrikasında kritik olarak belirlenen bir imalat atölyesinde daha öncesinde etkin bir şekilde oluşturulmuş sanal hücreler üzerinde esnek atölye tipi hücre çizelgeleme probleminin eşzamanlı çözümü araştırılmıştır. Ayrıca, geliştirilen modele ikinci bir amaç eklenmiş ve model iki amaçlı hale dönüştürülmüştür. Geliştirilen iki amaçlı genetik algoritma, skalerleştirme yöntemleri ile çözülmüş ve Pareto etkin çözümler gösterilmiştir. Bu model, Microsoft Visual C# 2013 yazılımı ile kodlanmıştır.

Son bölümde, çalışmanın sonuçları, literatüre katkıları ve gelecek çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

BÖLÜM 2. TEMEL TANIMLAR ve LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Çizelgeleme üzerine yapılan çalışmalar yıllardır devam eden bir faaliyet olmuştur. Geleneksel sistemler yerine HİS’de yapılan çizelgeleme problemlerinin performans avantajlarından dolayı bu tez çalışmasında hücreli imalatındaki esnek atölye tipi hücre çizelgeleme problemi çalışılmıştır. Gerçek hayat çizelgeleme problemlerinin çok amaçlı doğasından ötürü de problem, iki amaçlı olarak düşünülmüştür. Literatürdeki bu boşluğu doldurmak ve lokomotif ve vagon fabrikasındaki gerçek hayat problemini çözmek için çok amaçlı esnek atölye tipi hücre çizelgeleme problemi çalışılmıştır. Bu bölümde, geleneksel sistemde yapılan çok amaçlı esnek atölye tipi çizelgeleme problemine, çizelgeleme alanındaki ana skalerleştirme yöntemlerine, hücre çizelgeleme problemlerine ilişkin literatür araştırmasına ve probleme özgü genel tanımlamalara yer verilecektir.

2.1. Çok Amaçlı Atölye Tipi Çizelgeleme Problemi Literatür Araştırması

Çizelgeleme, bir ya da daha fazla amacı eniyilemek için belirli zaman aralıklarında sınırlı kaynaklara işlerin tahsis edildiği bir karar verme sürecidir (Pinedo, 2002). Doğru bir çizelgeleme süreci, üretim sistemleri için daima başarı faktörlerinden biri olmuştur. Çizelgeleme problemlerinde tek makineli sistem, diğer tüm sistemlerin en basit ve en özel halidir. Bununla birlikte çok makineli sistem, işlerin birden fazla işlem gerektirdiği durumu belirtir. Akış tipi, atölye tipi ve açık atölye tipi, çok makineli çizelgeleme problemlerinin en temel üç modelidir. Çok makineli çizelgeleme problemlerinde, işlerin rotası önem arz etmektedir. İşlerin hepsi makineleri aynı sırada ziyaret ediyorsa problem akış tipi olarak adlandırılır. Her işin kendine ait bir rotası varsa problem atölye tipi olarak adlandırılır. Her işin rotası sabit değilse ve planlamacı tarafından belirlenebiliyorsa problem açık atölye tipi olarak adlandırılır (Torkashvand ve ark., 2017).

Aynı işlemi gerçekleştirebilen birden fazla makinenin bir araya gelmesiyle oluşan paralel makineli sistem, çizelgeleme problemlerinin en zor sınıflarından biri haline gelmiştir. Paralel makine çizelgeleme problemleri, özdeş paralel makineler, benzer paralel makineler ve birbirinden bağımsız paralel makineler olmak üzere üç kategoride sınıflandırılabilir (Hamzadayı ve Yıldız, 2017). Pinedo (2002), bu makineleri aşağıdaki gibi tanımlamıştır:

- Özdeş (identical) paralel makineler, aynı işlemi yapan aynı hıza sahip makineleri,
- Benzer (uniform) paralel makineler, aynı işlemi yapan birbirinden farklı hızlara sahip makineleri,
- Birbirinden bağımsız (unrelated) paralel makineler, makine hızlarının işlere göre değiştiği makineleri ifade etmektedir.

Esnek atölye tipi çizelgeleme problemi (EATP), operasyonların mevcut bir makine seti içinden herhangi bir makinede işlem görülmesine izin veren atölye tipi çizelgeleme probleminin (ATP) genişletilmiş halidir (Pezzella ve ark., 2008). ATP, NP-zor olarak bilinen ve oldukça karmaşık bir problem tipidir. Bu nedenle, EATP de NP-zor ve kombinatoriyal bir problem sınıfına girmektedir (Garey ve ark., 1976). EATHÇP, hücreli imalat ortamında klasik esnek atölye çizelgeleme probleminin genişletilmiş hali olması nedeniyle EATHÇP'nin de NP-zor sınıfa girdiği düşünülmektedir. NP-zor bugüne kadar polinom zamanda çözüm bulunamamış ve bunun olmayacağı ispatlanamamış problemlerin çözüm karmaşıklığını tanımlamak için kullanılmaktadır (French, 1982). Esnek atölye tipi çizelgelemede her makine birden fazla tipte işlem gerçekleştirme kabiliyetine sahip olabilir. Bu nedenle, her bir iş alternatif makinelerden birinde işlenebilir. EATP'de işlerin çizelgelenmesi problemi iki alt probleme ayrılabilir:

- a. Uygun makine seti içinden seçilen bir makineye her bir operasyonu atayan atama (routing) alt problemi,
- b. Önceden belirlenmiş amaç fonksiyonunu enküçükleyecek şekilde uygun bir çizelge elde etmek için tüm makinelere atanan operasyonların sıralanmasını ve

zamanlamasını içeren çizelgeleme alt problemidir (Liu ve ark., 2009; Zhang ve ark., 2011).

Literatürde gerçek hayat problemlerinden esinlenen çizelgeleme problemleri tek amaçlı olarak ele alınsa da bazı yazarlar çizelgeleme problemlerinin çoğunlukla çok amaçlı bir nitelik taşıdığına inanmaktadır. Çok amaçlı esnek atölye tipi çizelgeleme problemlerini çözebilmek için literatürde birçok farklı algoritma mevcuttur. Bu çalışmalar Tablo 2.1.'de özetlenmektedir. Bu tabloda görüldüğü gibi, yaklaşık yirmi yıl içerisinde ele alınan çok amaçlı esnek atölye tipi çizelgeleme problemleri, ele alınan amaç fonksiyonları, çözüm yöntemleri ve probleme ilişkin önemli noktalar dikkate alınarak sınıflandırılmıştır. Yapılan literatür çalışmasında görüldüğü üzere en fazla kullanılan amaçlar, işlerin en büyük tamamlanma süresinin (C_{enb}) enküçüklenmesi, toplam gecikme süresinin enküçüklenmesi, ortalama akış süresinin enküçüklenmesi, toplam ağırlıklı gecikmenin enküçüklenmesi, geciken iş sayısının enküçüklenmesi ve ağırlıklı geciken işlerin sayısının enküçüklenmesi şeklindedir.

Tablo 2.1. Çok amaçlı esnek atölye tipi çizelgeleme problemleri için sezgisel temelli modellerin özeti

No	Referanslar	Amaç fonksiyonları	Çözüm yöntemleri	Probleme ilişkin önemli noktalar
1	Lu ve ark. (2017)	1. C_{enb} (enk) 2. Toplam ilave kaynak tüketimi (enk)	Çok amaçlı kesikli virüs optimizasyon algoritması	Kontrol edilebilir işlem süreleri
2	Yin ve ark. (2017)	1. C_{enb} (enk) 2. Toplam enerji tüketimi (enk) 3. Gürültü emisyonu (enk)	Çok amaçlı GA	Simpleks kafes tasarımı
3	Ahmadi ve ark. (2016)	1. C_{enb} (enk) 2. Çizelge gecikmesi (stability) (enk)	Genetik algoritma (GA) temelli sezgisel	Rastgele makine bozulması
4	Anvari ve ark. (2016)	1. C_{enb} (enk) 2. Toplam proje maliyeti (enk)	Çok amaçlı GA	Kaynak kısıtlı planlama
5	Kaplanoğlu (2016)	1. C_{enb} (enk) 2. Makine başına düşen en büyük iş yükü (enk) 3. Makinelerin toplam iş yükü (enk)	Tavlama benzetimi (TB) algoritması	
6	Piroozfard ve ark. (2016)	1. Toplam karbon izi (footprint) (enk) 2. Toplam geciken iş kriteri (enk)	Çok amaçlı evrimsel algoritma (EA)	
7	Shen ve Yao (2015)	1. C_{enb} (enk) 2. Toplam gecikme süresi (enk) 3. Makine başına düşen en büyük iş yükü (enk) 4. Çizelge gecikmesi (enk)	Çok amaçlı EA temelli sezgisel	Dinamik esnek atölye tipinde rastgele olaylar

Tablo 2.1. (Devamı)

No	Referanslar	Amaç fonksiyonları	Çözüm yöntemleri	Probleme ilişkin önemli noktalar
8	Gao ve ark. (2014)	1. C_{enb} (enk) 2. Erken ve geç kalma süresinin ortalaması (enk)	Pareto temelli grup kesikli harmoni arama (HA) algoritması	Yerel arama yöntemleri
9	Jia ve Hu (2014)	1. C_{enb} (enk) 2. Makinelerin toplam iş yükü (enk) 3. En fazla yüklenen makinenin iş yükü (enk)	Çok amaçlı tabu arama (TA) algoritması	Geri sıçrama takibi (back-jump training), rota birleştirme
10	Li ve ark. (2014)	1. C_{enb} (enk) 2. Makinelerin toplam iş yükü (enk) 3. Kritik makine iş yükü (enk)	Kesikli yapay arı koloni algoritması	Önleyici bakım kısıtları, bakım gerektirmeyen kısıtlar, TA temelli yerel arama
11	Shahsavari-Pour ve Ghasemishabankareh (2013)	1. C_{enb} (enk) 2. En fazla yüklenen makinenin iş yükü (enk) 3. Makinelerin toplam iş yükü (enk)	Hibrit GA/TB yaklaşımı	
12	Xiong ve ark. (2013)	1. C_{enb} (enk) 2. Çizelge gecikmesi (enk)	Çok amaçlı EA	Rastgele makine bozulması
13	Li ve ark. (2012)	1. C_{enb} (enk) 2. Makinelerin toplam iş yükü (enk) 3. Kritik makine iş yükü (enk)	Kurbağa sıçrama algoritması	Yerel arama yöntemleri
14	Li ve Pan (2012)	1. C_{enb} (enk) 2. Makinelerin toplam iş yükü (enk) 3. Kritik makine iş yükü (enk)	Kesikli kimyasal reaksiyon optimizasyon algoritması	Önleyici bakım kısıtları, bakım gerektirmeyen kısıtlar, TA temelli yerel arama
15	Moslehi ve Mahnam (2011)	1. C_{enb} (enk) 2. Makinelerin toplam iş yükü (enk) 3. Kritik makine iş yükü (enk)	Çok amaçlı parçacık sürü optimizasyon (PSO) algoritması	Yerel arama yöntemleri
16	Fattahi ve Fallahi (2010)	1. C_{enb} (enk) 2. Başlangıç süresi sapması ve toplam sapma cezası (enk)	GA	
17	Li ve ark. (2010)	1. C_{enb} (enk) 2. Makinelerin toplam iş yükü (enk) 3. Kritik makine iş yükü (enk)	Hibrit TA algoritması	Değişken komşuluk arama
18	Li ve Huo (2009)	1. Makinelerin toplam hazırlık süresi (enk) 2. İşlerin bekleme süresi (enk)	Modifiye GA	Kapasiteli paralel makineler, hız kısıtı, makinelerin bakımı, ara stok kısıtlaması
19	Xing ve ark. (2009)	1. C_{enb} (enk) 2. Makinelerin toplam iş yükü (enk) 3. Kritik makine iş yükü (enk)	Simülasyon modelleme	
20	Zhang ve ark. (2009)	1. C_{enb} (enk) 2. Makinelerin toplam iş yükü (enk) 3. Kritik makine iş yükü (enk)	Bütünleştirilmiş PSO/TA yaklaşımı	

Tablo 2.1. (Devamı)

No	Referanslar	Amaç fonksiyonları	Çözüm yöntemleri	Probleme ilişkin önemli noktalar
21	Saad ve ark. (2008)	1. C_{enb} (enk) 2. Makinelerin toplam iş yükü (enk) 3. Kritik makine iş yükü (enk) 4. Erken tamamlanma/gecikme cezaları (enk) 5. Üretim maliyeti (enk)	Çok amaçlı GA	Sipariş edilen ağırlıklı ortalama operatörler (ordered weighted averaging operators), Choquet Integral yöntemi
22	Xia ve Wu (2005)	1. C_{enb} (enk) 2. Makinelerin toplam iş yükü (enk) 3. Kritik makine iş yükü (enk)	Hibrit PSO/TB yaklaşımı	
23	Kacem ve ark. (2002)	1. C_{enb} (enk) 2. Makinelerin toplam iş yükü (enk) 3. En fazla yüklenen makinenin iş yükü (enk)	Hibrit bulanık mantık ve EA	

Literatürde çizelgeleme problemlerinde öne çıkan bazı temel kavramlar Pinedo (2002)'de izleyen şekilde belirtilmiştir:

İşlem süresi: Bir işin her bir makinede geçirdiği süre olarak ifade edilmektedir.

Geliş zamanı: Bir işin işleme başlayacağı en erken zamandır.

Teslim zamanı: Bir işin teslim zamanı, tamamlanma zamanını veya sevkiyatın teslim zamanını göstermektedir. İşin tamamlanması, teslim zamanından sonraya bırakılırsa ve erken yapılırsa ceza oluşabilmektedir.

Ağırlık: Bir işin ağırlığını göstermektedir ve bu işin sistemdeki diğer işler arasındaki göreceli önemini gösteren öncelik faktörüdür.

Başlangıç zamanı: Bir işin makine üzerinde işleme başladığı zamanı göstermektedir.

Tamamlanma süresi: Bir işin makine üzerindeki işlemi tamamladığı süreyi göstermektedir.

Hazırlık süresi: Makine ya da malzeme üzerindeki takım ya da kalıp değişimleri için geçen süreyi ifade etmektedir.

Sıra bağımsız hazırlık süresi: Gerekli hazırlıklar sadece işlem görecektir işe bağlı olduğu zaman ortaya çıkan süreyi ifade etmektedir.

Sıra bağımlı hazırlık süresi: Gereken hazırlıklar hem o anda işlem görecektir işe hem de bir önceki işe bağlı olduğu zaman ortaya çıkan süreyi ifade etmektedir.

Makine bozulmaları/arızaları: Makinelerin sürekli bir biçimde kullanılabilir olmadığı anlamına gelmektedir. Makine tamir maliyetleri, makine eskimesine bağlı üretim sürelerinde artış ve üretim maliyeti gibi göstergeleri önemli ölçüde etkilmektedir.

Bölünebilme (preemptions): Bir işin tamamlanana kadar makinede işlem görmesine gerek olmamaktadır. Herhangi bir anda bir işin işlem görmesi durdurulmakta ve farklı bir iş işleme sokulmaktadır. İşlemi yarıda kesilen iş tekrar makineye yerleştirildiği zaman sadece kalan süre kadar işlem görmektedir.

Öncelik kısıtları: Öncelik kısıtları tek makine ya da paralel makine ortamında ortaya çıkabilmektedir. Diğer işin işleme başlamasına izin verilmeden önce bir veya daha fazla iş tamamlanmak zorundadır.

Yeniden devir (recirculation): Atölye ya da esnek atölye tipinde görülmektedir. Bir işin bir makineyi ya da iş istasyonunu birden fazla kez ziyaret etmesi anlamına gelmektedir.

2.2. Hücre Çizelgeleme Problemi Literatür Araştırması

Son yıllarda, imalat sistemleri geleneksel ortamlardan çok tesisli ağlar ve çok hücreli atölyeler dâhil esnek dağıtık ortamlara doğru bir evrimleşme göstermektedir. Çok tesisli üretim, coğrafi olarak farklı yerlere dağıtılabilen birkaç fabrikadan oluşmaktadır. Çok hücreli atölyeler de aynı tesiste yer alan birkaç bağımsız imalat hücresini içermektedir. Bu atölyeler, mevcut tüm imalat kaynaklarını kullanarak

yüksek hacimli üretime veya birden fazla ürün çeşidine izin vermektedir (Sule, 2001). Basit çok hücreli ortam için örnek bir tasarım daha önce Şekil 1.1.'de gösterilmiştir.

Çok hücreli sistemde yapılan esnek atölye tipi çizelgeleme ile ilgili çalışmalar klasik esnek atölye tipi çizelgeleme ile ilgili çalışmalara göre oldukça sınırlıdır. Bununla birlikte Tablo 2.2.'de görüldüğü gibi son yirmi yılda yapılan çalışmalar incelendiği zaman esnek atölye tipi hücre çizelgeleme problemi ile ilgili yapılan çalışmaların atölye tipi hücre çizelgeleme problemine, akış tipi hücre çizelgeleme problemine ve esnek akış tipi hücre çizelgeleme problemine göre oldukça sınırlı olduğu vurgulanmıştır. EATHÇP'nin imalatçıların taleplerini dikkate alan amaçları, parça aileleri arası hazırlık sürelerini, hücrelerarası taşıma sürelerini, yeniden işlenebilir parçaları, esnek rotaları göz önüne alması gerçek hayat problemine olan yakınlığını da arttırmaktadır. Tüm bu karakteristikleri dikkate alan bir çalışmaya rastlanılmadığı da Tablo 2.2.'de vurgulanmıştır.

Tablo 2.2. Hücre çizelgeleme problemleri üzerine yapılan çalışmaların kısa bir özeti

No	Referanslar	Problem tipi	Çözüm yöntemleri	Amaç fonksiyonu sayısı			Probleme ilişkin önemli noktalar
				Tek	İki	Çok	
1	Önerilen çalışma	EATHÇP	MM & GA		√		SBPAHS, HTS, yeniden işlenebilir parçalar, Taguchi deney tasarımı, esnek rotalar
2	Wu ve ark. (2017)	EATHÇP	GA	√			Esnek rotalar
3	Delgoshaei ve ark. (2016)	Hücre çizelgeleme problemi	MM & Hibrit GA/TB yaklaşımı			√	Taguchi deney tasarımı, hücrelerarası ve hücre içi taşımalar, maliyet belirsizliği
4	Elmi ve Topaloglu (2016)	Akış tipi hücre çizelgeleme problem	KKO	√			
5	Shahvari ve Logendran (2016)	Hibrit akış tipi hücre çizelgeleme problemi	MM & TA			√	SBPAHS
6	Chang ve Liu (2015)	EATHÇP	Hibrit GA	√			Taguchi deney tasarımı, esnek rotalar
7	Costa ve ark. (2015)	Akış tipi hücre çizelgeleme problemi	GA ve rastgele örnekleme arama yöntemleri	√			SBPAHS
8	Halat ve Bashirzadeh (2015)	Atölye tipi hücre çizelgeleme problemi	MM & GA	√			SBPAHS, HTS

MM: Matematiksel model, KKO: Karınca koloni optimizasyonu, YBS: Yapay bağışıklık sistemi, SBZPAHS: Sıra bağımsız parça ailesi hazırlık süresi, DT: Deney tasarımı, MA: Memetik algoritma

Tablo 2.2. (Devamı)

No	Referanslar	Problem tipi	Çözüm yöntemleri	Amaç fonksiyonu sayısı			Probleme ilişkin önemli noktalar
				Tek	İki	Çok	
9	Li ve ark. (2015)	Akış tipi hücre çizelgeleme problemi	MM & HA		√		SBPAHS, yerel arama yöntemleri
10	Lu ve ark.(2015)	EATHÇP	GA	√			HTS, esnek rotalar
11	Zeng ve ark. (2015)	Atölye tipi hücre çizelgeleme problemi	MM & GA	√			HTS
12	Balaji ve Porselvi (2014)	Akış tipi hücre çizelgeleme problemi	YBS/TB yaklaşımı	√			SBPAHS
13	Ebrahimi ve ark. (2014)	Akış tipi hücre çizelgeleme problemi	Çok amaçlı GA		√		SBPAHS, belirsiz teslim süreleri
14	İbrahim ve ark. (2014)	Akış tipi hücre çizelgeleme problemi	GA/PSO yaklaşımı	√			SBPAHS, DT
15	Tang ve ark. (2014)	Atölye tipi hücre çizelgeleme problemi	MM & Sezgisel Lagrangian gevşeme ayırıştırma yöntemi	√			HTS
16	Ziaee (2014)	EATHÇP	Sezgisel algoritma	√			İyi bir başlangıç çözüm, esnek rotalar
17	Li ve ark. (2013)	HİS’de parça çizelgeleme problemi	MM & Feromon tabanlı yaklaşım			√	HTS, esnek rotalar, çoklu-ajanlar
18	Solimanpur ve Elmi (2013)	Atölye tipi hücre çizelgeleme problemi	MM & TA yaklaşımı	√			SBZPAHS, hücrelerarası taşımalar
19	Karthikeyan ve ark. (2012)	Atölye tipi hücre çizelgeleme problemi	TB/TA yaklaşımı	√			
20	Shen ve Buscher (2012)	Atölye tipi hücre çizelgeleme problemi	TA	√			SBPAHS
21	Elmi ve ark. (2011)	Atölye tipi hücre çizelgeleme problemi	MM & TB	√			HTS, yeniden işlenebilir parçalar, SBPAHS
22	Giovanni ve Pezzella (2010)	EATHÇP	GA	√			Esnek rotalar
23	Kesen ve ark. (2010)	EATHÇP	MM & GA		√		Sanal hücre
24	Tang ve ark. (2010)	Atölye tipi hücre çizelgeleme problemi	MM & Dağılık arama yaklaşımı	√			HTS
25	Tavakkoli-Moghaddam ve ark. (2010)	Atölye tipi hücre çizelgeleme problemi	PSO yaklaşımı		√		HTS
26	Hamed Hendizadeh ve ark. (2008)	Akış tipi hücre çizelgeleme problemi	TA	√			SBPAHS
27	Logendran ve ark. (2006)	Esnek akış tipi hücre çizelgeleme problemi	TA	√			Başlangıç çözüm bulma mekanizmaları, SBPAHS

MM: Matematiksel model, KKO: Karınca koloni optimizasyonu, YBS: Yapay bağışıklık sistemi, SBZPAHS: Sıra bağımsız parça ailesi hazırlık süresi, DT: Deney tasarımı, MA: Memetik algoritma

Tablo 2.2. (Devamı)

No	Referanslar	Problem tipi	Çözüm yöntemleri	Amaç fonksiyonu sayısı			Probleme ilişkin önemli noktalar
				Tek	İki	Çok	
28	Logendran ve ark. (2005)	Akış tipi hücre çizelgeleme problemi	Sezgisel algoritma	√			SBPAHS, DT, esnek rotalar
29	França ve ark. (2005)	Akış tipi hücre çizelgeleme problemi	GA/MA yaklaşımı	√			SBPAHS, yerel arama yöntemleri
30	Solimanpur ve ark. (2004)	Atölye tipi hücre çizelgeleme problemi	SVS algoritması	√			SBZPAHS, hücrelerarası taşımalar
31	Schaller ve ark. (2000)	Akış tipi hücre çizelgeleme problemi	Sezgisel algoritma	√			SBPAHS

MM: Matematiksel model, KKO: Karınca koloni optimizasyonu, YBS: Yapay bağışıklık sistemi, SBZPAHS: Sıra bağımsız parça ailesi hazırlık süresi, DT: Deney tasarımı, MA: Memetik algoritma

EATHÇP, hücresel imalat ortamında farklı işlerin kendilerine ait rotalarda makine hücrelerinde işlem görmesine izin veren klasik esnek atölye çizelgeleme probleminin genişletilmiş halidir. Başka bir deyişle, EATHÇP, çoklu imalat hücrelerindeki birçok işin çizelgelenmesiyle ilgilidir ve her bir hücre esnek atölye tipidir. Her ne kadar makinelerin hücre ve parçaların parça ailesi olarak daha önce gruplandığı problemlerin çizelgelemesi üzerine çalışma yapılsa da konunun daha net anlaşılabilmesi için hücresel imalat sistemleri ile genel bilgiye bu bölümde değinilmiştir.

HİS tasarımı, grup teknoloji uygulamasını içeren önemli bir imalat kavramıdır ve bir imalat tesisini çeşitli üretim hücrelerine bölmek için kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, benzer işlem gereksinimlerine sahip parçaların parça ailelerine ve farklı işlem yetenekleri olan makinelerin de makine hücrelerine gruplanması ve bir veya daha fazla parça ailesinin tek bir makine hücresinde işlenebilmesi anlamına gelmektedir. İmalat hücrelerinin oluşturulması, büyük boyutlu siparişe göre üretim sistemlerinin daha küçük boyutlu ve yönetilebilir parçalara bölünmesine imkân vermektedir. Geleneksel imalat sistemini hücresel sistemlere dönüştürmenin birkaç nedeni vardır. Bu sebepler, süreç içi envanterin azaltılmasını, termin sürelerinin azaltılmasını, parti büyüklüğünün azaltılmasını, süreçler arası taşıma maliyetlerinin azaltılmasını, verimliliğin ve etkinliğin geliştirilmesini, boş alanın kullanılmasını, işlem maliyetlerinin azaltılmasını, ürün tasarım ve kalitesinin geliştirilmesini, operasyonların daha iyi kontrol edilmesini ve hazırlık sürelerinin azaltılmasını içermektedir (Garbie, 2011).

Bununla birlikte, HİS'nin geleneksel yöntemlere kıyasla bazı zorlukları veya dezavantajları da vardır. Literatürde sıkça bahsedilen başlıca sorunlar şunlardır:

- HİS'nin performansı, ürün tasarımı, parça karışımı ve talep değişikliklerine duyarlıdır.
- Parçaların bir hücrede tamamen işlenmesini sağlamak, hücre içi hareketi ve ilgili kontrol ve kalite problemlerini ortadan kaldırmak için bazı makinelerin çoğaltılmasını gerektirir yani ilave sermaye yatırımı gereklidir (Baykasoğlu, 1999).
- Hücresel sistemler, atölyenin birden çok bağımsız hücrelere bölünmesi nedeniyle atölye tipi üretim sistemlerinden daha az esnektir. Sonuç olarak, düzgün tasarlanmadıkça performansları daha da kötüye gidebilir.
- Makinelerin yer değiştirme masrafları nedeniyle, hücre sistemleri oluşturmak maliyetlidir (Adil ve ark., 1996).

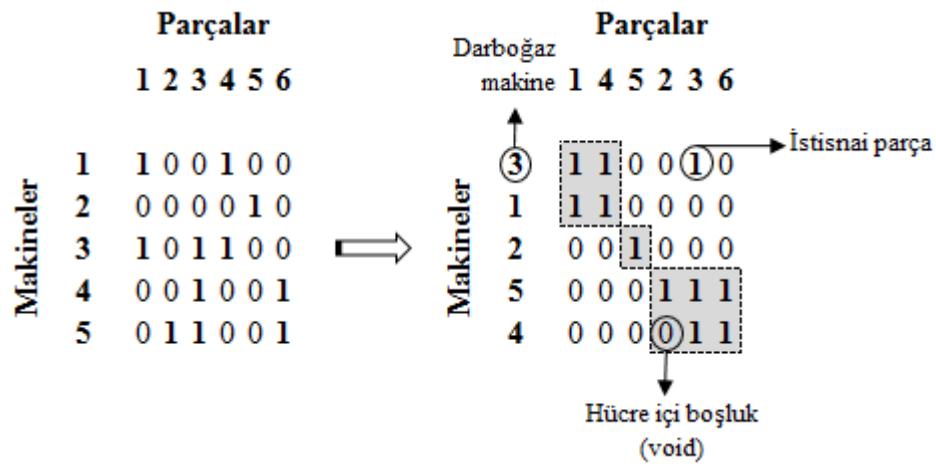
Grup teknolojisi, hücresel üretim sistemine hücreler oluşturularak uygulanmaktadır. Bir hücre, birbirine yakın yerleştirilmiş bir grup iş istasyonlarından oluşmaktadır. Bu iş istasyonları, benzer hammadde, parça, bileşen ya da bilgi taşıyıcı aileler üzerine çok sayıda sıralı operasyonların uygulandığı yerlerdir. Başka bir deyişle, bir hücre firma içinde nasıl ürün üretildiği ve müşterilere nasıl hizmet edildiği konusunda benzerliklerden yararlanmak için tasarlanmış küçük bir organizasyon birimidir (Hyer ve Wemmerlov, 2001). Genellikle, bir hücrenin tek bir parça ailesine ayrılmış olması, her parça ailesinin tercihen kendi hücresi içinde tamamen üretilmesi ve HİS'deki hücrelerin birbirleriyle minimum etkileşime girmesi tercih edilir (Irani, 1999).

İmalat sistemlerinin evrimleşme süreci içerisinde bazı araştırmacılar imalat hücrelerinin farklı tiplerini önermişlerdir. Bunlardan bazıları, holonik hücreler, fraktal hücreler, üretim/imalat hücreleri, dinamik imalat hücreleri, sanal imalat hücreleri, esnek imalat hücreleri, montaj hücreleri ve ürün odaklı hücrelerdir (Irani, 1999). Bunlar arasından Sanal İmalat Hücreleri (SİH) en dikkat çeken imalat hücre tipidir. Sanal bir hücre, fiziksel olarak birbirine yakın olmayan iş istasyonlarının mantıksal bir grubudur. İş, makine ve işçilerin mantıksal olarak gruplandırılması önceden

tanımlanmış bir mantığa dayanır. Makineler, normal bir hücrede olduğu gibi parça veya parça ailesine ayrılmıştır, ancak fiziksel olarak birbirlerine yakın konumlandırılmamaktadır. Yani, makineler fiziksel olarak hücrelere taşınmazlar. SİH'ler, bir planlama dönemi boyunca yeni işler biriktikçe talep değişikliklerine bağlı olarak periyodik bir şekilde örneğin her hafta veya her ay oluşturulabilmektedir (Slomp ve ark., 2005).

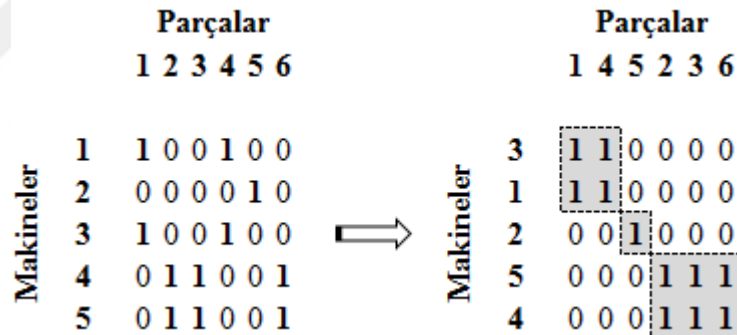
Bir HİS'nin tasarımı, hücre oluşumu (cell formation) ve hücresel yerleşim tasarımı (cellular layout design) gibi iki aşamadan oluşmaktadır. Hücre oluşumu problemi, benzer özelliklere sahip parçaların aynı hücrelere atandığı parça ailelerini ve makine gruplarını belirlemeye çalışırken hücresel yerleşim tasarımı da tesisteki hücre yerleşimini ve hücrelerdeki makinelerin yerleşimini tanımlamaya çalışmaktadır (Arkat ve ark., 2011). Hücre oluşturma, hücrelerarası hareketler veya mesafe, hücre içi hareketler, boşluk ve istisnai elemanlar, çıktı, gruplama etkinliği, gecikme, akış süresi ve toplam üretim maliyeti gibi performans ölçümlerini göz önünde bulundurmaktadır (Arkat ve ark., 2011; Imran ve ark., 2017; Jayaswal ve Adil, 2004; Saxena ve Jain, 2011; Su ve Hsu, 1998). Hücresel yerleşimde de, istisnai elemanlar (exceptional elements) kavramı ve darboğaz makineler (bottleneck machines) önem taşımaktadır. İstisnai parça/eleman (hücrelerarası taşımalar), başka bir hücredeki makinede işlem görmeye ihtiyaç duyan parça anlamına gelirken darboğaz makine, iki ya da daha fazla parça ailesi tarafından paylaşılan makine anlamına gelmektedir (Irani, 1999). Diğer taraftan, bir parça aynı hücre içinde yer alan makinede işlem görmüyorsa bu kavram hücre içi boşluk (void) olarak adlandırılmaktadır. Hücre oluşturma probleminin en iyi çözümü, diyagonal bloklar dışındaki hücrelerarası parça taşımalarını (istisnai elemanları) ve diyagonal bloklar içindeki hücre içi parça taşımalarını (boşlukları) enküçükleme ile sağlanmaktadır (Car ve Mikac, 2006). Diyagonal blok matrisine bir örnek Şekil 2.1.'de gösterilmektedir.

Şekil 2.1.'de görüldüğü gibi, üçüncü parça her iki hücreyi de ziyaret ettiği için hücrelerarası taşıma süresi ortaya çıkmaktadır. Buna ek olarak, üçüncü makine darboğaz makine olduğu için sıra bağımlı parça ailesi hazırlık süresi ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2.1. Parça-makine diyagonal blok matrisi (darboğaz makine, istisnai parça ve hücre içi boşluk)

İdeal bir çözümde, tüm “1”ler diyagonal blok matrisi içinde ve tüm “0”lar da diyagonal blok matrisi dışında olması beklenmektedir. Şekil 2.2., hücre oluşturma problemi için ideal bir çözümü göstermektedir.



Şekil 2.2. Hücre oluşturma problemi için ideal çözüm

Hücre oluşturmada ideal bir çözüme ulaşmak gerçek hayat problemlerinde her zaman mümkün olmayabilir. Hücre büyüklüğünün artması hücrelere daha fazla makine ataması ile gerçekleşeceği için daha az sayıda hücre oluşur. Daha az sayıda hücre ile hücrelerarası malzeme taşıma maliyetleri azalırken öte yandan hücrelerin kontrolü ve operasyonel verimliliği de düşecektir. Bununla birlikte, hücre büyüklüğünün azalması hücre sayısı ve hücrelerarası taşımayı arttırmaktadır (Bayram ve Şahin, 2016). Sonuç olarak, diyagonal blok matrisi içindeki hücre içi boşlukları ve dışındaki istisnai parçaları enküçükleyerek her bir hücre içerisinde farklı makinelerdeki parça hareketleri (hücre içi hareket) ve farklı hücrelerdeki parça hareketleri (hücrelerarası

hareket) en aza indirgenebilmektedir. Taşıma süreleri, hücrelerin tesisteki yerleşimlerine ve makinelerin de hücreler içindeki konumlarına göre değişebilmektedir (Chan ve ark., 2008).

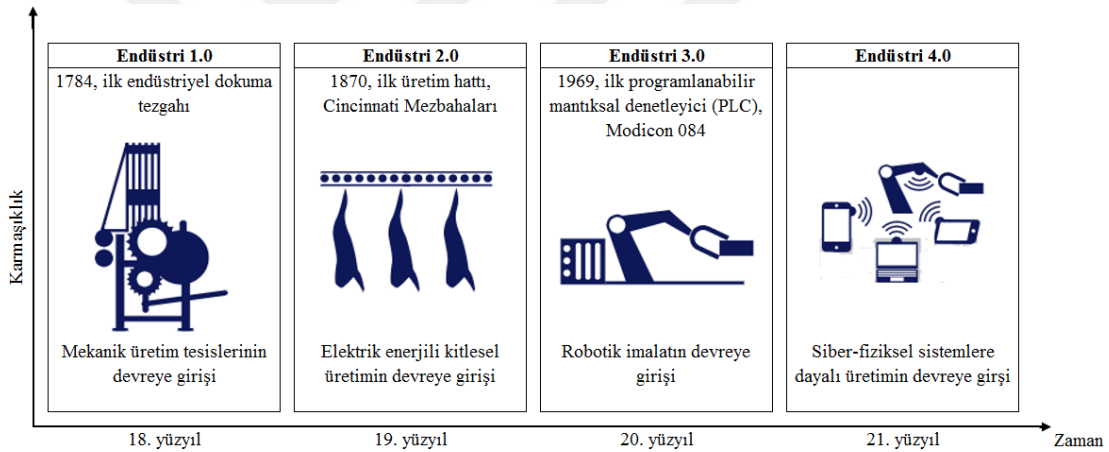
İmalat sistemi, hücresel imalat sistemi ile birlikte tek istasyonlu insanlı hücreler (single-station manned cells), tek istasyonlu otomatik hücreler (single-station automated cells), manuel montaj sistemi (manual assembly system), otomatik montaj sistemi (automated assembly system) ve esnek imalat sistemi gibi imalatın altı tipini içermektedir. Bu altı tip imalat sisteminin dışında, bilgisayarla bütünleşik imalat sistemi, yeniden yapılandırılabilir imalat sistemi gibi birçok imalat sistemi de bulunmaktadır. Bu temel üretim sistemleri, Endüstri 4.0 sisteminin tasarlanmasını mümkün kılmaktadır (Qin ve ark., 2016).

Bilgi ve iletişim teknolojisinin imalat sanayisine girişi, 1970'lerde başlamış olmasına rağmen Endüstri 4.0'ın ana fikri ilk kez 2011 yılında yayınlanmıştır. Endüstri 4.0'ın temelinde yer alan fikir, daha iyi çıktı elde etmek için planlama, kontrol ve tahmin etmede kullanılan ağa bağlı sensörlerle ve yazılımlarla karmaşık makine ve cihazların entegrasyonudur (Mrugalska ve Wyrwicka, 2016). Buna ek olarak, Endüstri 4.0, tedarik zincirindeki ürün ve süreçlere zeka ekleyerek Endüstri 3.0'dan Endüstri 4.0'a geçmesine imkan tanıyan teknolojiyi sağlayan bir sanayi devrimidir. Ayrıca, yaklaşık sıfır hata hedefini geliştirmede kullanılan nesnelerin interneti, bulut bilgi işlemi, siber fiziksel sistemler ve büyük veri analitiği yapılarından oluşmaktadır (Trappey ve ark., 2016). Endüstri 4.0'ın tarihsel olarak gelişimi Şekil 2.3.'te sunulmaktadır.

Endüstri 4.0 sisteminin karmaşık yapısına rağmen, oldukça büyük faydaları da vardır (Shafiq ve ark., 2015). Bunlar;

- Oldukça esnek bir yapıya sahiptir: Üretim prosedürleri, kısa sürede ortaya çıkan değer zincirindeki talep veya arızalardaki değişikliklere daha esnek davranmaktadır, yani üretim prosedürleri daha dinamik ve daha yapılandırılmıştır.

- Teslim sürelerini azaltır: Verilerin hatasız toplanması ve konuma bakılmaksızın kısa vadede karar vermede hızlı kullanılmasını sağlamaktadır.
- Küçük parti büyüklüğüyle özelleştirilir: Endüstri 4.0, kısa sürede yapılan modifikasyonlara imkan tanıdığı kadar tasarım, biçim, sipariş, planlama, üretim ve operasyon ile ilgili müşteriye özgü ölçütlerin birleştirilmesine izin vermektedir.
- Maliyetleri azaltır: İmalat otomasyonunu arttıran ve değer zincirlerini eniyileyen firmalar, böylece bağlı oldukları sermaye maliyetlerini düşürür. Firmalar, tesislerinin akıllı kontrolü sayesinde enerji maliyetlerini düşürebilmektedir. Oldukça iyi otomatik üretim sürecine sahip firmalar, düşük nitelikli çalışan sayısını azaltma ve dolayısıyla personel maliyetini azaltma eğilimindedir.



Şekil 2.3. Endüstrinin tarihsel gelişimi (Shafiq ve ark., 2015)

Lokomotif ve motor fabrikasında, makinelerle işlerin çizelgelemesini takip edecek sensörlerin kurulması ile işlerin başlangıç ve bitiş süreleri, makinelerin doluluk oranları veya boşta bekleme süreleri gibi verilerin işlenerek anlamlı sonuçlara dönüştürülmesi ile eldeki kaynakların optimum düzeyde kullanılmasına olanak sağlanabilir. Ayrıca, firmada otomatik taşıma sistemlerinin kullanılması ya da akıllı hatların oluşturulması, önerilen GA sonucu ortaya çıkan operasyon sıralamasından ve bu operasyonların hangi makinelerde üretilceğinin belirlenmesinden sonra bu verilerin firma içinde yer alabilecek robotik sistemlere aktarılması ile bu robotik sistemlerin bu ürünleri doğru makinelerle taşıması gibi Endüstri 4.0 sisteminin

temelinde yer alan sistemler kurulabilir. Bu tez çalışmasında önerilen GA'nın çözümü için gerekli verileri çekebilecek bilgi ağının kurulması ve uygun karar destek sisteminin oluşturulması ile firma içinde Endüstri 4.0 sisteminin bir altyapısı oluşturulabilir. Endüstri 4.0 hakkında verilen bilgilerin ve avantajların ışığında, Endüstri 4.0 sisteminin firmaya adaptasyonu firmaya katkı sağlayabilir. Bununla birlikte, bu avantajlarının yanı sıra, firmanın bu avantajları uygulamaya geçirmesi başlangıç yüksek maliyetlere neden olabilmektedir. Dolayısıyla, firmanın etkin bir fayda/maliyet analizini yapması gerekmektedir.

2.3. Optimizasyonda Kullanılan Çok Amaçlı Çözüm Yaklaşımları

Optimizasyon, tüm kısıtları (varsa) karşılayan ve bir veya daha fazla belirlenmiş amacı enküçükleyen (veya enbüyükleyen) bir veya daha fazla çözüm bulma görevidir. Tek amaçlı optimizasyon problemi, tek bir amaç fonksiyonu içermekte ve genellikle en iyi çözüm olarak adlandırılan tek bir çözümle sonuçlanmaktadır. Öte yandan, çok amaçlı bir optimizasyon aynı anda birden fazla çelişen amaçları göz önünde bulundurmaktadır. Böyle bir durumda, genellikle tek bir en iyi çözüm yoktur. Ancak, Pareto en iyi çözüm veya baskın olmayan çözüm olarak adlandırılan farklı ödünleşimlerle (trade-off) bir dizi alternatif vardır. Birden fazla Pareto en iyi çözümün varlığına rağmen, uygulamada genellikle bu çözümlerden sadece biri kullanılmaktadır. Böylece, çok amaçlı optimizasyon problemlerinin tek amaçlı optimizasyon problemlerine kıyasla, en az iki önemli görevi vardır. Biri Pareto en iyi çözümlerini bulmak için optimizasyon görevi, diğeri ise en fazla tercih edilen tek bir çözümü seçmek için karar verme görevidir. İkincisi tipik olarak bir karar vericiden gelen tercih bilgisini gerektirmektedir (Deb ve Miettinen, 2008).

Tüm $i = 1, \dots, k$ için $F_i(x) \leq F_i(x^*)$ ve en az bir j indisi için $F_j(x) < F_j(x^*)$ şartını sağlayacak başka bir $x \in S$ karar vektörü yoksa, $x^* \in S$ karar vektörü etkin ya da Pareto en iyi olarak adlandırılmaktadır. Buna ek olarak, has Pareto en iyi kümesi, Pareto en iyi kümesinin bir alt kümesidir. Pareto en iyi kümesi de zayıf Pareto en iyi kümesinin bir alt kümesidir. Tüm $i = 1, \dots, k$ için $F_i(x) < F_i(x^*)$ şartını sağlayacak başka bir $x \in S$ karar vektörü yoksa, $x^* \in S$ karar vektörü zayıf Pareto en iyi olarak

adlandırılmaktadır. $x^* \in S$ karar vektörü, Pareto en iyiyse ve $F_i(x) < F_i(x^*)$ sağlayan her bir F_i ve her bir $x \in S$ için $M > 0$ gerçek sayısı varsa ve $F_j(x^*) < F_j(x)$ ve $\frac{F_i(x^*) - F_i(x)}{F_j(x) - F_j(x^*)} \leq M$ şartını sağlayan en az bir F_j varsa has Pareto en iyi olarak adlandırılmaktadır. Diğer bir deyişle, bir amaçtaki sınırlı bir azalmanın ancak diğer amacın bir miktar makul artışıyla sağlanan en az bir çift amaç varsa, çözüm has Pareto etkindir (Miettinen, 1999).

Karar verme problemlerinin doğasında çok amaçlılık vardır. Çok amaçlı optimizasyon problemleri, genellikle skalerleştirme ile çözülmektedir. Skalerleştirme, tek amaçlı optimizasyon problemine dönüştürülme anlamına gelmektedir (Miettinen, 1999). Genel bir çok amaçlı optimizasyon problemi aşağıdaki Eşitlik 2.1 ile gösterilmektedir (Deb ve Miettinen, 2008; Ehrgott, 2005; Marler ve Arora, 2004; Miettinen, 1999).

$$\begin{aligned} \text{enk}_{x \in S} F(x) &= [F_1(x), F_2(x), \dots, F_k(x)]^T \\ g_j(x) &\leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \\ h_l(x) &= 0, \quad l = 1, 2, \dots, e. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte, $k (\geq 2)$ amaç fonksiyonu sayısını ifade ederken m eşitsizlik kısıt sayısını ve e eşitlik kısıt sayısını ifade etmektedir. $F_i(x)$, amaç fonksiyonunu temsil etmektedir. S , R^n 'nin bir alt kümesidir. Literatürde kullanılan bazı çok amaçlı skalerleştirme yöntemleri aşağıdaki gibidir:

- Ağırlıklı toplam yöntemi
- ε -kısıt yöntemi
- Konik skalerleştirme yöntemi
- Yakınsama (proximal) noktası skaler yöntemi (Gregório ve Oliveira, 2011; Rocha ve ark., 2016)
- Normal sınır kesişim yöntemi (Das ve Dennis, 1998; Motta ve ark., 2012)
- Normal kısıtlama yöntemi (Messac ve ark., 2003; Messac ve Mattson, 2004)
- Ardışık Pareto optimizasyonu (Mueller-Gritschneider ve ark., 2009)
- Yönlendirilmiş arama alanı (Mueller-Gritschneider ve ark., 2009)

- Enk-Enb yöntemi (Hwang ve ark., 1980)
- Benson skalerleştirme yöntemi (Benson, 1978)
- Pascoletti–Serafini skalerleştirme yöntemi (Pascoletti ve Serafini, 1984)
- Guddat skalerleştirme yöntemi (Guddat, 1985)
- Tchebycheff-norm skalerleştirme yöntemi (Miettinen, 1999)
- Hedef programlama (Miettinen, 1999)

Bu bölümde, bu çalışmada kullanılan ağırlıklı toplam yöntemi, ε -kısıt yöntemi ve konik skalerleştirme yöntemlerine ve çizelgeleme problemlerinde kullanılan skalerleştirme yöntemine dair literatür araştırmasına değinilecektir.

2.3.1. Ağırlıklı toplam yöntemi

Bu yöntem, en eski ve yaygın olarak kullanılan skalerleştirme yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde, her bir amaç fonksiyonu amaçların ağırlıklı toplamını enküçükleyen pozitif bir ağırlıklandırma katsayısı ile ilişkilendirilmektedir. Bu şekilde, çok amaçlı fonksiyonlar tek amaçlı fonksiyona dönüştürülmektedir (Miettinen, 1999).

$$\begin{aligned} \text{enk } \sum_{i=1}^k w_i F_i(x) \\ x \in S, \\ w_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, k. \end{aligned} \tag{2.2}$$

Eşitlik 2.2’de w_i , k (≥ 2) tane amaç fonksiyonu için dağıtılmış ağırlıkları ifade etmektedir ve bu değerler karar vericiler tarafından belirlenmektedir. w_i ’lerin her biri $\sum_{i=1}^k w_i = 1$ eşitliğini sağlayacak şekilde belirlenmektedir.

2.3.2. ε -kısıt yöntemi

Bu yöntemde, amaç fonksiyonlarından biri optimize edilmesi için seçilmektedir ve diğer tüm amaç fonksiyonları amaçların her birine bir üst sınır (ε) ayarlayarak kısıta dönüştürülmektedir (Miettinen, 1999). Bu yöntem, Haimes ve arkadaşları tarafından

(1971) yılında literatüre tanıtılmıştır ve baskın olmayan çözümlerin temsili bir alt kümesini sağlamaktadır (Tavana ve ark., 2017).

enk $F_l(x)$

$$\begin{aligned} F_j &\leq \varepsilon_j, \quad j = 1, 2, \dots, k, \quad j \neq l. \\ x &\in S, \end{aligned} \quad (2.3)$$

Eşitlik 2.3'te, $l \in \{1, 2, \dots, k\}$ olarak tanımlanmaktadır.

2.3.3. Konik skalerleştirme yöntemi

Bu yöntem, ilk olarak Gasimov (2001) tarafından önerilmiştir ve yöntemin ana fikri şu şekildedir: (1) amaç fonksiyonlarının ağırlıklarını ve bu amaçlar için bir referans noktası içeren öncelik parametrelerini seçmek, (2) skaler optimizasyon problemini çözmektir.

Öncelik parametreleri aşağıdaki gibidir:

- Ağırlık vektörü: Karar verici tarafından belirlenmektedir ve i . amaç fonksiyonunun öncelik derecesini belirtmektedir. $W = (W_1, W_2, \dots, W_k)$ ve $W_i \geq 0, \forall i$ olarak ifade edilmektedir.
- Referans noktası: Karar vericinin bir noktaya daha yakın en küçük unsurları hesaplamak istediği durumlarda bu tip bir nokta karar verici tarafından belirlenebilir. $B = (B_1, B_2, \dots, B_k)$ olarak ifade edilmektedir. Konik skalerleştirme yöntemi, referans noktalarının belirlenmesinde herhangi bir kısıtlama getirmez. Bu noktalar keyfi olarak seçilebilir.
- Artırma (augmentation) parametresi: Destek konisinin tepe açısını değiştirmek için kullanılan bir parametredir. Diğer bir ifade ile konikliği belirleyen bir parametredir ve $0 \leq \alpha \leq \text{enk}(W_1, W_2, \dots, W_k)$ olarak ifade edilmektedir.

(W, α) ve B parametreleri ile konik skalerleştirmenin genel formülasyonu aşağıdaki gibidir (Kasimbeyli, 2010, 2013).

$$\min_{x \in S} \sum_{i=1}^k W_i (F_i(x) - B_i) + \alpha \sum_{i=1}^k |F_i(x) - B_i| \quad (2.4)$$

Eşitlik 2.4'ten de görüleceği üzere, $\alpha = 0$ olursa skalerleştirme optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu ağırlıklı toplam yöntemi olarak bilinen bir amaç fonksiyonuna dönüşmektedir.

2.3.4. Literatür araştırması

Bu tez çalışmasında önerilen iki amaçlı programlama modeli gibi çoğu gerçek hayat problemleri de birden çok amaca ve kesikli değişkenlere sahiptir. Dolayısıyla bu tip problemlerin amaç uzayındaki uygunluk kümesi dışbükey değildir. Dışbükey (konveks) kavramı, çok amaçlı optimizasyon problemleri çalışma alanında büyük bir öneme sahiptir. Çok amaçlı bir optimizasyon probleminin dışbükey olması, dışbükey uygun çözüm kümesinin dışbükey bir küme olduğu ve tüm amaç fonksiyonlarının dışbükey bir fonksiyon olduğu anlamına gelmektedir. Kümenin herhangi iki noktasını birleştiren doğru parçası da kümeye aitse R^n 'deki bir S kümesi dışbükeydir. Diğer bir deyişle, $x_1, x_2 \in S$ ise her bir $\lambda \in [0,1]$ için $\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2$ de S kümesine ait olmalıdır. $\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2$ formunun ağırlıklı ortalamaları, x_1 ve x_2 'in dışbükey kombinasyonu olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca, $\sum_{j=1}^k \lambda_j = 1$, $\lambda_j \geq 0$ ve $j = 1, 2, \dots, k$ ile ifade edilen $\sum_{j=1}^k \lambda_j x_j$ formunun ağırlıklı ortalamaları da $x_1, x_2, \dots, x_k$ 'nin dışbükey kombinasyonu olarak adlandırılmaktadır (Bazaraa ve ark., 2006).

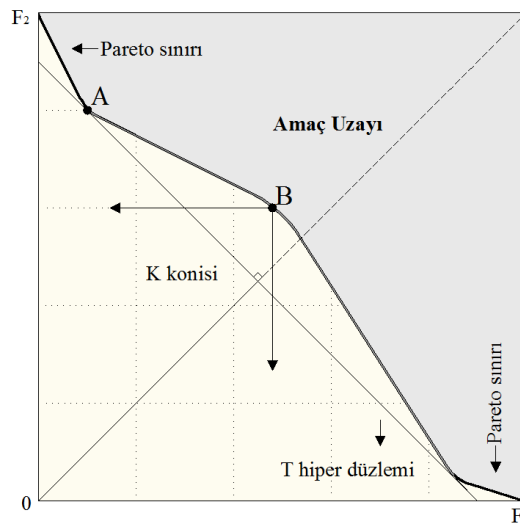
Dışbükey bir küme, her bir sınır noktasında hiper düzlemlerle desteklendiği için dışbükey çok amaçlı bir optimizasyon probleminin herhangi bir Pareto en iyi noktası ağırlıklı toplam yöntemi ile bulunmaktadır (Ehrgott, 2005). Ağırlıklı toplam yöntemi dışbükey olmayan optimizasyon problemlerinde Pareto en iyi noktalarının hepsini elde edemeyebileceği için konik skalerleştirme ve ε -kısıt yöntemleri, dışbükey olmayan iki amaçlı problem için daha uygundur (Kasimbeyli, 2013). Dışbükey olmayan çok amaçlı optimizasyon modellerinin Pareto en iyi noktalarını bulmada ε -kısıt yöntemi Pareto-etkin sınırı elde etmede yaygın bir şekilde kullanılsa da uygun bir epsilon (ε) değerinin belirlenmesi gerekliliği, interaktif bir metot olmama gibi bazı dezavantajlara

da sahiptir. Buna ek olarak, ε -kısıt yöntemi zayıf Pareto en iyi noktayla sonuçlanmaktadır. Bu da Pareto en iyi nokta elde etmek için (amaç fonksiyonu sayısı- (1)) tane ek ε -kısıt alt problemlerini çözmeyi gerektirmektedir. ε -kısıt yöntemi için literatürde has Pareto en iyi noktasını gösteren sonuç da bulunmamaktadır (Deliktas ve Ustun, 2015; Ehrgott, 2005).

Literatürde çizelgeleme problemleri için kullanılan skalerleştirme yöntemlerinden ziyade konik skalerleştirme yönteminin kullanılma nedenleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir. Buna göre, konik skalerleştirme yöntemi;

- Hem doğrusal hem de doğrusal olmayan modellerde kullanılabilme,
- Karar vericinin amaç ağırlıkları ve referans değerleri gibi tercihlerini matematiksel modele yansıtabilme,
- Dışbükey olmayan çok amaçlı modeller için hem hiper düzlemde desteklenen hem de desteklenmeyen etkin çözümlere ulaşabilme avantajlarına sahiptir.

Hiper düzlemde desteklenen Pareto en iyi noktaların yanı sıra desteklenmeyen noktalar da olabilir. Bu desteklenmeyen noktalar, dışbükey olmayan problemdeki diğer Pareto en iyi noktaların dışbükey kombinasyonlarının hâkim olduğu çözümleri içermektedir. Şekil 2.4., iki amaçlı doğrusal olmayan bir örnek problemin amaç uzayını göstermektedir.



Şekil 2.4. İki amaçlı doğrusal olmayan bir örnek problemin amaç uzayı

Şekil 2.4.'ten görüldüğü gibi, amaç uzayında uygun noktalar kümesi konik bir bölgede bulunuyorsa ağırlık toplam yöntemi gibi doğrusal dönüştürmeye dayanan bir skalerleştirme yöntemi ile hesaplanamaz. Örneğin, A noktası bir T hiper düzlemi ile desteklenebilirken B noktası için bu durum söz konusu bile değildir. Bu, B noktasının ağırlık toplam yöntemi gibi doğrusal dönüştürmeye dayanan bir skalerleştirme yöntemi ile hesaplanamayacağı anlamına gelmektedir. Ancak B noktası bir hiper düzlem yerine K konisi ile desteklenebilmektedir (Erozan ve ark., 2015b).

Tablo 2.3.'deki literatür araştırmasına göre, son on yıl boyunca yapılan çizelgeleme alanındaki çalışmalarda genellikle ağırlıklı toplam yönteminin (ATY) ve ε -kısıt yönteminin daha yaygın kullanıldığı görülmektedir. Konik skalerleştirme yönteminin (KSY) sayılan avantajlarından ötürü ele alınan tez çalışmasında iki amaçlı optimizasyon problemi KSY'ye uygulanmış ve elde edilen sonuçlar ATY ve ε -kısıt yöntemi ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 2.3. Çizelgeleme alanındaki ana skalerleştirme yöntemlerinin özeti

No	Referanslar	Problem	Amaç fonksiyonları	Problem tipi	Skalerleştirme yöntemleri
1	Önerilen çalışma	EATHÇP	1. C_{enb} (enk) 2. Toplam gecikme süresi (enk)	KTDOP yöntemi	1. KSY 2. ATY 3. ε -kısıt yöntemi
2	Thornblad ve ark. (2015)	EATP	1. Tamamlanma zamanı (enk) 2. İşlerin gecikmesi (enk)	KTDOP yöntemi	ATY
3	Cheng ve ark. (2015)	Akış tipi çizelgeleme	1. C_{enb} (enk) 2. Toplam tamamlanma süresi (enk)	KTDP yöntemi	ATY
4	Ahmadi ve ark. (2015)	Kısa –dönemli hidro termal çizelgeleme	1. Şirketin karı (enk) 2. Termal ünitelerden gelen emisyonlar (enb)	KTDP yöntemi	ATY
5	Abedi ve ark. (2015)	Özdeş paralel kitle-işlem makinelerini çizelgeleme	1. C_{enb} (enk) 2. İşlerin toplam ağırlıklı erken tamamlanması/gecikmesi (enk)	KTDP yöntemi	ε -kısıt yöntemi
6	Ibarra-Rojas ve ark. (2014)	Ders programı ve araç çizelgeleme	1. Hizmet niteliğinin düzeyi (enb) 2. Filo büyüklüğü (enk)	KTDP yöntemi	ε -kısıt yöntemi
7	Behnamian (2014)	Dağıtık çizelgeleme	1. Toplam işleme maliyeti (enk) 2. Üretim karları (enb)	KTDP yöntemi	ε -kısıt yöntemi

KTDOP: Karma Tamsayılı Doğrusal Olmayan Programlama, KTDP: Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama

Tablo 2.3. (Devamı)

No	Referanslar	Problem	Amaç fonksiyonları	Problem tipi	Skalerleştirme yöntemleri
8	Nezhad ve ark. (2014)	Hidro termal çizelgeleme	1. İşleme maliyetleri (enk) 2. Termal ünitelerden kaynaklanan emisyonlar (enk)	KTDOP yöntemi	ε -kısıt yöntemi
9	Gomes ve ark. (2013)	EATP	1. 2. Erken/geç kalma sırası (enk) 3. Ara stoklama süresi (enk)	KTDP yöntemi	ATY
10	Jiu ve ark. (2013)	Ekipman bakım çizelgelemesi	1. CWM atamaları ve tren tahsisleri (enk) 2. Aktarma süreleri ve tren bekleme süresi (enk)	KTDP yöntemi	ATY
11	Mozdgir ve ark. (2013)	İki aşamalı akış tipi çizelgeleme problemi	1. C_{enb} (enk) 2. Ortalama tamamlanma süresi (enk)	KTDP yöntemi	ATY
12	Ahmadizar ve Hosseini (2012)	İki-ölçütlü tek makine çizelgeleme problemi	1. C_{enb} (enk) 2. Toplam tamamlanma süresi (enk)	KTDOP yöntemi	ATY
13	Moosavian ve ark. (2010)	En uygun yıllık çizelgeleme	1. Toplam enerji üretme avantajları (enb) 2. Ortalama su tüketimi (enk)	KTDOP yöntemi	ATY
14	Moosavian ve ark. (2008)	En uygun yıllık çizelgeleme	1. Güç üretme avantajları (enb) 2. Su tüketimi (enk)	KTDOP yöntemi	ATY

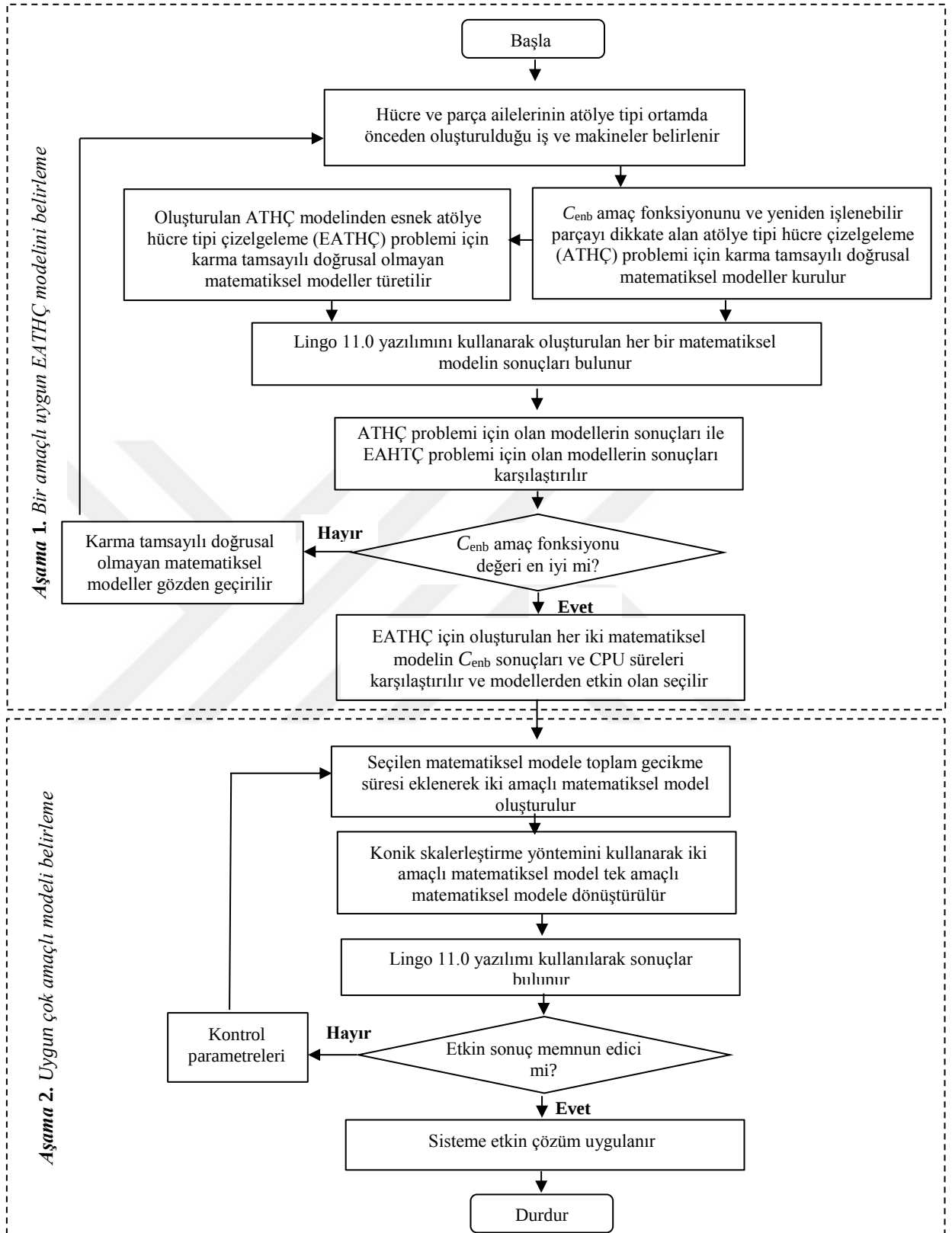
KTDOP: Karma Tamsayılı Doğrusal Olmayan Programlama, KTDP: Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama

BÖLÜM 3. PROBLEMİN TANIMI ve ÇOK AMAÇLI KARMA TAMSAYILI DOĞRUSAL OLMAYAN MATEMA- TİKSEL MODEL

Matematiksel model, problemin yapısının anlaşılabilirliği açısından büyük bir önem taşımaktadır. Bu bölümde, hücresel imalat sitemindeki esnek atölye tipi çizelgeleme problemi için geliştirilen matematiksel modele yer verilecektir. Geliştirilen matematiksel model için gerekli notasyonlar, parametreler, karar değişkenleri ve varsayımlar tanımlanacak ve matematiksel modelin amaçları açıklanacak ve söz konusu modelin kısıtları geliştirilecektir.

Üzerinde çalışılan problemin çok makineli olması, parça ailesi hazırlık süresi ve hücrelerarası taşıma süresi içermesi, çelişen amaçların modelde yer alması, bir parçanın bir iş merkezi ya da makineyi birden fazla ziyaret etmesi düşünüldüğünde gerçek hayat probleminin temel özelliklerine sahip olduğunu göstermektedir. Problemin çok karmaşık, büyük boyutlu, doğrusal olmayan ve çok amaçlı bir çizelgeleme problemi olması onu NP-zor sınıfına dâhil etmektedir.

Önerilen çok amaçlı karma tamsayılı doğrusal olmayan matematiksel modeller sayesinde Lingo, Gams, Cplex gibi yazılımlar çözüm için kullanılabilir hale gelmiştir. Diğer taraftan, Lingo 11.0 yazılımı kullanarak modellerin boyutunu makul bir sürede belirlemek için test problemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Literatürde, tüm bu karakteristikleri dikkate alarak çalışılan esnek atölye tipi hücre çizelgeleme problemine (EAHTÇP) rastlanılmadığı için gelecek çalışmalarda da kullanılabilecek 12 test probleminden oluşan bir veri seti üretildi. Test problemleri, parça sayısı, makine, hücre ve parça ailesi açısından farklı boyutlarda problemleri içermektedir. Matematiksel modeller, bu test problemlerini kullanarak analiz edilmiştir.



Şekil 3.1. Önerilen metodolojinin ana akış şeması

Her bir test problemindeki matematiksel modeller optimum amaç fonksiyonu değeri ve CPU süresi dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Şekil 3.1., önerilen karşılaştırma metodolojisi için bir akış şemasını kısaca göstermektedir. Bu metodolojinin aşamaları Şekil 3.1.'de detaylandırılmıştır. Bu metodoloji iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada esnek bir ortamda oluşturulan tek amaçlı (C_{enb}) matematiksel modellerden CPU süresi ve en iyi amaç fonksiyonu değerine göre en etkin model belirlenmiştir. Birinci aşamada elde edilen etkin modele ikinci aşamada toplam gecikme süresi eklenerek iki amaçlı modele dönüştürülmüştür. İki amaçlı matematiksel model, ağırlıklı toplam yöntemi, ϵ -kısıt yöntemi ve konik skalerleştirme yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Konik skalerleştirme yönteminin diğer skalerleştirme yöntemlerinden üstünlüğü vurgulanmıştır.

3.1. Problemin Tanımı

Problemin c hücre, l parça ailesi, i iş ve q makine ile hücresel imalat sisteminde esnek atölye tipi bir çevrede olduğu düşünölsün. Her i . işin j . operasyonu için nm_{ij} tane özdeş paralel makine vardır. Bir makinenin birden fazla özdeş makineye sahip olduğu varsayölsün. Her i işinin kendine ait rotası olan r_i tane operasyonu ve teslim tarihi vardır. Bir işin işlem rotası, diğer işlerin işlem rotalarından tamamen veya kısmen farklı olabilir. Bir işteki her bir operasyon, ilgili makinedeki önceki operasyon tamamladıktan sonra başlar. Bir iş, işin tüm operasyonları tamamen işlem gördükten sonra tamamlanır. İstisnai parçaların neden olduğu hücrelerarası hareketler, hücrelerarası taşıma sürelerine neden olur. Dahası, bu parçalar sıra bağımlı parça ailesi hazırlık sürelerini de gerektirir. Buna ek olarak, hücre içi hazırlık süreleri, operasyon sırasından bağımsız tutulmuş ve işlem sürelerine dâhil edilmiştir. C_{enb} ve toplam gecikme süresi amaçları, eş zamanlı olarak enküçüklenen problemin ana amaçlarıdır.

Bu çalışmada ele alınan matematiksel model aşağıdaki varsayımlar altında geliştirilmiştir:

- Hücrelerin yerleşim tasarımının, hücrelerin ve parça ailelerinin önceden tanımlı olduğu varsayılmaktadır.

- Makine bozulmaları ve bakım politikaları ihmal edilmektedir.
- Hammadde, mamul ve yarı mamul için sınırsız stok ve ara stoklar (buffer) mevcuttur.
- Her operasyon sadece uygun paralel makinelerden birine atanabilmektedir.
- Tüm işlerin operasyon sıralarının önceden tanımlı olduğu ve problemle ilgili operasyonların işlem süreleri, hücrelerarası taşıma süreleri ve parça aileleri hazırlık süreleri bilgilerinin bilindiği kabul edilmektedir.
- İşin salıverme süresi (release time) ve makine uygunluk süresi sıfırdır. Bu, tüm makine ve işlerin planlama döneminin başlangıcında hazır olduğu anlamına gelmektedir.
- Hücre içi taşıma süreleri ihmal edilmektedir.
- İşlerin bölünmediği varsayılmaktadır.
- Hücre içi hazırlık süreleri işlem sürelerine dâhil edilmektedir.
- Herhangi bir işin bir operasyonu bitmeden diğer operasyon başlamamaktadır.
- Bir makinede aynı anda birden fazla operasyon işlem göremez.
- Tüm işler eşit önceliğe sahiptir.

3.2. Matematiksel Modeller

Bu bölüm, hem atölye tipi hücre çizelgeleme problemi (ATHÇP) için hem de EATHÇP için ikişer tane matematiksel model sunmaktadır. ATHÇP için oluşturulan matematiksel modeller Halat ve Bashirzadeh (2015)'in modelinden uyarlanmış bir versiyondur. Modellerindeki karar değişkenlerin ve kısıtların bazıları değiştirilmiş ve revize edilmiştir. EATHÇP için oluşturulan matematiksel modeller ise Deliktas ve arkadaşları tarafından 2017 yılında literatüre tanıtılmıştır. Matematiksel modellerde kullanılan notasyonlar, parametreler ve karar değişkenleri aşağıdaki gibidir.

Notasyonlar

q	Makine indisi	$q=\{1,2,\dots,M\}$
i	İş indisi	$i=\{1,2,\dots,N\}$
c	Hücre indisi	$c=\{1,2,\dots,C\}$
l	Parça ailesi indisi	$l=\{1,2,\dots,L\}$

j	i işinin operasyonunun indisi	$j=\{1,2,\dots,r_i\}$
r_i	i işinin operasyonlarını içeren küme seti	
M	Makine sayısı	
N	İş sayısı	
L	Parça ailesi sayısı	
C	Hücre sayısı	
Parametreler		
P_{ijq}	q . makinedeki i . işin j . operasyonunun işlem süresi	
$T_{cc'}$	c . hücreden c' . hücreğine taşıma süresi	
$S_{ll'}$	l' . parça ailesi l . parça ailesinden hemen sonra işlem görüyorsa oluşan hazırlık süresi	
X_{qc}	1, q . makine c . hücrede bulunursa ve 0 dd.	
Y_{il}	1, i . iş l . parça ailesine aitse ve 0 dd.	
R_{ijq}	1, q . makinede i . işin j . operasyonu işlem görüyorsa ve 0 dd.	
D_i	i . işin teslim süresi	
K	Çok büyük pozitif bir sayı	
Karar değişkenleri		
c_{ijq}	q . makinede i . işin j . operasyonunun tamamlanma zamanı	
u_{ijq}	1, i . işin j . operasyonu özdeş paralel makinelerden q . makinede işlem görüyorsa ve 0 dd.	
$z_{iji'j'q}$	1, q . makinede i . işin j . operasyonu i' . işin j' . operasyonundan önce geliyorsa ve 0 dd.	
C_{enb}	En son işin en son makinedeki tamamlanma zamanı	
t_i	i . işin gecikmesi	

3.2.1. Halat ve Bashirzadeh'in modellerinin uyarlamaları

Halat ve Bashirzadeh (2015), istisnai parçaları, hücrelerarası hareketleri, hücrelerarası taşıma sürelerini ve sıra bağımlı parça ailesi hazırlık sürelerini dikkate alan atölye tipi hücre çizelgeleme için iki tane karma tamsayı doğrusal model önermişlerdir. Halat ve Bashirzadeh'in modellerinden esnek atölye tipi hücre çizelgelemesine yeni

modeller türetilebilmesi için karma tamsayılı doğrusal modele bazı modifikasyonlar uygulanmıştır. Bu modifikasyonlardan biri, j . işi temsil eden tekli j indisinin, i . işin j . operasyonu anlamına gelen $i j$ çift indisile yer değiştirilmesidir. Diğer modifikasyon ise Eşitlik 3.2'ye $R_{i(j-1)q'}$ parametresi eklenmesi ve w_{ji} ve $w_{j'1}$ karar değişkenlerinin (Halat ve Bashirzadeh'in modelinde karar değişkeni olarak kullanıldı) R_{ijq} ve $R_{i'j'q}$ parametreleri ile değiştirilmesidir. Bu tip bir modifikasyon işlemlerinin yapılma nedeni, her bir operasyonu bağımsız değerlendirerek bir parçanın bir iş merkezi ya da makinede birden fazla işlenmesine izin verilmesidir (recirculation). Bu modeller aşağıdaki gibidir:

Model 1:

$$\text{Enk } C_{\text{enb}} \quad (3.1)$$

$$\sum_{q=1}^M R_{ijq} \cdot c_{ijq} \geq \sum_{q=1}^M \sum_{q'=1}^M R_{ijq} \cdot R_{i(j-1)q'} \cdot (c_{i(j-1)q'} + P_{ijq} + \sum_{c=1}^C \sum_{c'=1}^C X_{qc} \cdot X_{q'c'} \cdot T_{c'c}) \quad (3.2)$$

$$i = 1, 2, \dots, N \quad j = 2, \dots, r_i$$

$$c_{ijq} \geq c_{i'j'q} + \sum_{l=1}^L \sum_{l'=1}^L Y_{i'l'} \cdot Y_{il} \cdot S_{l'l} - K \cdot z_{iji'j'q} + P_{ijq} - K(2 - R_{ijq} - R_{i'j'q}) \quad (3.3)$$

$$i = 2, \dots, N \quad i' = 1, 2, \dots, N \quad i \neq i' \quad q = 1, 2, \dots, M \quad j = j' = 1, 2, \dots, r_i$$

$$c_{i'j'q} \geq c_{ijq} + \sum_{l=1}^L \sum_{l'=1}^L Y_{il} \cdot Y_{i'l'} \cdot S_{ll'} - K \cdot (1 - z_{iji'j'q}) + P_{i'j'q} - K(2 - R_{ijq} - R_{i'j'q}) \quad (3.4)$$

$$i = 2, \dots, N \quad i' = 1, 2, \dots, N \quad i \neq i' \quad q = 1, 2, \dots, M \quad j = j' = 1, 2, \dots, r_i$$

$$c_{ijq} \geq P_{ijq} \quad q = 1, 2, \dots, M \quad i = 1, 2, \dots, N \quad j = 1, 2, \dots, r_i \quad (3.5)$$

$$C_{\text{enb}} \geq c_{ijq} \quad q = 1, 2, \dots, M \quad i = 1, 2, \dots, N \quad j = 1, 2, \dots, r_i \quad (3.6)$$

$$c_{ijq}, c_{i'j'q} \geq 0 \quad z_{iji'j'q} \in \{0,1\} \quad q = 1, 2, \dots, M \quad i = i' = 1, 2, \dots, N \quad j = j' = 1, 2, \dots, r_i \quad (3.7)$$

Eşitlik 3.1, modelin amacını göstermektedir ve en son işin en son makinedeki tamamlanma zamanının enküçüklenmesidir. Her bir parçanın, operasyonlarının ve hücrelerarası taşıma sürelerinin tanımlanmış öncelik ilişkilerine dayanarak işlem görmesi Eşitlik 3.2 ile sağlanmaktadır. Eşitlik 3.3 ve 3.4, bir parçanın parça hazırlık sürelerini göz önüne alarak makinelerde işlem görmesini garantilemektedir. Eşitlik 3.5, bir operasyonun tamamlanma süresinin o operasyonun işlem süresinden daha büyük olmasını sağlamaktadır. Eşitlik 3.6, en büyük tamamlanma süresinin her bir işin tamamlanma süresinden daha büyük olmasını sağlamaktadır. Eşitlik 3.7, pozitif ve 0-1 tamsayılı değişkenleri tanımlamaktadır.

Eşitlik 3.3'e ilave bir değişken olarak $b_{iji'j'q}$ yeni değişkeni eklenirse, bu kısıt aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir.

Model 2:

$$K \cdot z_{iji'j'q} + (c_{ijq} - c_{i'j'q}) - \sum_{l=1}^L \sum_{l'=1}^L Y_{i'l'} \cdot Y_{il} \cdot S_{l'l} - P_{ijq} + K(2 - R_{ijq} - R_{i'j'q}) = b_{iji'j'q} \\ i = 2, \dots, N \quad i' = 1, 2, \dots, N \quad i \neq i' \quad q = 1, 2, \dots, M \quad j = j' = 1, 2, \dots, r_i \quad (3.8)$$

Buna göre, Eşitlik 3.4 aşağıdaki gibi yeniden yazılır:

$$b_{iji'j'q} \leq 5 \cdot K - P_{ijq} - P_{i'j'q} - \sum_{l=1}^L \sum_{l'=1}^L Y_{i'l'} \cdot Y_{il} \cdot S_{l'l} - \sum_{l=1}^L \sum_{l'=1}^L Y_{il} \cdot Y_{i'l'} \cdot S_{ll'} - 2 \cdot K(R_{ijq} + R_{i'j'q}) \\ i = 2, \dots, N \quad i' = 1, 2, \dots, N \quad i \neq i' \quad q = 1, 2, \dots, M \quad j = j' = 1, 2, \dots, r_i \quad (3.9)$$

Eşitlik 3.3 ve 3.4, Eşitlik 3.8 ve 3.9'la yer değiştirildikten sonra Model 2 elde edilmiştir.

3.2.2. Yeni bir model formülasyonu: EATHÇP için doğrusal olmayan matematiksel modeller

EATHÇP, klasik ATHÇP'nin genişletilmiş halidir. ATHÇ modelini EATHÇ modeline dönüştürmek için Model 1'in özdeş paralel makinelerden birini seçmeye izin vermesi gerekmektedir. Dolayısıyla, Eşitlik 3.10 ve 3.11 modele eklenmiş ve böylece esnek bir ortamda hücre çizelgelemesi sağlanmıştır. Buna ek olarak, hem Model 1'deki hem de Model 2'deki R_{ijq} parametreleri, hem Model 3'te hem de Model 4'te u_{ijq} karar değişkenleri olarak değiştirilmiştir. Sonuçta, doğrusal matematiksel model, doğrusal olmayan matematiksel modele dönüştürülmüştür. Bu modeller aşağıdaki gibidir:

Model 3:

$$\text{Enk } C_{enb} \quad (3.10)$$

$$\sum_{q=1}^M u_{ijq} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad j = 1, 2, \dots, r_i \quad (3.11)$$

$$u_{ijq} \leq R_{ijq} \quad q = 1, 2, \dots, M \quad i = 1, 2, \dots, N \quad j = 1, 2, \dots, r_i \quad (3.12)$$

$$\sum_{q=1}^M u_{ijq} \cdot c_{ijq} \geq \sum_{q=1}^M \sum_{q'=1}^M u_{ijq} \cdot u_{i(j-1)q'} \cdot (c_{i(j-1)q'} + P_{ijq} + \sum_{c=1}^C \sum_{c'=1}^C X_{qc} \cdot X_{q'c'} \cdot T_{c'c}) \\ i = 1, 2, \dots, N \quad j = 2, \dots, r_i \quad (3.13)$$

$$c_{ijq} \geq c_{i'j'q} + \sum_{l=1}^L \sum_{l'=1}^L Y_{i'l'} \cdot Y_{il} \cdot S_{l'l} - K \cdot z_{iji'j'q} + P_{ijq} - K(2 - u_{ijq} - u_{i'j'q})$$

$$i = 2, \dots, N \quad i' = 1, 2, \dots, N \quad i \neq i' \quad q = 1, 2, \dots, M \quad j = j' = 1, 2, \dots, r_i \quad (3.14)$$

$$c_{i'j'q} \geq c_{ijq} + \sum_{l=1}^L \sum_{l'=1}^L Y_{il} \cdot Y_{i'l'} \cdot S_{ll'} - K \cdot (1 - z_{iji'j'q}) + P_{i'j'q} - K(2 - u_{ijq} - u_{i'j'q})$$

$$i = 2, \dots, N \quad i' = 1, 2, \dots, N \quad i \neq i' \quad q = 1, 2, \dots, M \quad j = j' = 1, 2, \dots, r_i \quad (3.15)$$

$$c_{ijq} \geq P_{ijq} \quad q = 1, 2, \dots, M \quad i = 1, 2, \dots, N \quad j = 1, 2, \dots, r_i \quad (3.16)$$

$$C_{enb} \geq c_{ijq} \quad q = 1, 2, \dots, M \quad i = 1, 2, \dots, N \quad j = 1, 2, \dots, r_i \quad (3.17)$$

$$c_{ijq}, c_{i'j'q} \geq 0 \quad z_{iji'j'q}, u_{ijq} \in \{0,1\} \quad q = 1, 2, \dots, M \quad i = i' = 1, 2, \dots, N \quad j = j' = 1, 2, \dots, r_i \quad (3.18)$$

Eşitlik 3.10, modelin amacını göstermektedir ve en son işin en son makinedeki tamamlanma zamanının enküçüklenmesidir. Eşitlik 3.11, i . işin j . operasyonunun tam olarak alternatif makinelerden birini seçmesine imkân sağlamaktadır. Eşitlik 3.12, her bir operasyon için uygun olan makineleri belirlemektedir. R_{ijq} parametresinin ne anlam ifade ettiğini kısaca açıklanması modelin anlaşılabilirliğini artıracaktır. Buna göre, i . işin j . operasyonu q . makinede işlem göreceksa kullanıcı bu parametreye “1” değeri atar, aksi takdirde “0” değeri atar. Örneğin, i . işin j . operasyonu 4. makinede işlem göreceksa Eşitlik 3.12’de R_{ij4} parametresine kullanıcı “1” değeri atayacaktır. Her bir parçanın, operasyonlarının ve hücrelerarası taşıma sürelerinin tanımlanmış öncelik ilişkilerine dayanarak işlem görmesi Eşitlik 3.13 ile sağlanmaktadır. Eşitlik 3.14 ve 3.15, bir parçanın parça hazırlık sürelerini göz önüne alarak makinelerde işlem görmesini garantilemektedir. Eşitlik 3.16, bir operasyonun tamamlanma süresinin o operasyonun işlem süresinden daha büyük olmasını sağlamaktadır. Eşitlik 3.17, en büyük tamamlanma süresinin her bir işin tamamlanma süresinden daha büyük olmasını sağlamaktadır. Eşitlik 3.18, pozitif ve 0-1 tamsayıli değişkenleri tanımlamaktadır. Oluşturulan Model 3’ün Lingo 11.0 yazılım kodları Ek 1’de verilmiştir. Kodlar kapalı formda yazılmıştır.

Model 4:

$$K \cdot z_{iji'j'q} + (c_{ijq} - c_{i'j'q}) - \sum_{l=1}^L \sum_{l'=1}^L Y_{i'l'} \cdot Y_{il} \cdot S_{l'l} - P_{ijq} + K(2 - u_{ijq} - u_{i'j'q}) = b_{iji'j'q}$$

$$i = 2, \dots, N \quad i' = 1, 2, \dots, N \quad i \neq i' \quad q = 1, 2, \dots, M \quad j = j' = 1, 2, \dots, r_i \quad (3.19)$$

$$b_{iji'j'q} \leq 5 \cdot K - P_{ijq} - P_{i'j'q} - \sum_{l=1}^L \sum_{l'=1}^L Y_{i'l'} \cdot Y_{il} \cdot S_{l'l} - \sum_{l=1}^L \sum_{l'=1}^L Y_{il} \cdot Y_{i'l'} \cdot S_{ll'} - 2 \cdot K(u_{ijq} + u_{i'j'q})$$

$$i = 2, \dots, N \quad i' = 1, 2, \dots, N \quad i \neq i' \quad q = 1, 2, \dots, M \quad j = j' = 1, 2, \dots, r_i \quad (3.20)$$

Model 2’de de daha önce ifade edildiği gibi Eşitlik 3.14 ve 3.15, Eşitlik 3.19 ve 3.20 ile yer değiştirilmiş ve daha sonra Model 4 elde edilmiştir.

3.3. Örnek Problem Çözümü ve Problem Boyutunun Araştırılması

Literatürde, hücrelerarası taşıma süresi, sıra bağımlı parça ailesi hazırlık süresi ve yeniden işlenebilir parçaları dikkate alarak çalışılan EAHTÇP’ye rastlanılmadığı için gelecek çalışmalarda da kullanılabilecek 12 test probleminden oluşan bir veri seti üretildi. Tablo 3.1. hücrelerarası taşıma sürelerini, parça aileleri arası hazırlık sürelerini, teslim sürelerini, işlem sürelerini, rotalarını içeren test problemleri küme setini göstermektedir. Veri setindeki süreler, dakika cinsinden ele alınmıştır.

Tablo 3.1. Test problemleri için oluşturulan veri seti

<i>İşlem süreleri: Her bir makinede işlem gören iş için</i>											
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
M1	4	3	---	---	6	1	6	3	4	---	---
M2	5	4	7	---	2	---	---	9	5	7	---
M3	6	---	2	6	---	5	---	---	---	9	5
M4	---	---	4	2	3	7	5	---	---	3	---
M5	---	---	---	---	---	---	5	4	---	---	---
M6	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	3
M7	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
M8	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
M9	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
M10	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
M11	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
M12	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
R:	1-2-3-2	2-1-2	4-2-3	3-4-3	4-2-1-4	1-4-3-1	4-1-5	1-2-5	2-1-2	3-2-4	6-3-6
TS:	98	77	3	75	48	33	5	11	50	8	53
	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	
M1	---	4	5	---	---	---	---	---	---	---	
M2	---	3	1	---	2	---	---	---	---	---	
M3	---	2	4	---	---	---	---	---	---	---	
M4	4	3	1	1	---	1	---	---	---	---	
M5	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
M6	5	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
M7	---	---	---	4	5	1	---	6	---	---	
M8	---	---	---	2	3	2	---	---	---	---	
M9	---	---	---	---	---	---	4	3	---	4	
M10	---	---	---	---	---	---	6	2	8	---	
M11	---	---	---	---	---	---	---	---	7	5	
M12	---	---	---	---	---	---	---	---	5	3	
R:	4-6-4	2-3-4-1	4-3-1-2	8-7-4	7-2-8-2	4-7-8	10-9	9-7-10	11-10-12	12-9-11	
TS:	21	82	23	103	4	68	67	15	28	43	
<i>Taşıma süreleri: c. hücreden c'. hücresine; c satır ve c'sütun</i>											
c c'	H1	H2	H3	H4							
H1	---	3	5	4							
H2	4	---	8	5							
H3	6	5	---	3							
H4	5	4	3	---							
<i>Hazırlık süreleri: I. parça ailesinden I'. parça ailesine; I satır ve I'sütun</i>											
I I'	PA1	PA2	PA3	PA4	PA5						
PA1	---	3	7	4	5						
PA2	4	---	4	2	8						
PA3	6	5	---	5	4						
PA4	7	5	2	---	3						
PA5	6	5	6	6	---						

P: Parça, PA: Parça ailesi, M: Makine, H: Hücre, TS: Teslim süreleri, R: Rotalar

Tablo 3.2. her bir hücreye atanan parça ailelerini ve makine gruplarını göstermektedir. Tablo 3.2.'de parantez içine yazılan değerler, belirtilen makine için kaç tane özdeş paralel makine olduğunu göstermektedir. Örneğin, test problemi 1'deki makine 2 ve 3'te belirtilen parantez içindeki değerler, esnek bir ortamda her iki makinenin de ikişer tane özdeş paralel makineye sahip olduğunu göstermektedir. Başka bir deyişle, parça ailesi 1'deki parça 1 makine 2 ve 3'ten ötürü alternatif rotalara sahiptir. Yani, dört alternatif rotadan biri test problemi 1'in çözümü için kullanılabilir.

Bununla birlikte, atölye tipi çevrede test problemi 1 için sadece bir rota vardır. Teslim süreleri, [1,110] aralığında düzgün kesikli dağılımla üretilirken her bir işin işlem süreleri, [1,9] aralığında normal dağılımla üretilmiştir. Matrisler, sırasıyla [3, 8] ve [2,8] aralığında normal dağılımla üretilen taşıma sürelerini ve parça ailesi hazırlık sürelerini içermektedir ve matrisler asimetriklerdir. Her bir işin işlem rotası makinelerin rastgele seçimiyle oluşturulmuş ve makineler, rastgele sıralanmıştır.

Tablo 3.2. Her bir hücreye atanan makine grupları ve parça aileleri

Prob.	P/PA/M/H	Hücrelerdeki makineler			
		Hücre 1	Hücre 2	Hücre 3	Hücre 4
1	4/2/6/2	M1, M2(2) ^a	M3(2), M4	---	---
2	6/2/6/2	M1, M2(2)	M3(2), M4	---	---
3	6/2/8/2	M1, M2(2), M5	M3, M4(2), M6	---	---
4	7/3/7/2	M1(2), M2(2)	M3, M4(2)	---	---
5	7/2/9/3	M1(2), M2(2)	M3, M4	M7(2), M8	---
6	7/3/8/3	M1, M2(2)	M3(2), M4	M7, M8	---
7	9/3/9/3	M1, M2(2), M5	M3, M4(2)	M7, M8	---
8	8/4/11/4	M1, M2(2)	M3, M4(2)	M7(2), M8	M9, M10
9	10/4/11/4	M1, M2(2)	M3, M4(2)	M7(2), M8	M9, M10
10	10/4/13/4	M1, M2(2), M5	M3, M4(2), M6	M7(2), M8	M9, M10
11	14/4/13/4	M1, M2(2), M5	M3, M4(2), M6	M7(2), M8	M9, M10
12	15/4/16/4	M1, M2(2), M5	M3, M4(2), M6	M7(2), M8	M9(2), M10, M11, M12

Prob.	P/PA/M/H	Parça ailelerindeki parçalar				
		Parça ailesi 1	Parça ailesi 2	Parça ailesi 3	Parça ailesi 4	Parça ailesi 5
1	4/2/6/2	P1, P2	P3, P4	---	---	---
2	6/2/6/2	P1, P2, P5	P3, P4, P6	---	---	---
3	6/2/8/2	P7, P8, P9	P10, P11, P12	---	---	---
4	7/3/7/2	P1, P2, P5	P3, P4	---	---	P13, P14
5	7/2/9/3	P1, P2, P5, P9	P15, P16, P17	---	---	---
6	7/3/8/3	P1, P2, P5	P3, P4	P15, P16	---	---
7	9/3/9/3	P1, P7, P8	P3, P4, P6	P15, P16, P17	---	---
8	8/4/11/4	P1, P2	P3, P4	P15, P16	P18, P19	---
9	10/4/11/4	P1, P2, P5	P3, P4, P6	P15, P16	P18, P19	---
10	10/4/13/4	P1, P7, P8	P10, P11, P12	P15, P16	P18, P19	---
11	14/4/13/4	P1, P5, P7, P9	P3, P6, P10, P11, P12	P15, P16, P17	P18, P19	---
12	15/4/16/4	P1, P2, P5, P7	P3, P6, P11, P12	P15, P16, P17	P18, P19, P20, P21	---

^a Parantez içindeki değer, problem esnek ortamdaysa Makine 2 için iki özdeş paralel makine olduğunu göstermektedir. Atölye tipi ortamda özdeş paralel makine mevcut değildir.

P: Parça, PA: Parça ailesi, M: Makine, H: Hücre

Önerilen modeller, Lingo 11.0 yazılımı ile test problemleri kullanılarak test edilmiştir. Intel® Core™ i7-2760QM CPU @ 2.40 GHz ve 8.00 GB Ram özelliklerinde bir dizüstü bilgisayar kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, Tablo 3.3.'te gösterilmektedir.

Tablo 3.3. Matematiksel modeller göz önüne alınarak CPU sürelerinin ve C_{enb} değerlerinin karşılaştırılması

Prob.	P/PA/M/H	ATHÇP için oluşturulan matematiksel modeller							
		Model 1				Model 2			
		C_{enb}	CPU süresi* (sn)	Değişken sayısı	Kısıt sayısı	C_{enb}	CPU süresi* (sn)	Değişken sayısı	Kısıt sayısı
1	4/2/6/2	32	0.0	782	1242	32	0.0	1806	1242
2	6/2/6/2	34	0.8	1942	3336	34	1.0	1942	3336
3	6/2/8/2	33	0.0	2899	4981	33	0.0	2899	4981
4	7/3/7/2	46	2.4	2714	4767	46	9.4	5850	4767
5	7/2/9/3	54	2.6	4057	7126	54	12.2	8761	7126
6	7/3/8/3	51	2.0	4057	7126	51	3.2	8761	7126
7	9/3/9/3	53	3.8	8095	14646	53	4.0	17167	14646
8	8/4/11/4	49	1.6	7194	12850	49	2.8	15386	12850
9	10/4/11/4	51	3.0	11554	21120	51	8.6	24354	21120
10	10/4/13/4	53	3.4	14432	26382	53	4.8	30432	26382
11	14/4/13/4	60	119.4	29167	54729	60	905.2	60527	54729
12	15/4/16/4	51	16.0	40369	76078	51	45.0	83569	76078
Prob.	P/PA/M/H	EATHÇP için oluşturulan matematiksel modeller							
		Model 3				Model 4			
		C_{enb}	CPU süresi* (sn)	Değişken sayısı	Kısıt sayısı	C_{enb}	CPU süresi* (sn)	Değişken sayısı	Kısıt sayısı
1	4/2/6/2	27	0.2	1267	1965	27	1.8	2804	1965
2	6/2/6/2	28	6.4	3047	5150	28	4.4	6503	5150
3	6/2/8/2	26	0.8	4049	6838	26	2.0	8657	6838
4	7/3/7/2	37	77.8	4939	8542	37	102.0	10427	8542
5	7/2/9/3	29	24.4	6333	10951	29	25.8	13389	10951
6	7/3/8/3	29	2.2	5625	9735	29	22.0	11897	9735
7	9/3/9/3	34	5.6	10717	19163	34	25.0	22381	19163
8	8/4/11/4	29	3.6	10235	18029	29	4.6	21499	18029
9	10/4/11/4	34	5.0	16315	29491	34	26.2	33915	29491
10	10/4/13/4	31	27.6	19269	34827	31	312.0	40069	34827
11	14/4/13/4	35	53.4	38631	71895	35	82.0	79399	71895
12	15/4/16/4	31	35.4	54769	102415	31	200.0	112369	102415

* Intel® Core™ i7-2760QM CPU @ 2.40 GHz ve 8.00 GB Ram özelliklerinde bir bilgisayar kullanılmıştır. Tüm süreler, beş kez çalıştırmanın ortalamasıdır ve CPU süresi saniye cinsindendir. P: Parça, PA: Parça ailesi, M: Makine, H: Hücre

Tablo 3.3.'te görüldüğü gibi Bölüm 3.2.'de verilen dört matematiksel model, küçük ve orta boyutlu problemleri çözmek için en iyi sonuçları bulma özelliklerine sahiptir. Lingo yazılımı, 30 saati aşan çözüm süresi nedeniyle dört hücre, dört parça ailesi, on beş parça ve on iki makine boyutlu test probleminde durdurulmuştur. Bu nedenle, Tablo 3.3. saniye cinsinden makul bir süre içinde elde edilen çözümleri sunmaktadır. Buna ek olarak, C_{enb} değerlerinin esnek atölye tipi hücre çizelgeleme modellerinde (Model 3 ve 4) atölye tipi hücre çizelgeleme modellerine (Model 1 ve 2) göre azaldığı Tablo 3.3.'ten görülmektedir. Test sonuçları göz önüne alınırsa, Halat ve Bashirzadeh, çalışmalarında Model 2'nin Model 1'den daha iyi performans gösterdiğini ileri sürmelerine rağmen bu çalışmada Halat ve Bashirzadeh'in modeline bazı

modifikasyon eklenerek modelin yeniden işlenebilir parçaları da dikkate alması sağlandığı için Model 1'in hem hesaplama süresi olarak hem de değişken sayısı olarak performansının Model 2'den daha iyi olduğu Tablo 3.3.'te gösterilmektedir.

Model 4'ün kısıt ve değişken sayısının Model 3'tekilere göre daha büyük olması bu modellerin hesaplama süresi arasında önemli bir fark ortaya çıkarmıştır. Sonuçta, Model 3'ün performansının Model 4'ten ve benzer şekilde Model 1'in performansının Model 2'den daha iyi olduğu Tablo 3.3.'ten görülmektedir. Modelin çalışma biçimini göstermek adına, test problemi 7 ele alınmıştır.

Sayısal Örnek 1: Problem, Tablo 3.1. ve 3.2.'deki veri seti göz önüne alınarak oluşturulmuş ve 9 parça, 7 makine, 3 parça ailesi ve 3 hücreden oluşan test problem 7 ele alınmıştır. İşlem sıraları, makine seçenekleri, parça işlemleri, işlem süreleri ve parçaların rota bilgisi Tablo 3.4.'te gösterilmiştir. Süreler, dakika cinsinden ele alınmıştır.

Tablo 3.4. Sayısal örnek 1 için örnek parça-makine matrisi, işlem süreleri ve rotalama

		Hücre 1			Hücre 2		Hücre 3		Rotalama
		M1	M2(2) ^a	M5	M3	M4(2) ^a	M6	M7	
Parça ailesi 1	P1	4	5		6				1-2-3-2
	P7	6		5		5			4-1-5
	P8	3	9	4					1-2-5
Parça ailesi 2	P6	1			5	7			1-4-3-1
	P3		7		2	4			4-2-3
	P4				6	2			3-4-3
Parça ailesi 3	P15					1	4	2	8-7-4
	P16		2				5	3	7-2-8-2
	P17					1	1	2	4-7-8

^a Makine 2 ve 4, ikişer tane özdeş paralel makineye sahiptir.

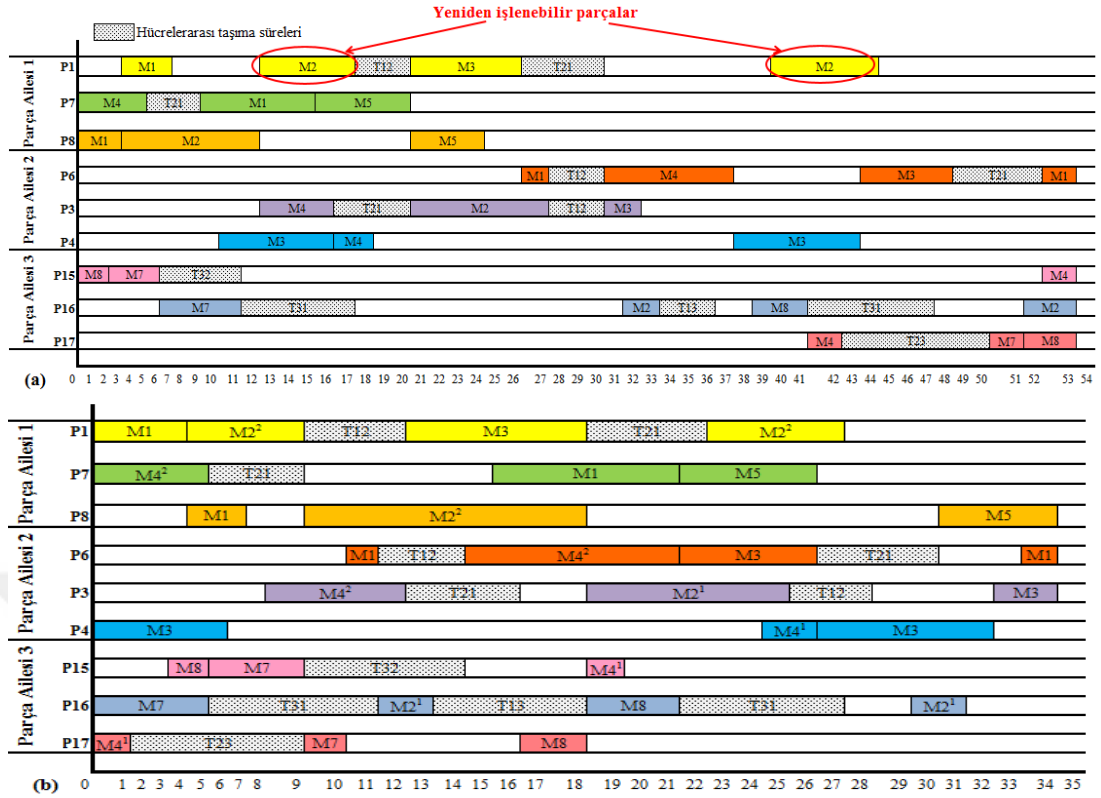
P: Parça, M: Makine

Bu örnekte, Tablo 3.4.'te parantez içindeki değerler seçilen makinenin kaç tane özdeş paralel makineye sahip olduğunu göstermektedir. Örneğin, makine 2 ve 4, ikişer tane özdeş paralel makine varken kalan makinelerden birer tane olduğunu göstermektedir. Bu da esnek bir ortamda makine 2 ve 4'ü kullanan tüm işlerin alternatif rotalara sahip olduğunu göstermektedir. Bu durumda, iki tane durum söz konusudur:

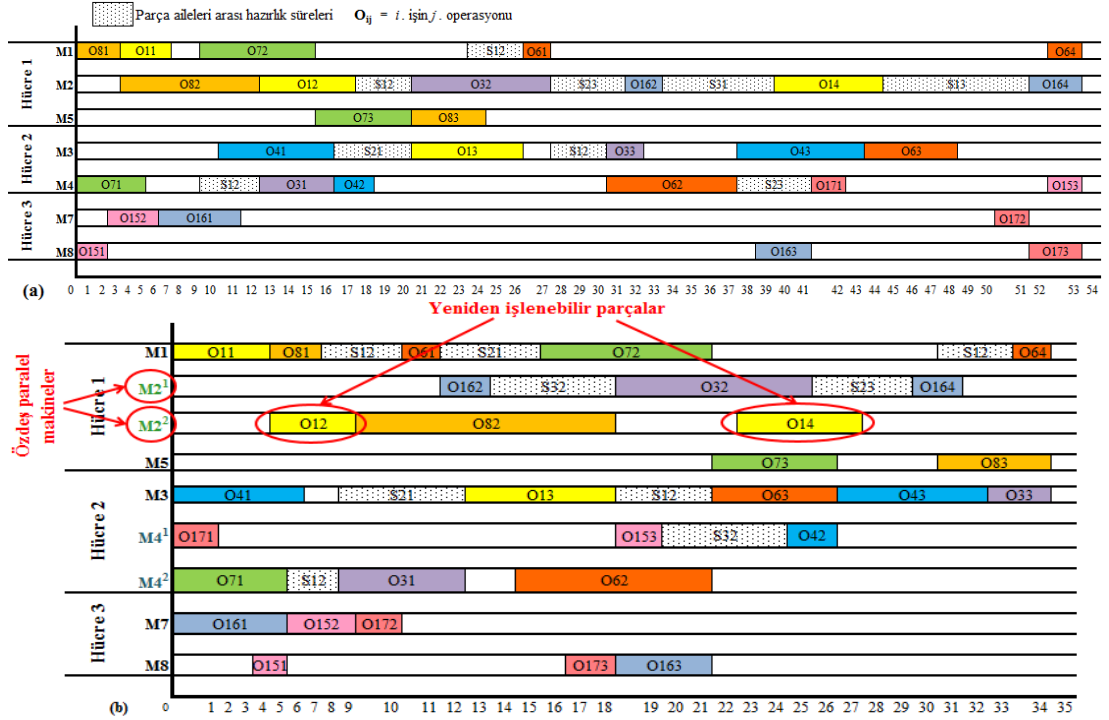
1. Alternatif rotalar varsa C_{enb} değeri nedir?
2. Alternatif rotalar yoksa C_{enb} değeri nedir?

Alternatif rotaların olması esnek ortamda bir hücre tipi çizelgeleme probleminin var olduğunu gösterirken (yani, EATHÇP) alternatif rotaların olmaması da atölye tipi çizelgeleme problemi olduğunu göstermektedir. EATHÇP için Tablo 3.4.'teki veri seti kullanılacaktır. Bununla birlikte, Tablo 3.4.'te makine 2 ve 4'ten de birer tane olduğu varsayılarak atölye tipi hücre çizelgeleme problemine dönüştürülecektir ve böylece, C_{enb} değerlerindeki değişimleri göstermek mümkün olabilecektir. Bu nedenle, esnek atölye tipi çizelgeleme problemi için performansı en uygun seçilen Model 3 ve atölye tipi hücre çizelgeleme problemi için de performansı en uygun seçilen Model 1 ele alınmıştır. Model 1 ve 3 ayrı ayrı Lingo 11.0 yazılımı kullanılarak çözülmüş ve her iki model için de oluşan Gantt diyagramı Şekil 3.2. ve 3.3.'te gösterilmiştir. Bu problemin sonucunda her bir model için hem hücrelerarası taşımaları gösteren hem de parça aileleri hazırlık sürelerini gösteren ikişer tane Gantt şeması ortaya çıkmıştır.

Şekil 3.2.'de, Gantt şeması taşıma sürelerini ve hücrelerarası taşımaları ile parçaları göz önüne alarak oluşturulmuştur. Şekil 3.2. (a), esnek atölye tipi hücre çizelgeleme problemini ele alırken Şekil 3.2. (b) atölye tipi hücre çizelgeleme problemini incelemektedir. Şekil 3.2. ve 3.3.'te, M2 ve M4 sırasıyla makine 2 ve makine 4'ü belirtmektedir. Bu makineler, esnek bir ortamda üretim sağlamak için çoğaltılmaktadır. Örneğin, Şekil 3.3. (b)'de $M2^1$ ve $M2^2$, makine 2 için özdeş paralel makineleri ifade etmektedir. $M2^1$, makine 2'nin birinci makinesi olduğunu belirtirken $M2^2$, makine 2'nin ikinci makinesi olduğunu göstermektedir. Öte yandan, Şekil 3.3.'te, Gantt şeması parça ailesi hazırlık süreleri ile makineleri göz önüne alarak çizilmiştir. Şekil 3.3.'te belirtildiği gibi, bu makineler, M2 ve M4'ün kullanılması nedeniyle bir darboğaza neden olabilir.



Şekil 3.2. (a) Model 1 kullanılarak test problem 7 için oluşturulan Gantt şeması (b) Model 3 kullanılarak test problem 7 için oluşturulan Gantt şeması



Şekil 3.3. (a) Model 1 kullanılarak test problem 7 için oluşturulan Gantt şeması (b) Model 3 kullanılarak test problem 7 için oluşturulan Gantt şeması

Buna ek olarak, Şekil 3.2. (a) ve Şekil 3.3. (b)'de görüldüğü üzere bir parça bir makinede birden fazla kez de işlem görebilmektedir. Şekil 3.2 - 3.3 (a)'da, atölye tipi hücre çizelgeleme problemi için C_{enb} değerinin 53 dakika olarak elde edildiği görülmektedir. Şekil 3.2. - 3.3. (b)'de, M2 ve M4'ün çoğaltılması nedeniyle EATHÇP için C_{enb} değeri 34 dakikaya düşmüştür.

3.4. İki Amaçlı Hücre Çizelgeleme Modeli

Önerilen modellerin analizleri göstermiştir ki EATHÇP'yi çözmek için Model 3 en uygun modeldir. Gerçek hayat problemlerinin çelişen çok amaca sahip olması nedeniyle modele ikinci bir amaç fonksiyonu eklenmiştir. Eşitlik 3.22'de belirtildiği gibi modele toplam gecikme süresi, ikinci amaç olarak eklenmiştir. Dolayısıyla, enküçüklenmek istenen amaç fonksiyonları, C_{enb} ve toplam gecikme süresi olarak güncellenmiştir. Buna ek olarak, eşitlik 3.23 ve 3.24, her bir işin teslim sürelerini hesaplaması için Model 3'e eklenmiştir. Eşitlik 3.23, işlerin gecikmesini hesaplarken eşitlik 3.24 pozitif değişkenleri tanımlamaktadır. İki amaçlı model aşağıda verilmiştir:

$$\text{Enk } C_{enb} \quad (3.21)$$

$$\text{Enk } \sum_{i=1}^N t_i \quad (3.22)$$

$$t_i \geq c_{ijq} - D_i \quad q = 1, 2, \dots, M \quad i = 1, 2, \dots, N \quad j = 1, 2, \dots, r_i \quad (3.23)$$

$$t_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.24)$$

Eşitlik (3.11) - (3.18) arasındaki tüm kısıtlar geçerlidir.

Skalerleştirme yöntemleri, yaygın bir şekilde çok amaçlı modelleri çözmede kullanılmaktadır. Bu yöntemler, çok amacı tek amaca dönüştürmektedir. Tablo 2.3.'ten görüldüğü gibi, literatürde çizelgeleme problemlerini çözmek için ağırlıklı toplam yöntemi ve ϵ -kısıt yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmada, konik skalerleştirme yöntemi çok amaçlı doğrusal olmayan hücre çizelgeleme problemini çözmede kullanılmış ve sonuçları ağırlık toplam yönteminin ve ϵ -kısıt yönteminin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ağırlıklı toplam yönteminin, ϵ -kısıt yönteminin ve konik skalerleştirme yönteminin modele uygulanışı kısaca aşağıdaki eşitlikler aracılığıyla gösterilmiştir.

Ağırlıklı toplam yöntemi: Bu yöntemde, W_1 ve W_2 , iki amaç fonksiyonu için dağıtılmış göreceli ağırlıklardır ve bu ağırlıklar karar vericiler tarafından belirlenmektedir. W_1 ve W_2 'ye farklı ağırlık değerleri atanarak farklı çözümler elde edilmiştir. Sonuçta, test problemi 7'nin Pareto yüzeyi (frontier) üretilmiştir. Ağırlıklı toplam yöntemi ile oluşturulan matematiksel model aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\text{Enk } W_1 \cdot C_{\text{enb}} + W_2 \cdot \sum_{i=1}^N t_i \quad (3.25)$$

Eşitlik (3.11) - (3.18) arasındaki tüm kısıtlar geçerlidir.

Eşitlik (3.23) - (3.24) arasındaki tüm kısıtlar geçerlidir.

Bu modelde, $W_1, W_2 \geq 0$ ve $W_1 + W_2 = 1$ olmalıdır.

ε -kısıt yöntemi: Bu yöntemde, toplam gecikme süresinin enküçüklemesi, eşitlik 3.26'da gösterildiği gibi amaç fonksiyonu olarak ele alınmıştır. C_{enb} değerinin enküçüklemesi, eşitlik 3.27'deki gibi kısıt olarak ele alınmıştır. ε -kısıt yöntemi ile oluşturulan matematiksel model aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\text{Enk } \sum_{i=1}^N t_i \quad (3.26)$$

$$C_{\text{enb}} \leq \varepsilon \quad (3.27)$$

Eşitlik (3.11) - (3.18) arasındaki tüm kısıtlar geçerlidir.

Eşitlik (3.23) - (3.24) arasındaki tüm kısıtlar geçerlidir.

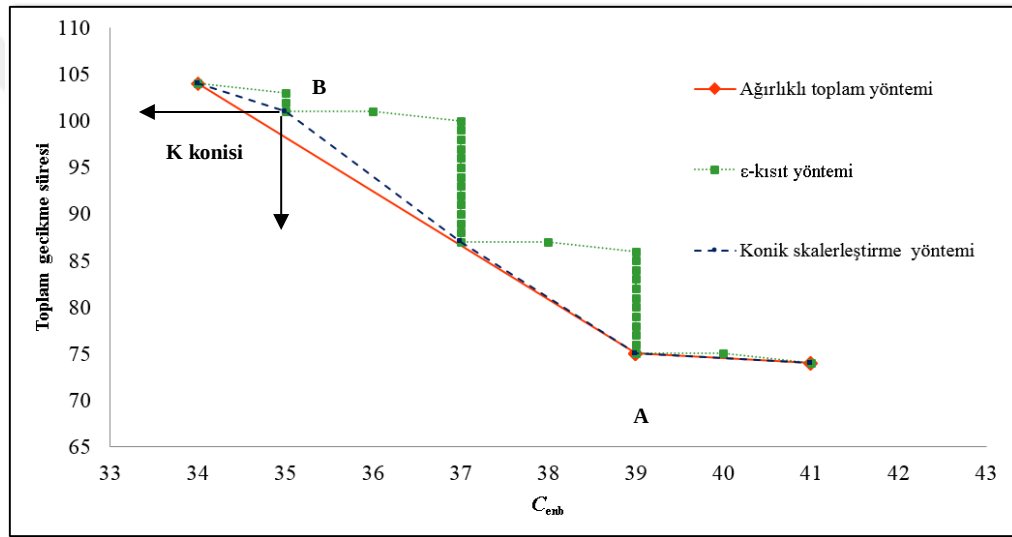
Konik skalerleştirme yöntemi: Bu yöntemde, $\alpha=0$ olarak ele alınırsa eşitlik 3.28'deki skaler problemin amaç fonksiyonu ağırlıklı toplam yönteminin amaç fonksiyonu olacaktır. Bu modelde, $W_1, W_2 > 0$ ve $0 \leq \alpha \leq \text{enk}(W_1, W_2)$ şartları sağlanmalıdır. Problemin konik skalerleştirme yöntemi ile oluşturulan matematiksel modeli aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\text{Enk } W_1(C_{\text{enb}} - B_1) + W_2(\sum_{i=1}^N t_i - B_2) + \alpha(|C_{\text{enb}} - B_1| + |\sum_{i=1}^N t_i - B_2|) \quad (3.28)$$

Eşitlik (3.11) - (3.18) arasındaki tüm kısıtlar geçerlidir.

Eşitlik (3.23) - (3.24) arasındaki tüm kısıtlar geçerlidir.

B_1 ve B_2 , sırasıyla C_{enb} 'nin ve toplam gecikme süresi amaçlarının referans değerlerini göstermektedir. Bu değerler keyfi olarak seçilmiştir. Konik skalerleştirme yönteminin üstünlüğünü göstermek için ağırlıklı toplam yöntemi, ε -kısıt yöntemi ve konik skalerleştirme yöntemi, test problemi 7 dikkate alınarak iki amaçlı modele uygulandı. Şekil 3.4.'te, bu yöntemlerin Pareto yüzeyi gösterilmektedir. Amaç fonksiyonlarının öncelik ağırlık değerleri, $W_2 = 1 - W_1$ ile hesaplanmıştır. $W_1 = 0.1t$ formülasyonu ile hesaplanmıştır ve $t = 0,1,\dots,10$ aralığındaki değerleri belirtmektedir. Konik skalerleştirme yönteminin koniklik şartını sağlamak için en küçük amaç ağırlığı bulunur ve bu değerden 0.01 değeri çıkarılır ($\alpha = \text{enk}\{W_1, W_2\} - 0.01$).



Şekil 3.4. Ana skalerleştirme yöntemlerine göre oluşturulan Pareto yüzeyi

Amaçların en küçük ve en büyük değerleri baz alınarak C_{enb} için referans değerleri [32, 42] aralığında ve toplam gecikme süresi için referans değerleri [70, 110] aralığında belirlenirken öncelik ağırlık değerleri (0.5, 0.5) olarak seçilmiştir. Buna ek olarak, (35, 101) ve (37, 87) gibi ağırlıklı toplam yöntemiyle elde edilemeyen sonuçlar, (32, 110) ve (38, 80) referans noktaları kullanılarak konik skalerleştirme yöntemi ile ulaşılabilir. ε değerlerinin üst sınırı, $\varepsilon = 75 + t$ ile hesaplanmıştır ve $t = 0,1,\dots,40$ aralığındaki değerleri belirtmektedir. Ağırlıklı toplam yöntemi, ε -kısıt yöntemi ve konik skalerleştirme yöntemi, bu parametre değerleri ile Lingo 11.0 yazılımı kullanılarak çözülmüştür ve elde edilen Pareto en iyi noktalar Şekil 3.4.'te gösterilmiştir. Şekil 3.4.'te, Pareto en iyi noktaları, her bir skalerizasyon yöntemini kullanarak kırmızı çizginin elde edilebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, B

noktası, ε -kısıt yöntemi ve konik skalerleştirme yöntemi ile hesaplanabilirken ağırlıklı toplam yöntemi ile hesaplanamamaktadır. Diğer taraftan, yeşil çizgi ile gösterilen zayıf Pareto en iyi çözümler de ε -kısıt yöntemi ile elde edilebilmektedir. Konik skalerleştirme yöntemi, sadece uygun etkin çözümü hesaplamıştır. Bu örnek, konik skalerleştirme yönteminin üstünlüğünü kanıtlamaktadır.

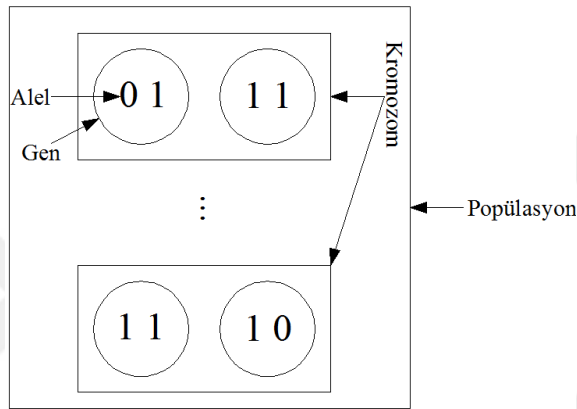


BÖLÜM 4. İKİ AMAÇLI ESNEK ATÖLYE TİPİ HÜCRE ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN GENETİK ALGORİTMA YAKLAŞIMI

Modelin karmaşık olması, doğrusal olmaması ve çok amaçlı olması nedeniyle geliştirilen matematiksel modelin büyük boyutlu problemler için Lingo yazılım paketiyle çözümünün yetersiz kaldığı bir önceki bölümde gösterilmişti. Problem boyutu arttıkça, matematiksel modelin makul sürede çözülmemesi nedeniyle problemin en iyi ya da en iyiye yakın çözümünü daha kısa sürede veren bir sezgisel ya da meta-sezgisel yöntemin gerekliliği ortaya çıkmış ve genetik algoritmanın bu tip problemler için uygun olduğu tespit edilmiştir. Bölüm 2’de yer alan Tablo 2.2.’deki literatür araştırması incelendiği zaman genetik algoritma meta-sezgisel yaklaşımının hücre çizelgeleme problemlerinde kullanımının son yıllarda arttığı görülmektedir. Hem çözüme hızlı ulaşması hem de literatürdeki yaygın kullanımından dolayı bu tez çalışmasında genetik algoritma meta-sezgisel çözüm yaklaşımı kullanılmıştır.

Genetik Algoritma (GA), doğal seleksiyon ve doğal genetik mekanizmasına dayanan kombinatoriyal optimizasyon problemleri için bir sezgisel arama algoritmasıdır (Goldberg, 1989). GA yaklaşımı ilk olarak Holland (1975) tarafından literatüre tanıtılmış ve Davis ve Coombs (1987) tarafından da ilk kez çizelgeleme problemlerini çözmede kullanılmıştır. GA, başlangıç popülasyonu adı verilen (rastgele ya da bazı sezgisel yöntemlerle üretilebilir) başlangıç çözüm kümesiyle başlamaktadır. Popülasyondaki her bir bireye, problemdeki bir çözümü gösteren bir kromozom denir. Kromozomlar, gen adı verilen bir dizi öğeden oluşmaktadır. Genlerin alabileceği değerlere de alel denmektedir (Kundakcı ve Kulak, 2016). Şekil 4.1.’de basit bir popülasyon, kromozom, gen ve alel yapısı gösterilmeye çalışılmıştır. Şekil 4.1.’de en az iki popülasyon varken, kromozomlar iki gen ve iki alelden oluşmaktadır. Her bir alelin değeri 0 ya da 1’dir (Chen ve ark., 2013).

GA'da, problem için uygun bir kodlama ve her bir kromozomun kalitesini gösteren bir uyum (fitness) fonksiyonu gereklidir. Üreme (seçim) operatörü, çocuk kromozomları üretmek için çaprazlama operatörü kullanarak aileleri seçer. Bu çocuk kromozomlar, kromozomlardaki her bir genin rastgele yer değiştirmesiyle bir mutasyon operasyonuna maruz kalır. Yeni bir nesil oluşturulduktan sonra, kromozomlar onların uyum fonksiyonu değerlerine göre değerlendirilir. Bu süreç, durdurma ölçütü sağlanana kadar devam eder (Kundakcı ve Kulak, 2016).

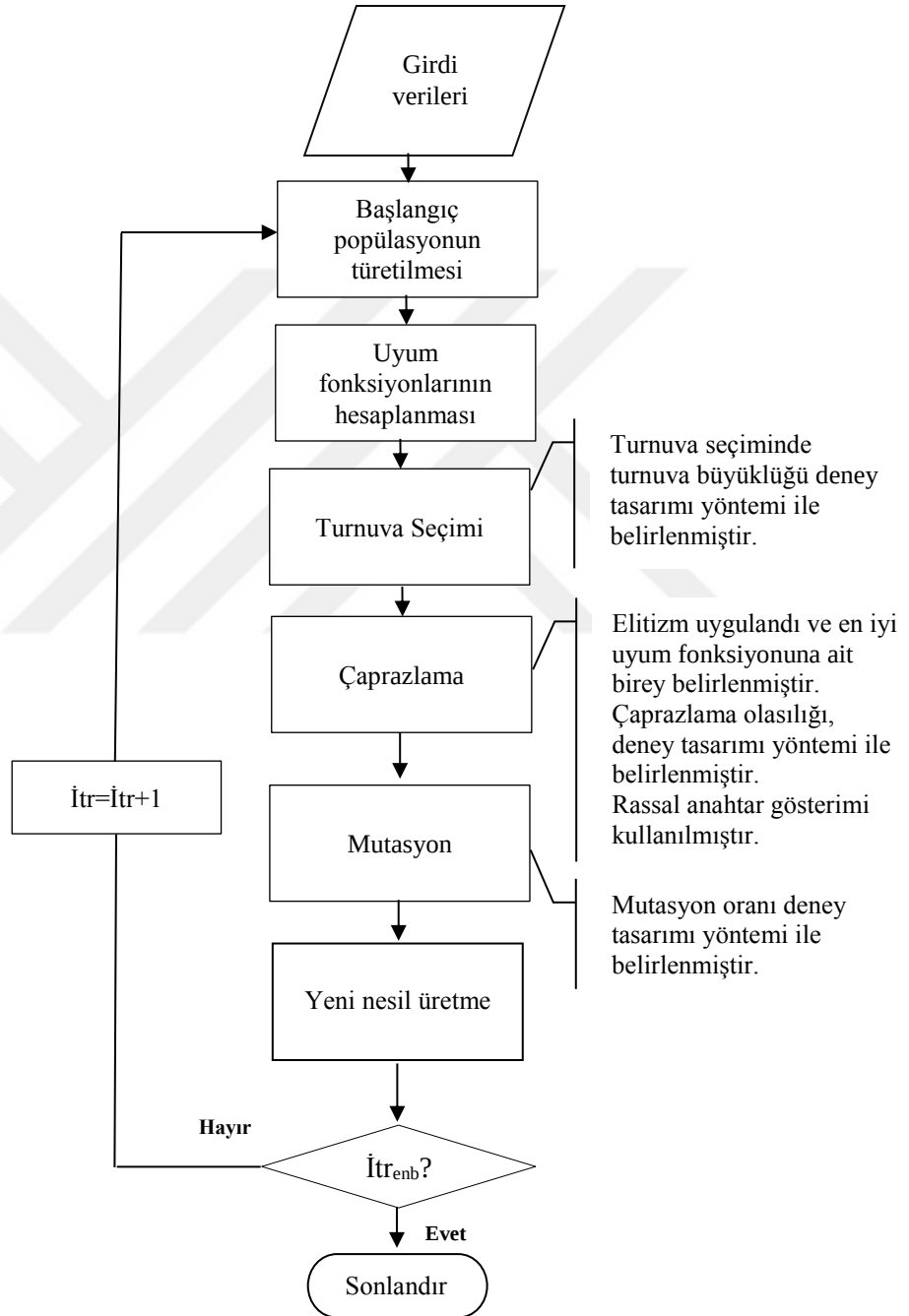


Şekil 4.1. Popülasyon, kromozom, gen ve alel için örnek gösterim

Önerilen genetik algoritmanın çözüm adımları, Şekil 4.2.'de ayrıntılı bir şekilde özetlenmiştir. Şekil 4.2.'ye göre algoritma, kromozomların oluşturulması ile başlamaktadır. Başlangıç popülasyonu oluşturulduktan sonra, oluşturulan popülasyonun uyum fonksiyonları daha önceki bölümde oluşturulan matematiksel modelin (Model 3) kısıtları göz önüne alınarak değerlendirilmektedir. Uygunluklar değerlendirildikten sonra popülasyona genetik operatörler uygulanmaktadır. Genetik operatörlerin parametreleri, deney tasarımı yöntemi ile elde edilmiştir. Elitizm uygulanarak en iyi uyum fonksiyonuna sahip bir bireyin mutlaka popülasyona dâhil edilmesi sağlanmıştır. Bu aşamalara sonlandırma ölçütü sağlanana kadar ardışıklı (iteratif) olarak devam edilmiştir.

GA uygulayarak bir çözüm aramaya yönelik nesiller üretilirken, evrim prosedürlerinin ne zaman sona ereceğini belirlemek için ilk önce evrimin sonlandırma ölçütüne karar verilmesi gerekmektedir. Genetik algoritmanın sonlandırma ölçütü, en büyük nesil sayısı, çalışma süresi, belirli bir uyum fonksiyon değerine ulaşma sınırı gibi değerlerle

belirlenebilir (Wang ve Guo, 2016). Genellikle genetik algoritmalar sonlandırma (durdurma) ölçütü olarak en büyük ardışırma (iterasyon) sayısını kullansa da bu ölçüt ele alınan problemin yapısına ve modele göre değışebilmektedir. Benzer şekilde, genetik operatörler de kullanılan modellere ve problemlerin yapısına göre revize edilebilmektedir.



Şekil 4.2. Önerilen genetik algoritmanın çalışma prensibi

Kromozom gösterimi, eldeki problemin tipine bağlıdır ve GA yaklaşımının performansı üzerinde çok önemli bir etkiye sahiptir. Uygun bir kromozom tasarımı algoritmanın performansını arttırabilirken etkin olmayanı algoritmanın performansını azaltabilmektedir. Farklı kromozom gösterimleri üzerine çalışmaları ilk olarak Rothlauf ve Goldberg (2003) literatüre tanıtmışlar ve meta-sezgisel algoritmaların performansı üzerine kromozom gösteriminin etkisini kapsamlı bir şekilde araştırmışlardır.

Bu çalışmada, önerilen genetik algoritma yaklaşımı için geliştirilen kromozom tasarımı açıklanacaktır. Her kromozom, tamsayılardan oluşan bir dizi genden oluşmaktadır. Literatür incelemeleri de dikkate alınarak oluşturulan ve modelde bir çözüme karşılık gelen kromozom yapısı, 4 vektörden oluşmaktadır. (i) operasyon sıralama vektörü (v_1), (ii) makine atama vektörü (v_2), (iii) ilgili parçanın hangi parça ailesine ait olduğunu gösteren vektör (v_3), (iv) ilgili makinenin hangi hücreye ait olduğunu gösteren vektör (v_4).

Sayısal bir örnek üzerinden gitmek kromozomun nasıl oluşturulduğunu anlamak açısından faydalı olacaktır.

Sayısal Örnek 2: Problem, Tablo 3.1. ve 3.2.'deki veri seti göz önüne alınarak oluşturulmuş ve basit yapısı nedeniyle 4 parça, 4 makine, 2 parça ailesi ve 2 hücreden oluşan test problem 1 ele alınmıştır. İşlem sıraları, makine seçenekleri, parça işlemleri, işlem süreleri ve parçaların rota bilgisi Tablo 4.1.'de gösterilmiştir. Süreler, dakika cinsinden ele alınmıştır.

Tablo 4.1. Sayısal örnek 2 için örnek parça-makine matrisi, işlem süreleri ve rotalama

		Hücre 1		Hücre 2		Rotalama
		M1	M2(2) ^a	M3(2) ^a	M4	
Parça ailesi 1	P1	4	5	6		1-2-3-2
	P2	3	4			2-1-2
Parça ailesi 2	P3		7	2	4	4-2-3
	P4			6	2	3-4-3

^a Makine 2 ve 3, ikişer tane özdeş paralel makineye sahiptir. Kalan makinelerden birer tane olduğu varsayılmaktadır.

P: Parça, M: Makine

Kromozom gösterimin için oluşturulan 4 vektörün nasıl elde edildiği alt başlıklar halinde ele alınan sayısal örnek üzerinden kısaca anlatılacaktır. Onarma mekanizması gerektirmediği için Zhang (2011)'in önerdiği kodlama şeması kullanılacaktır. Onarma mekanizmasının olmaması, kod çözme işleminin daha kısa zamanda olmasını sağlamaktadır. Bu da algoritmanın performansını olumlu yönde etkilemektedir.

4.1.1. Operasyon sıralama vektörünün gösterimi

Kodlama yapısını oluşturmak için Zhang (2011)'in önerdiği operasyon-tabanlı kromozom gösterimi kullanılmıştır. Bu gösterim tipine göre, bir işin tüm operasyonları aynı sembolle tanımlanmaktadır ve daha sonra bu semboller, kromozom içindeki sırasına göre yorumlanmaktadır. Kromozom uzunluğu toplam operasyon sayısına eşittir. Tablo 4.1.'e bakılacak olursa toplamda 13 operasyon vardır ve bu örnek için oluşturulacak olan kromozom, 13 genden oluşmaktadır. 13 gen, 4 tane "1" alel değerinden, 3'er tane de sırasıyla "2", "3" ve "4" alel değerlerinden oluşmaktadır. Bu alel değerleri, ilgili operasyonun hangi işe ait olduğunu göstermektedir ve soldan sağa doğru sıralanmaktadır. Operasyon sıralama vektörüne ait kromozom yapısı Şekil 4.3.'te gösterilmektedir.

Pozisyon: r	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Belirtilen iş	P ₂	P ₄	P ₂	P ₃	P ₁	P ₃	P ₂	P ₁	P ₄	P ₁	P ₃	P ₄	P ₁
Operasyon sırası: v ₁ (r)	2	4	2	3	1	3	2	1	4	1	3	4	1
Belirtilen operasyon	O ₂₁	O ₄₁	O ₂₂	O ₃₁	O ₁₁	O ₃₂	O ₂₃	O ₁₂	O ₄₂	O ₁₃	O ₃₃	O ₄₃	O ₁₄

Şekil 4.3. Operasyon sıralama vektörünün gösterimi

Örneğin, 1. iş, 4 operasyondan oluşmaktadır ve 4 tane "1" alel değerinde gen oluşturulur. Kromozomda soldan başlayarak ilk "1" değeri, 1. işin birinci operasyonunu ifade ederken, ikinci "1" değeri aynı işin ikinci operasyonunu göstermektedir. Üçüncü ve dördüncü "1" değerleri, 1. işin sırasıyla üçüncü ve dördüncü operasyonunu ifade etmektedir. Benzer şekilde, diğer işlerin operasyonları da bu şekilde hesaplanmaktadır. Şekil 4.3.'teki operasyon sırası, aşağıdaki gibi düzenlenen operasyon vektörünün sırasını göstermektedir:

$$O_{21} > O_{41} > O_{22} > O_{31} > O_{11} > O_{32} > O_{23} > O_{12} > O_{42} > O_{13} > O_{33} > O_{43} > O_{14}$$

Burada $a > b$ ifadesi, ilk önce “a” operasyonunun atandığı makine kuyruğuna girdiğini, daha sonra da “b” operasyonunun çizelgelendiği anlamına gelmektedir. Kromozomdaki birinci vektör ($v_1(r)$), ilgili operasyonun hangi sırada olduğunu göstermektedir.

4.1.2. Makine atama vektörünün gösterimi

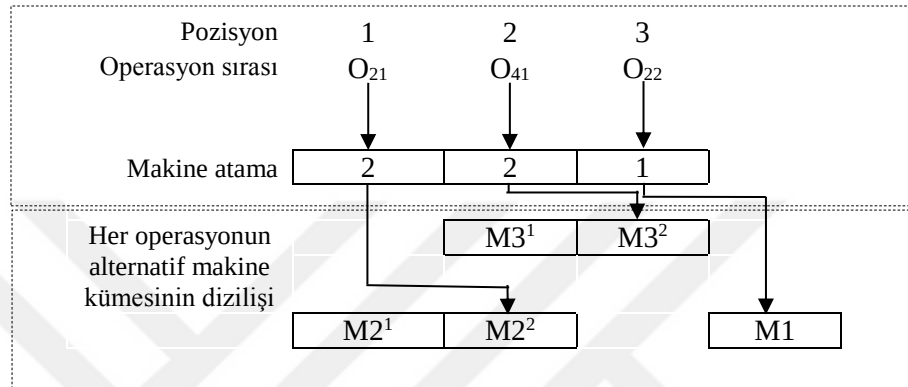
Makine seçimini temsil etmek için tamsayı değerleri kullanılmaktadır. Bu kromozomun uzunluğu da yine toplam operasyon sayısına eşittir. Makine atama vektörüne ait kromozom yapısı Şekil 4.4.’te gösterilmektedir.

Pozisyon: s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Operasyon sırası: $v_1(s)$	2	4	2	3	1	3	2	1	4	1	3	4	1
Makine atama: $v_2(s)$	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	1	1
Belirtilen makine	M2 ²	M3 ²	M1	M4	M1	M2 ¹	M2 ²	M2 ²	M4	M3 ¹	M3 ²	M3 ¹	M2 ¹

Şekil 4.4. Makine atama vektörünün gösterimi

Tablo 4.1.’den görüldüğü gibi, M1 ve M4, alternatif makineye sahip değildir. Yani, M1 ve M4’ten birer tane vardır. M1, makine 1’i ifade ederken M4 de makine 4’ü ifade etmektedir. Benzer şekilde, M2 ve M3, ikişer tane alternatif makineye (özdeş paralel makine) sahiptir. Alternatif makine sayısı farklı örnekler için değişkenlik gösterebilir. Dolayısıyla, M2¹, makine 2’nin birinci alternatif makinesini belirtirken M2², yine makine 2’nin ikinci alternatif makinesini belirtmektedir. Kromozomdaki ikinci vektör ($v_2(s)$), ilgili makine için hangi alternatif makineyi kullandığını göstermektedir. Bu durumda, eğer ilgili makine alternatif makineye sahipse “1” değerinden ilgili operasyonun işlem görebileceği alternatif makine sayısına kadar rastgele sayı atanır. Örneğin, $v_2(1)=2$ ’dir. Yani, kromozom gösteriminde ikinci vektörde birinci pozisyonundaki alternatif makine “2”dir. Bu, birinci pozisyonundaki O_{21} operasyonun M2²’de işlem göreceği anlamına gelir. Eğer ilgili makine alternatif makineye sahip değilse “1” değeri atanır. Örneğin, $v_2(3)=1$ ’dir. Yani, kromozom gösteriminde ikinci vektörde üçüncü pozisyonundaki operasyonun işlem göreceği makine alternatif

makineye sahip olmadığı için makine atama vektörüne “1” yazılır. Bu, üçüncü pozisyonundaki O_{22} operasyonun $M1$ ’de işlem göreceği anlamına gelmektedir. Bu işlem, esnek atölye tipi hücre çizelgeleme probleminde yeniden devire (recirculation) izin vermektedir. Daha anlaşılır olması için, Şekil 4.4.’teki kromozom gösterimin ilk üç pozisyonuna ait operasyon sırası ve makine atama vektör gösterimi Şekil 4.5.’te sunulmuştur.



Şekil 4.5. Şekil 4.4.’teki ilk 3 gen için detaylı makine atama vektör gösterimi

4.1.3. Parça ailesi ve hücre atama vektörünün gösterimi

Parça ailesi ve hücre atama vektörü için tamsayı değerleri kullanılmaktadır ve bu vektör gösterimleri için de kromozomun uzunluğu, toplam operasyon sayısına eşittir. Parça ailesi ve hücre atama vektörüne ait kromozom yapısı Şekil 4.6.’da gösterilmektedir. $v_1(t)$ vektöründeki operasyonlar ve $v_2(t)$ vektöründeki makineler, Tablo 4.1.’deki veriler dikkate alınarak sırasıyla uygun parça ailesine ve hücreye atanırlar. Ele alınan örnekte, $v_1(t)$ vektöründeki operasyonlar hangi parça ailesine aitse $v_3(t)$ vektörüne ve $v_2(t)$ vektöründe verilen makineler hangi hücreye aitse $v_4(t)$ vektörüne “1” ya da “2” tamsayı değerleri atanır.

Pozisyon: t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Operasyon sırası: $v_1(t)$	2	4	2	3	1	3	2	1	4	1	3	4	1
Makine atama: $v_2(t)$	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	1	1
Parça ailesi atama: $v_3(t)$	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1
Belirtilen makine	$M2^2$	$M3^2$	$M1$	$M4$	$M1$	$M2^1$	$M2^2$	$M2^2$	$M4$	$M3^1$	$M3^2$	$M3^1$	$M2^1$
Hücre atama: $v_4(t)$	1	2	1	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1

Şekil 4.6. Parça ailesi ve hücre atama vektörünün gösterimi

4.2. Başlangıç Popülasyonu

Başlangıç popülasyonunun oluşturulması, farklı mekanizmalarla bulunabilir. Çoğu araştırmada çeşitli bireyler üretmek için başlangıç popülasyonu rastgele üretilmektedir. Başlangıç popülasyonu, arama alanındaki başlangıç noktasıdır. Genetik algoritmanın performansı, başlangıç popülasyona bağlıdır. Popülasyon büyüklüğü, GA yaklaşımının en önemli parametrelerinden biridir. Ele alınan çalışmada, başlangıç popülasyonu rastgele oluşturulmuştur ve kullanılan yapının adımları Tablo 4.2.'de verilmiştir.

Tablo 4.2. Başlangıç popülasyonunun oluşturulması

Başlangıç popülasyonu prosedürü	
Girdiler:	
1. İş sayısı	7. Her bir işe ait operasyonlar
2. Makine seti sayısı	8. Her bir hücredeki makine seti
3. Her bir makine setindeki makineler	9. Her bir parça ailesindeki işler
4. Parça ailesi sayısı	10. Her bir hücredeki makineler
5. Hücre sayısı	11. Popülasyon büyüklüğü
6. Her bir işin operasyon sayısı	12. Toplam operasyon sayısına eşit olan kromozom uzunluğu
İşlem Adı	İşlem Adımları
İş Kromozomu Oluşturma	A1. Kromozom uzunluğu kadar gen oluşturulur. A2. Her bir işin operasyon sayısı kadar iş değerini taşıyan alel değeri oluşturulur. A3. Oluşturulan bu genler rastgele sıralanır.
Operasyon Kromozomu Oluşturma	A4. Soldan itibaren her bir işe sırasıyla işin operasyonları atanır.
Makine Kromozomu Oluşturma	A5. Soldan itibaren her bir operasyonun işlem görebileceği makine seti içinden bir makine atanır.
Hücre Kromozomu Oluşturma	A6. Adım 5'te oluşturulan makine kromozomuna göre soldan itibaren makineler ait olduğu hücreye atanır.
Parça Ailesi Kromozomu Oluşturma	A7. Adım 3'te oluşturulan iş kromozomuna göre soldan itibaren işler ait olduğu parça ailesine atanır.
Popülasyon Oluşturma	A8. Popülasyon büyüklüğüne ulaşıldı ise kromozom üretimi durdurulur, aksi halde Adım 1'e geri dönülür ve her birey için tanımlanan bu 5 adet kromozom oluşturulmaya devam edilir.

4.3. Uyum Fonksiyonu

Uyum fonksiyonu, bir sonraki nesle aktarılabacak kromozomlara karar verilirken önemli rol oynamaktadır. Uyum fonksiyonunun değeri ne kadar küçükse (enküçükleme problemleri için) kromozomun (yani, ebeveynin) performansı da o kadar iyidir. Bu nedenle, daha düşük uyum fonksiyonu değerlerine sahip olan ebeveynlerin hayatta kalma şansı daha fazla olmaktadır (Balin, 2011). Problemin uyum fonksiyonu iki parçadan oluşmaktadır. Birincisi, en büyük tamamlanma süresi (C_{enb}) iken ikincisi toplam gecikme süresidir. Önerilen algoritma öncelikle tek amaç fonksiyonu (C_{enb}) ile çözülmüş ve elde edilen uyum fonksiyonları Lingo 11.0 yazılımı ile elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır. Önerilen algoritmanın performansının daha iyi olduğu vurgulandıktan sonra, modele ikinci amaç eklenmiştir. Uyum fonksiyonu hesaplama kodu, iki Gantt diyagramı kontrol edilerek oluşturulmaktadır. Bu diyagramlardan biri, her bir parçadaki makinelerin sıralanmasını gösterirken diğeri ise her bir makinedeki operasyonların sıralanmasını göstermektedir. İlk diyagram, hücrelerarası taşıma sürelerini göz önüne alarak oluşturulurken diğeri ise parça aileleri arası hazırlık sürelerini göz aldığı için bu iki diyagramın eş zamanlı olarak oluşturulması gerekmektedir. Uyum fonksiyonunun hesaplanma adımları Tablo 4.3.'te verilmiştir. Şekil 4.7. (a) ve (b)'deki matrisler ile izleyen algoritma adımları dikkate alınarak iş çizelgesi oluşturulması sağlamaktadır. Şekil 4.7. (a) ve (b), sayısal örnek 2'deki değerler göz önüne alınarak oluşturulmuştur ve makine-operasyon ve operasyon-makine matrisinde başlangıç sürelerini göstermektedir. Bu süreler, uyum fonksiyonu hesabı ile birikimli olarak artmaktadır. Örneğin, $M2^2$ makinesinde işlem gören 2. operasyon Şekil 4.7. (a) matrisinde taralı alanla gösterilmektedir. Bu taralı alan (3,2) indisi ile gösterilmektedir. Tablo 4.3.'te uyum fonksiyonu hesabı anlatımda kolaylık olması açısından makine indisi ($k=1,...,6$) makine adı olarak kullanılacaktır.

kj		1	2	...	13	jk		1	2	3	4	5	6
		O1	O2	...	O13			M1	M2 ¹	M2 ²	M3 ¹	M3 ²	M4
1	M1	0	0	0	0	1	O1	0	0	0	0	0	0
2	M2 ¹	0	0	0	0	2	O2	0	0	0	0	0	0
3	M2 ²	0	0	0	0	3	O3	0	0	0	0	0	0
4	M3 ¹	0	0	0	0	...	...	0	0	0	0	0	0
5	M3 ²	0	0	0	0	12	O12	0	0	0	0	0	0
6	M4	0	0	0	0	13	O13	0	0	0	0	0	0

(a)

(b)

M: Makine, O: Operasyon, k : makine indisi, j : operasyon indisi

Şekil 4.7. (a) Başlangıç makine-operasyon matrisi (b) Başlangıç operasyon-makine matrisi

Tablo 4.3. Uyum fonksiyonunun hesaplanması

Uyum fonksiyonunun hesaplanması prosedürü	
Girdiler:	
1. İş sayısı	9. Hücre kromozomu
2. Makine seti sayısı	10. Parça ailesi kromozomu
3. Her bir makine setindeki makineler	11. Toplam operasyon sayısı ($T_{operasyon}$)
4. Parça ailesi sayısı	12. Her bir operasyonun işlem süresi
5. Hücre sayısı	13. Hücrelerarası taşıma süresi
6. İş kromozomu	14. Parça aileleri arası hazırlık süresi
7. Operasyon kromozomu	15. İşlerin teslim süresi
8. Makine kromozomu	16. Popülasyon büyüklüğü
İşlem Adı	İşlem Adımları
Makine	A1. Her bir makinedeki son operasyonu tamamlanma süresini tutan bir kromozom oluşturulur. Kromozom uzunluğu toplam makine sayısına eşittir.
Tamamlanma Süresi	A2. Her bir işin tamamlanma süresini tutan bir kromozom oluşturulur. Kromozom uzunluğu iş sayısına eşittir.
Kromozomu	A3. Başlangıç makine-operasyon matrisi oluşturulur. Boyutları toplam makine sayısı, toplam operasyon sayısıdır. Başlangıç değerleri sıfırdır.
İş Tamamlanma Süresi Kromozomu	A4. Başlangıç operasyon-makine matrisi oluşturulur. Boyutları toplam operasyon sayısı, toplam makine sayısıdır. Başlangıç değerleri sıfırdır.
Başlangıç makine-operasyon matrisi	A5. Operasyon kromozomu ve makine kromozomu ele alınır ve her iki kromozom da soldan itibaren taranmaya başlanır.
Başlangıç operasyon-makine matrisi	A6. $i=1$ olsun.
İlgili Operasyon ve Makinenin Seçilmesi	A7. Soldan itibaren i . pozisyon gendeki operasyona karşılık gelen i . pozisyon makinedeki işlem süresi ele alınır ($m=i$. pozisyon gendeki makine değeri, $j=i$. pozisyon gendeki operasyon değeri)
Karar Verme	A8. Operasyon kromozomu ele alınır ve i . pozisyonadaki operasyon i . pozisyonadaki makinenin ilk operasyonu mu değil mi kontrol edilir.
Makinelerin Tamamlanma Süresini Hesaplama	A8(1). Eğer i . pozisyonadaki makinenin <u>ilk</u> operasyonu ise; - A7'de bulunan makinedeki işlem süresi, A1'de oluşturulan makine tamamlanma kromozomunda m . pozisyon makine genine yazılır ve başlangıç makine-operasyon matrisinde m . makine j . operasyon elemanı güncellenir.
	A8(2). Eğer i . pozisyonadaki makinenin <u>ilk</u> operasyonu <u>değilse</u> ; - i . pozisyonadaki operasyon ile $(i-1)$. pozisyonadaki operasyon aynı parça ailesinde mi değil mi kontrol edilir.
	A8(2.1). Eğer i . pozisyonadaki operasyon ile $(i-1)$. pozisyonadaki operasyon <u>aynı</u> parça ailesinde ise; - A7'de ele alınan süreye hazırlık süresi eklemeyen ilgili makinenin yeni süresi hesaplanır ve A1'de oluşturulan makine tamamlanma kromozomunda m . pozisyon makine genine yazılır ve başlangıç makine-operasyon matrisinde m . makine j . operasyon elemanı güncellenir.
	A8(2.2). Eğer i . pozisyonadaki operasyon ile $(i-1)$. pozisyonadaki operasyon aynı parça ailesinde <u>değilse</u> ; - A7'de ele alınan süreye $(i-1)$. pozisyonadaki operasyonun bulunduğu parça ailesinden i . pozisyonadaki operasyonun bulunduğu parça ailesine geçiş için kullanılan hazırlık süresi eklenerek ilgili makinenin yeni süresi hesaplanır ve A1'de oluşturulan makine tamamlanma kromozomunda m . pozisyon makine genine yazılır ve başlangıç makine-operasyon matrisinde m . makine j . operasyon elemanı güncellenir.

Tablo 4.3. (Devamı)

Uyum fonksiyonunun hesaplanması prosedürü (devamı)	
İşlem Adı	İşlem Adımları
Karar Verme	A9. İş kromozomu ele alınır ve i. pozisyonndaki makine i. pozisyonndaki işin ilk makinesi mi değil mi kontrol edilir ($n=i$. pozisyon genindeki iş değeri) A9(1). Eğer i. pozisyonndaki işin <u>ilk</u> makinesi ise; - A7'de bulunan makinedeki işlem süresi, A2'de oluşturulan iş tamamlanma kromozomunun n. pozisyon iş genine yazılır ve başlangıç operasyon-makine matrisinde j. operasyon m. makine elemanı güncellenir. A9(2). Eğer i. pozisyonndaki makinenin <u>ilk</u> operasyonu <u>değilse</u>; - i. pozisyonndaki makine ile ($i-1$). pozisyonndaki makine aynı hücrede mi değil mi kontrol edilir. A9(2.1). Eğer i. pozisyonndaki makine ile ($i-1$). pozisyonndaki makine <u>aynı</u> hücrede ise; - A7'de ele alınan süreye hücrelerarası taşıma süresi eklemekten ilgili işin yeni süresi hesaplanır ve A2'de oluşturulan iş tamamlanma kromozomunda n. pozisyon iş genine yazılır ve başlangıç operasyon-makine matrisinde j. operasyon m. makine elemanı güncellenir. A9(2.2). Eğer i. pozisyonndaki makine ile ($i-1$). pozisyonndaki makine aynı hücrede <u>değilse</u>; - A7'de ele alınan süreye ($i-1$). pozisyonndaki makinenin bulunduğu hücreden i. pozisyonndaki makinenin bulunduğu hücreye geçiş için kullanılan hücrelerarası taşıma süresi eklenerek ilgili işin yeni süresi hesaplanır ve A2'de oluşturulan iş tamamlanma kromozomunda n. pozisyon iş genine yazılır ve başlangıç operasyon-makine matrisinde j. operasyon m. makine elemanı güncellenir. A10. A8'de hesaplanan başlangıç makine-operasyon matrisinde m. makine j. operasyon değeri ile A9'da hesaplanan başlangıç operasyon-makine matrisinde j. operasyon m. makine değeri karşılaştırılır ve bu sürelerin birbirine eşit mi, büyük mü ya da küçük mü olduğu kontrol edilir (Bu işlem, iki Gantt diyagramının eş zamanlı çizilmesini sağlar).
Karar Verme	A10(1). A8'de hesaplanan süre ile A9'da hesaplanan süre <u>eşitse</u>; - Makine tamamlanma süresi kromozomundaki m. pozisyon gen değeri ve iş tamamlanma süresi kromozomundaki n. pozisyon gen değeri sabit kalır. A10(2). A8'deki süre A9'daki süreden <u>büyükse</u>; - A8'de ele alınan başlangıç makine-operasyon matrisinde m. makine j. operasyon gen değeri, başlangıç operasyon-makine matrisindeki j. operasyon m. makine gen değeri ile değiştirilerek güncellenir ve yine bu değer, A2'de ele alınan iş tamamlanma süresi kromozomundaki n. pozisyon gen değeri ile yer değiştirilerek güncellenir. A10(3). A8'deki süre A9'daki süreden <u>küçükse</u>; - A9'da ele alınan başlangıç operasyon-makine matrisinde j. operasyon m. makine gen değeri, başlangıç makine-operasyon matrisindeki m. makine j. operasyon gen değeri ile değiştirilerek güncellenir ve yine bu değer, A1'de ele alınan makine tamamlanma süresi kromozomundaki m. pozisyon gen değeri ile yer değiştirilerek güncellenir.

Tablo 4.3. (Devamı)

Uyum fonksiyonunun hesaplanması prosedürü (devamı)	
İşlem Adı	İşlem Adımları
Karar Verme & Sonlandırma	A11. $i=i+1$ olsun. A12. Eğer $i \leq T_{\text{operasyon}}$ ise A7'ye gidilir. Aksi takdirde, işlem durdurulur.
C_{enb} Uyum Fonksiyon Değerini Bulma	A13. A1'de oluşan makine tamamlanma süresi kromozomu ele alınır ve kromozomdaki en büyük değer bulunur. En büyük değer, C_{enb} değerini verir. A14. A2'de oluşan iş tamamlanma süresi kromozomu ele alınır. Her bir gen, her bir işin teslim süresi ile kıyaslanır ve gen değerinin işin teslim süresinden büyük mü küçük mü kontrol edilir.
Toplam Gecikme Uyum Fonksiyon Değerini Bulma	A14(1). Eğer gen değeri, teslim süresinden <u>küçük eşitse</u> ; - Ele alınan gen için, gecikme süresi "0" olarak hesaplanır. A14(2). Eğer gen değeri, teslim süresinden <u>büyükse</u> ; - Ele alınan gen değeri ile teslim süresi farkı hesaplanır ve bulunan değer o gen için gecikme süresi olarak ele alınır.
Konik Skalerleştirme Uyum Fonksiyon Değerini Bulma	A15. A13 ve A14'te bulunan değerler, eşitlik 3.28'deki yerlerine konarak konik skalerleştirme uyum fonksiyon değeri hesaplanır.
Ağırlıklı Toplam Uyum Fonksiyon Değerini Bulma	A16. A13 ve A14'te bulunan değerler, eşitlik 3.25'teki yerlerine konarak ağırlıklı toplam uyum fonksiyon değeri hesaplanır.

Matematiksel modelin amaç fonksiyonu değeri, GA yaklaşımının uyum değeri olarak atanmıştır ve çözüm kalitesini göstermektedir. Kullanıcının talebine bağlı olarak uyum fonksiyonu Tablo 4.3.'teki A13, A14, A15 veya A16'dan biri olabilir. Popülasyondaki aday çözümlerin kalitesini dikkate almak için amaç fonksiyonu ve kısıtlar birlikte değerlendirilmiştir.

4.4. Genetik Operatörler

Her nesilde, elitizm, seçim, çaprazlama ve mutasyon genetik işlemleri meydana gelmektedir. Kullanılan operatörler şu şekildedir:

Elitizm operatörü: Elitizm, en iyi kromozomun kaybolmasını önlemede ve her nesilde kademeli olarak kromozom setini geliştirmede faydalıdır. Evrim esnasında en iyi kromozomun kaybolmasını önlemek için, en iyi kromozom tanımlanır ve kaydedilir. Amaç, tüm evrim boyunca en iyi bireyin elde tutulmasını sağlamaktır. Elitist strateji, sadece uygun bireylerin genetik operasyonlar tarafından zarar görmesini engellemek için değil ayrıca genetik algoritmanın bütünsel yakınsamasını sağlamak için de

uygulanmaktadır (Sun ve ark., 2012). Hızlı yakınsamayı önlemek ve kromozomlar arasındaki çeşitliliği arttırmak için bu çalışmada sadece bir elit birey bir sonraki nesle aktarılmıştır.

Seçim operatörü: Seçim aşamasında, bir grup birey mevcut popülasyondan seçilir ve eşleşme havuzuna aktarılır. Seçim operatörünün amacı, iyi bireyleri korumak ve kötü olanları nesilden nesle yok etmektir (Oğuz ve Ercan, 2005). Turnuva seçim tekniği, rulet tekeri seçim tekniği, sıralama (ranking) seçim tekniği, kesme (truncation) seçim tekniği, stokastik seçim yönetimi gibi literatürde birçok seçim tekniği bulunmaktadır. Bu çalışmada, turnuva büyüklüğünü kolayca değiştirerek seçim baskısını kontrol edebilmeyi sağlayan turnuva seçim tekniği uygulanmıştır. Küçük turnuva büyüklüğü düşük bir seçim baskısına neden olurken büyük turnuva büyüklüğü de büyük baskıya neden olmaktadır. Eğer turnuva büyüklüğü büyükse, zayıf bireylerin seçilme şansı daha küçük olacaktır. Turnuva seçim tekniği, verimli kodlama yapma, seçim baskısını kolayca ayarlayabilme ve popülasyondaki tüm bireyler arasında uyum fonksiyonunu karşılaştırma işlemi yapmayı gerektirmeme avantajlarına sahiptir. Bu sadece evrimleşmeyi hızlandırmakla kalmaz aynı zamanda algoritmayı paralel hale getirmenin kolay bir yolunu da sağlamaktadır (Banzhaf ve ark., 1998).

Turnuva seçiminde, iki ya da daha fazla birey turnuva oynamak üzere rassal olarak seçilir. Turnuvada bireylerin uyum fonksiyonları karşılaştırılır ve en iyi uyum değerine sahip olan birey, yeni nesle aktarılacak için seçilir (Gopalakrishnan ve Kusanovic, 2015).

Çaprazlama operatörü: Çaprazlama operatörü, ebeveyn bilgisine dayalı yeni bireyler (yavrular) üretmek için benimsenmiştir. Çaprazlama, çeşitlendirme için bir mekanizmadır. Amaç, rassal seçilen iki bireyin bir sonraki nesil için yeni birey oluşturmasıdır (Gopalakrishnan ve Kusanovic, 2015)

Çoklu makine çizelgeleme problemi, kaynak ayırma, karesel atama problemi gibi optimizasyon ve sıralama problemlerine çözüm bulmaya çalışan genetik algoritma, ebeveynlerden uygun yeni bireyler oluşturmada güçlük çekebilmektedir. Özellikle

çaprazlama sonucu olursuz çözüm elde etme olasılığı, rassal anahtar (random keys) olarak adlandırılan güçlü bir gösterim tekniğiyle ortadan kaldırılmaktadır. Bu teknik ile ek bir onarma işlemi gerekmeden tüm yeni bireylerin uygunluğu garanti edilmektedir (Bean, 1994). Bu çalışmada, yaygın olarak kullanılan tek nokta çaprazlama operatörü kullanılacaktır. Tek nokta çaprazlama operatörü iki aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak, iki ebeveyn kromozom rassal olarak seçilir. Daha sonra her bir çift kromozom için 1 ile kromozom uzunluğu l arasında rassal olarak tamsayı bir k pozisyonu seçilir. İki yeni kromozom, $k+1$ ile kromozom uzunluğu l 'nin arasındaki tüm genlerin yer değiştirilmesiyle oluşturulmaktadır (Magalhães-Mendes, 2013).

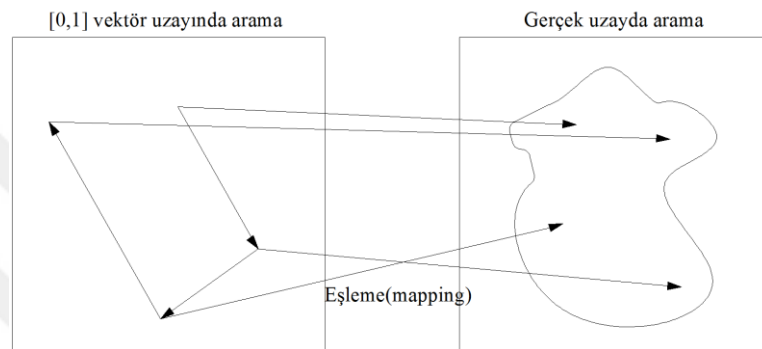
Seçim operatöründen sonra, seçilen ebeveynler bir havuzda eşleme yapmak üzere toplanır. Hangi ebeveynlerin eşleneceğine karar vermek için popülasyondaki her bir ebeveyn için $[0,1)$ arasında rassal ondalık sayılar üretilir ve rassal ondalık sayılar artan sırada sıralanır. Sıralanan sayılar soldan itibaren ikişerli olmak üzere eşlenirler. Bu işlem, genetik algoritmaya çeşitlendirme sağlamaktadır. Örneğin, popülasyon sayısı 10 olan bir algoritma için eşleme yapılacak ebeveynler, Şekil 4.8.'deki gibi belirlenebilir. Şekil 4.8.'de görüldüğü gibi ebeveynler sıralanmış rassal sayılara göre artan sırada sıralanmış ve ikili olarak eşleşmiştir. 4. ve 8. ebeveyn, 10. ve 1. ebeveyn, 9. ve 2. ebeveyn, 3. ve 7. ebeveyn ve son olarak da 6. ve 5. ebeveyn eşleşmişlerdir. Eşleşen ebeveynlere çaprazlama operatörü uygulanacaktır.

Rassal sayılar	0.6742	0.7219	0.7259	0.0398	0.9720	0.7680	0.7491	0.0724	0.6843	0.4265
Populasyondaki ebeveynler	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sıralanmış rassal sayılar	0.0398	0.0724	0.4265	0.6742	0.6843	0.7219	0.7259	0.7491	0.7680	0.9720
Eşleşmiş ebeveynler	4	8	10	1	9	2	3	7	6	5

Şekil 4.8. Popülasyondaki ebeveynlerin eşleşmesine örnek gösterim

Rassal anahtar gösterimi, rastgele sayılar içeren bir çözümü kodlamaktadır. Bu değerler, anahtarları sıralamada kullanılmaktadır. Rassal anahtarlar, çözümü temsil eden kromozal kodlamayı kullanarak yeni birey için uygunluk problemini ortadan kaldırmaktadır. Kromozomlar, $[0,1)$ aralığında rassal üretilen gerçek sayıların vektörü olarak temsil edilmektedir. GA, gerçek uzay yerine bu uzay alanını araştırmaktadır.

Rassal anahtar uzayındaki noktalar, değerlendirilmesi için gerçek uzaydaki noktalarla eşlenmektedir. Şekil 4.9., rassal anahtarlar sürecini tasvir etmektedir. Bu nedenle, rassal anahtar yaklaşımı 0-1 ikili kodlamaya (binary encoding) benzememektedir. Anahtar uzayında rastgele sayıların üretilmesi, genetik algoritma ile birlikte rassal arama mantığı kullanılmaktadır. Bu tip bir rassal arama, ikili kodlama sisteminde meydana gelmez. Rassal anahtarların önemli özelliği, çaprazlama ile oluşan tüm yeni bireylerin uygun çözümler olmasıdır (Bean, 1994).



Şekil 4.9. Rassal anahtarlar süreci

Örneğin, 5 işe sahip bir problem ele alınsın. Kromozom uzunluğu, beş olacaktır. Bu nedenle, her bir kromozom için $[0,1)$ arasında rassal beş sayı üretilir. İş sırasına eşleme, rassal sayıların sınıflanmasıyla ve işlerin artan sırada sıralanmasıyla gerçekleştirilmektedir. Eğer elde edilen rassal sayılar (0.46, 0.91, 0.33, 0.75, 0.51) ise, rassal sayıların sıralaması $0.33 < 0.46 < 0.51 < 0.75 < 0.91$ olacağı için kromozom (iş sırası) (3, 1, 5, 4, 2) şeklinde olacaktır (Gonçalves ve Resende, 2013; Huang ve ark., 2012; Lalla-Ruiz ve ark., 2014; Ruiz ve ark., 2015; Xiao ve ark., 2016).

Çaprazlama operatörü, operasyon sıralama vektörü üzerine uygulanmıştır. Operasyonlardaki öncüllük-ardıllık kısıtı nedeniyle rassal anahtarlar gösterimi ile tek nokta çaprazlama gösterimi bu problem için uygun olduğu görülmüştür. Böylece oluşan yeni bireyler için olursuz çözümler ortadan kaldırılmıştır. Şekil 4.10.'da anahtarlar, $[0,1)$ aralığında rassal ondalık sayılardır. Anahtarlar, sadece işler için üretilmiştir. Tek nokta çaprazlama operatörü, rassal anahtarlar kromozom gösterimine uygulanmıştır. Sayısal örnek 2 için rassal anahtarlar gösterimi ile tek nokta çaprazlamaya ilişkin bir gösterim ($l=13, k=11$) Şekil 4.10.'da yer almaktadır.

Anahtarlar	0.5180	0.0327	0.2862	0.8519	0.7690	0.8913	0.4085	0.3429	0.1930	0.9109	0.4656	0.0262	0.6078
Ebeveyn 1	4	3	1	2	4	3	4	3	1	2	2	1	1
Anahtarlar	0.6053	0.1135	0.4337	0.1442	0.9873	0.5478	0.9544	0.7489	0.6803	0.7902	0.9240	0.6390	0.4386
Ebeveyn 2	1	4	2	1	3	2	4	3	3	2	4	1	1
Tek nokta çaprazlama													
Anahtarlar	0.6053	0.1135	0.4337	0.1442	0.9873	0.5478	0.9544	0.7489	0.6803	0.7902	0.9240	0.0262	0.6078
Çocuk 1	1	3	2	1	3	4	1	1	3	2	2	4	4
Anahtarlar	0.5180	0.0327	0.2862	0.8519	0.7690	0.8913	0.4085	0.3429	0.1930	0.9109	0.4656	0.6390	0.4386
Çocuk 2	4	3	2	3	4	1	4	1	1	3	1	2	2

Şekil 4.10. Önerilen kromozom yapısı için rassal anahtarlar ile tek nokta çaprazlama gösterimi

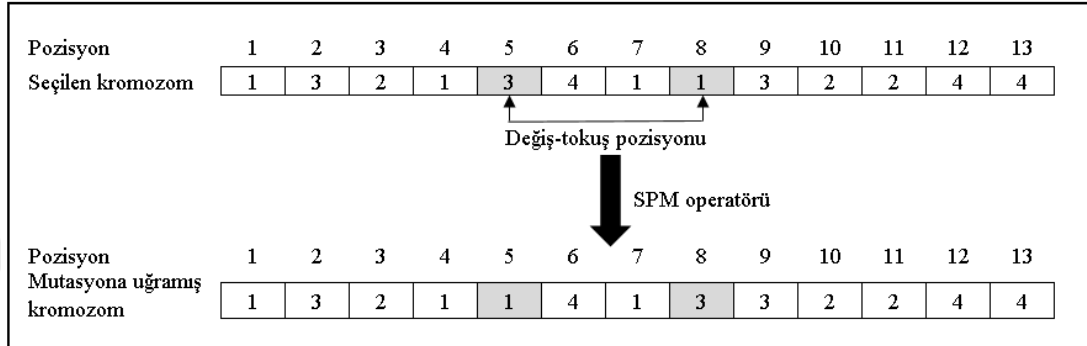
Ebeveynlere çaprazlama operatörü uygulandıktan sonra anahtarlar artan sırada sıralanır. Çocuk 1 kromozomu için iş sırası detaylı bir şekilde ele alınacak olursa 0.0262 değeri en küçük anahtar değeridir ve bu anahtarın kromozomdaki ilgili alel değeri 4'tür. İkinci en küçük anahtar değeri 0.1135'tir ve bu anahtarın da kromozomdaki ilgili alel değeri 3'tür. Bu işlem, rassal anahtar gösterimindeki son anahtara kadar devam eder. Şekil 4.11.'de çocuk 1 kromozom iş sırasının nasıl oluştuğuna dair detaylı bir gösterim verilmiştir.

Sıralanmamış anahtarlar	0.6053	0.1135	0.4337	0.1442	0.9873	0.5478	0.9544	0.7489	0.6803	0.7902	0.9240	0.0262	0.6078
Sıralanmamış genler	4	3	1	2	4	3	4	3	1	2	2	1	1
Sıralanmış anahtarlar	0.0262	0.1135	0.1442	0.4337	0.5478	0.6053	0.6078	0.6803	0.7489	0.7902	0.9240	0.9544	0.9873
İş sırası	1	3	2	1	3	4	1	1	3	2	2	4	4

Şekil 4.11. Çocuk 1 kromozomu iş sırası kodunun çözülmesi için örnek gösterim

Mutasyon operatörü: Mutasyon operatörü, popülasyon çeşitliliğini artırmak ve çözümün belli noktalara takılma olasılığını azaltmak için kullanılan yeni çözümler üretmenin ve keşfetmenin başka bir yoludur. Mutasyon operatörü, seçilen bireylere P_{mu} olasılığı ile uygulanmaktadır. Bununla birlikte, bu işlem oluşturulmuş neslin elverişli durumunu bozabileceği için küçük bir olasılık değeri seçilmelidir (Piroozfard ve ark., 2016).

Mutasyon operatörü olarak değiş-tokuş konumlu mutasyon (Swap Position Mutation-SPM) operatörü kullanıldı. Bu operatöre göre rastgele iki gen seçilmektedir ve rassal üretilen bir olasılık, belirlenen olasılıktan büyükse bu operatör, seçilen bu iki genin pozisyonlarını Şekil 4.12.'de görüldüğü gibi değiştirmektedir.



Şekil 4.12. Değiş-tokuş pozisyon mutasyon operatörüne bir örnek

4.5. Parametre Tasarımı

Parametrelerin ayarlanması meta-sezgisel algoritmaların performansını büyük ölçüde etkilemektedir. Bir genetik algoritmanın etkinliği, erken yakınsamayı önlemek, arama alanındaki çeşitliliği sağlamak, ilgili bölge etrafındaki aramayı yoğunlaştırmak için daha iyi parametre kombinasyonları ile sağlanabilmektedir (Essafi ve ark., 2008). Bu parametrelerin ayarlanması için evrensel bir kural bulunmamaktadır. Bununla birlikte, parametre ayarlama için geleneksel deneme yanılma yöntemlerini kullanmak hem uzun zaman almaktadır hem de çoğu kez en iyi sonucu vermemektedir. Algoritmanın uygun parametrelerini kalibre etmek için literatürde birçok istatistiksel yaklaşım vardır. Bunlardan biri de deney tasarımı yöntemidir. Deney tasarımı klasik yöntemlerin yetersizliği istatistiksel deney tasarımı ile giderilmiştir ve bu tez çalışmasında, test problemleri için uygun parametrelerin belirlenmesinde tam faktöriyel deney tasarımı yöntemi kullanılmıştır. Bu parametre değerlerinin, çözüm kalitesi üzerindeki etkisini ve tüm ana faktörlerin etkilerini ve faktörler arası etkileşimi tam olarak test etmek için tam faktöriyel deney tasarımı kullanılmıştır. Tülomsaş Lokomotif ve Vagon Tesisi'ne uygulanan uygulama çalışmasının uygun parametrelerin belirlenmesinde her bir deney için geçen süre test problemlerine

nispeten daha uzun sürdüğünden tam faktöriyel deney tasarımı yerine Taguchi deney tasarımı kullanılmıştır.

4.5.1. Tam faktöriyel deney tasarımı

Algoritmayı istatistiksel olarak kalibre etmeye yönelik alternatif deneysel araştırmalar arasında en sık kullanılan ve kapsamlı olan yaklaşım, tam faktöriyel deney tasarımıdır. Tam faktöriyel deney tasarımı, faktörlerin ve faktör seviyelerinin olabilecek bütün kombinasyonun tepkisini ölçmektedir. Bu tepkiler, her ana etki ve her etkileşim etkisi hakkında bilgi sağlamak için analiz edilmektedir. Bütün faktör düzeyleri kombinasyonlarının test edilmesi hem çok pahalı hem de zaman alıcı olmasına rağmen bütün faktörlerin ve etkileşimlerinin tepkiler üzerindeki etkilerini tam ve sistematik olarak test edebilmek için tam faktöriyel deney tasarımı kullanılabilir (Hinkelmann ve Kempthorne, 2005).

Faktöriyel deneyler, farklı düzeylerde sayıya sahip faktörleri içerebilmektedir. En az iki ve daha fazla faktörün olduğu ve bu faktörlerin de en az iki ya da daha fazla düzeye sahip olduğu deneylerde deney sayısı, düzeylerin birbirleri ile çarpımı sonucu oluşan kombinasyondur. Örneğin, bir deney modeline göre 4 faktör varsa ve bu faktörlerin de 3 düzeyi varsa her bir faktör ve düzey kombinasyonu denendiği zaman toplam $3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81$ adet deney yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmada, her bir ana faktörü ve faktörler arası etkileşimi görmek için ele alınan test problemlerine tam faktöriyel deney tasarımı uygulanmıştır. Her bir test probleminin işlem süresi çok zaman alıcı olmaması nedeniyle ve tüm faktörler arası etkileşimi görmek için Taguchi deney tasarımı yerine tam faktöriyel deney tasarımı uygulanması tercih edilmiştir. Dört ana faktör ve her bir ana faktörün de üç düzeyi olduğu için toplam $3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81$ adet deney yapılmıştır.

4.5.2. Taguchi deney tasarımı

Taguchi yöntemi, Taguchi tarafından tam faktöriyel deneylere etkin bir alternatif olarak sunulan kısmi faktöriyel bir deneydir. Performans çıktısı üzerine kontrol faktörlerinin etkisini modellemek ve analiz etmek için güçlü bir analiz aracıdır. Tam faktöriyel deneyde dikkate alınan faktörlerin sayısı arttıkça deney sayısı da artmaktadır. Bu nedenle, Taguchi yöntemi, gerekli denemelerin sayısını azaltmak için tüm olası kombinasyonların sadece küçük bir bölümünü dikkate alan bir yöntemdir (Yazdani ve ark., 2015).

Taguchi, uygulamaları kapsayan faktöriyel deneyler için genel tasarımın özel bir setini inşa etmiştir. Tasarımın özel seti, ortogonal dizilerden oluşmaktadır. Ortogonal dizi, dizideki herhangi bir çift sütunun eşit sayıda gösterilecek uygun faktör ve düzeyi temsil eden deneysel matris anlamına gelmektedir. Bu dizilerin kullanımı, ele alınan faktör kümesi için gereken en az deney sayısının belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Deney tasarımında bir ortogonal dizinin kullanılması, tasarımcıların hızlı ve ekonomik bir yolla çok sayıda kontrol edilebilir faktörlerin kalite karakteristiklerinin ve varyasyonlarının ortalaması üzerine etkisinin incelenmesine yardımcı olabilmektedir. Benzer şekilde, deneysel verileri analiz etmede sinyal-gürültü oranlarının kullanılması da en uygun parametrik kombinasyonları kolayca bulabilmeleri için ürünün ya da imalatçının tasarımcılarına yardımcı olabilmektedir. Ortogonal bir dizi, bir deney için gerekli olan toplam serbestlik derecesine göre seçilmektedir (Coşkun ve ark., 2012). İki düzeyli standart ortogonal diziler için genel gösterim, $L_n(2^{n-1})$ şeklindedir. Bu gösterimde, $n=2^k$, deneme sayısıdır; k , birden büyük olan pozitif tamsayıyı temsil etmektedir; 2 sayısı, her bir faktör için düzey sayısını ifade ederken $(n-1)$, ortogonal dizideki sütun sayısını ifade etmektedir (Lin ve Hsieh, 2009).

Taguchi yönteminin en büyük dezavantajı, elde edilen sonuçların sadece göreceli olması ve hangi parametrenin performans karakteristik değeri üzerinde en fazla etkiye sahip olduğunu tam olarak gösterememesidir. Ayrıca ortogonal diziler tüm değişken kombinasyonlarını test etmediğinden, bu yöntem tüm değişkenler arasındaki bütün ilişkilerde kullanılmamalıdır (Eşme, 2009).

Taguchi, bir sürecin performansını (tepkisini) etkileyen faktörleri iki gruba ayırır: kontrol edilemeyen gürültü faktörleri (noise factors-N) ve tasarımcılar tarafından kontrol edilebilen bir meta-sezgisel algoritmanın parametreleri gibi kontrol edilebilir faktörlerdir (signal factors-S). Taguchi yöntemleri, gürültü faktörlerinin etkilerini enküçükmek için kontrol parametrelerinin düzey kombinasyonlarına odaklanmaktadır. Taguchi'nin parametre tasarım aşamasında sırasıyla iç ve dış ortogonal dizilerdeki kontrol ve gürültü faktörlerini düzenlemek için deneysel bir tasarım kullanılmaktadır. Ardından, her bir deney kombinasyonu için sinyal-gürültü oranı (S/N) hesaplanmaktadır. S/N oranlarının hesaplanmasından sonra, optimum kontrol faktörü seviyesi kombinasyonunu belirlemek için bu oranlar analiz edilmektedir (Mohammadi ve ark., 2015; Mousavi ve ark., 2014).

Taguchi, amaç fonksiyonlarını üç gruba ayırır: Birincisi, en küçük en iyidir. Amaç fonksiyonu değerinin enküçükmeye çalışıldığı türdür. İkincisi, hedef değer en iyidir. Amaç fonksiyonunun hedefin etrafında makul bir varyansa sahip olduğu türdür. Üçüncüsü, en büyük en iyidir. Amaç fonksiyonu değerinin en büyükmeye çalışıldığı türdür. Eşitlik 4.1'de, 4.2'de ve 4.3'te, sırasıyla en küçük en iyi, hedef değer en iyi ve en büyük en iyi amaçlarını dikkate alan formülasyona yer verilmiştir (Ross, 1988).

$$\text{En küçük en iyi} : S/N : -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (4.1)$$

$$\text{Hedef değer en iyi} : S/N : -10 \log_{10} V_e \quad (\text{sadece varyans}) \quad (4.2)$$

$$S/N : +10 \log_{10} \left[\frac{V_m - V_e}{n V_e} \right] \quad (\text{ortalama ve varyans})$$

$$\text{En büyük en iyi} : S/N : -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (4.3)$$

Denklemlerde n , bir deneydeki gözlem sayısını, y_i , i . gözlem değerini ve V_m ve V_e 'de sırasıyla ortalama kareler toplamını ve hata kareleri toplamını ifade etmektedir.

Daha büyük bir S/N oranı, daha iyi bir test sonucunu göstermektedir. Dolayısıyla deneylerde en yüksek S/N oranına sahip faktör düzeyi, daha iyi bir performans

göstermektedir. Bu oran, varyans analizini (ANOVA) kullanarak ortalamanın ve varyansın kontrol edilmesini sağlamaktadır. Bu şekilde faktörlerin etkileri istatistiksel olarak ortaya çıkabilmektedir (Candan ve Yazgan, 2014).

Ele alınan tez çalışmasında, amaç fonksiyonu enküçüklenmeye çalışıldığı için en küçük en iyi S/N oranı kullanılmıştır. Lokomotif ve motor fabrikasında uygulanan uygulama probleminde örnek büyüklüğünün oldukça büyük olması ve her bir ardıştırmının (iterasyon) tamamlanma süresinin test problemlerine göre nispeten daha uzun olması, deney sayısını azaltma ihtiyacını doğurmuştur. Bu nedenle, test problemleri için tam faktöriyel deney tasarımında uygulanan 81 deney yerine deney sayısını azaltmak için L_9 ortogonal dizisi kullanıldı. Bir başka deyişle, sonuca ulaşmak için sadece 9 deney yapılması gerekmektedir. Tutarlılık sağlamak için beş kez (yani, $9 \times 5 = 45$ deney) tekrarlandı. Tek amaçlı GA meta-sezgiseli yaklaşımı için uygun parametreleri belirlemede Tablo 4.4.'teki adımlar takip edilmektedir.

Tablo 4.4. Taguchi deney tasarımının adımları

Adımlar	Faaliyetler
1	Performans karakteristiğinin seçilmesi
2	Performans karakteristiğini etkileyen faktörlerin seçilmesi
3	Faktör düzeylerinin seçilmesi
4	Uygun ortogonal dizinin seçilmesi
5	Seçilen performans karakteristiğini etkileyen etkileşimlerin seçilmesi
6	Ortogonal dizilerin her bir sütununa faktörlerin ve onların etkileşimlerinin atanması
7	Deney planına göre testlerin gerçekleştirilmesi
8	Deneysel denemelerin sonuçlarının analiz edilmesi ve yorumlanması
9	Doğrulama deneylerinin yapılması

4.5.3. Genetik algoritma parametrelerinin ve düzeylerinin belirlenmesi

Bu bölümde, literatürden seçilen kırk-iki test problemi için tek amaçlı GA meta-sezgisel yaklaşımının uygun parametrelerini belirlemede tam faktöriyel deney tasarımının uygulama adımları açıklanmaya çalışılmaktadır.

Adım 1: Tek amaçlı GA yaklaşımı için uygun parametreleri belirlemek ve GA yaklaşımının performansını değerlendirmek için literatürden 7 farklı problem seçilmiştir. Problemlerin hücre oluşum yapıları ve operasyon rotaları için literatüre bağlı kalınmıştır. Bununla birlikte, bu tip bir problem yapısına literatürde daha önce

rastlanmadığı için literatürde ele alınan 7 farklı problemde hücre oluşum yapıları dışındaki verileri dikkate alan 42 test problemi veri seti üretilmiştir. En büyük problem, 50 parça, 30 makine, 6 parça ailesi ve hücreden oluşan problem Tang ve arkadaşları tarafından 2010 yılında önerilmiştir (Tang ve ark., 2010). En küçük problem ise 4 parça, 6 makine, 2 parça ailesi ve hücreden oluşmaktadır. Deliktas ve ark. (2017) problemi dışında seçilen problemler işlem, parça aileleri hazırlık süresi, hücrelerarası taşıma süreleri içermediğinden bu veriler (0, 10) aralığında düzgün dağılımla rastgele üretilmiştir. Literatürden elde edilen test problemlerine ait veri setleri detaylı olarak Ek 2’de verilmiştir. Süreler, dakika cinsindendir.

Adım 2: Bu adımda, GA parametreleri belirlenmiştir. Popülasyon büyüklüğü, çaprazlama oranı, mutasyon oranı ve turnuva büyüklüğü, ana faktörler olarak seçilmiştir. Bu çalışmada, test problemlerinin GA parametrelerini eniyilemek üzere tam faktöriyel deney tasarımı kullanılmıştır. Literatürdeki benzer sınıftaki problemlerde kullanılan parametre düzeylerinden hareketle faktörler ve düzeyleri Tablo 4.5.’te sınıflandırılmıştır.

Tablo 4.5. GA yaklaşımı için faktör ve faktörlerin düzeyleri

Faktörler	Düzeyler		
	Düzyey 1	Düzyey 2	Düzyey 3
Popülasyon büyüklüğü	50	100	150
Çaprazlama oranı	0.1	0.5	0.9
Mutasyon oranı	0.05	0.10	0.15
Turnuva büyüklüğü	3	5	7

Adım 3: Faktörlerin etkinliğini araştırmak için, 81 ($3 \times 3 \times 3 \times 3$) farklı denemeye ihtiyaç duyuldu. Buna ek olarak, deneylerin sayısı, çözümlerin doğruluğunu onaylamak için beş kez tekrarlanmıştır. Bu nedenle, bir problem seti için gereken deneme sayısı 405 (81×5)’tir. 42 farklı test probleminin analiz edileceği göz önüne alınırsa gereken toplam denem sayısı 17010 (42×405)’dur.

Adım 4: Her bir faktör düzeyinde tüm test problemlerinin çalıştırılması sonucunda, belirlenen durdurma ölçütü sonrasında elde edilen en iyi çözüm değeri esas alınarak Minitab 17 yazılımıyla varyans analizi yapılmıştır. Varyans analizi (ANOVA), test edilen parça gruplarının ortalama performansları arasındaki farklılığı ortaya koymak

için kullanılan istatistik temelli bir metottur ve deneysel tasarım temelinde varyans analizine dayanmaktadır (Ross, 1988). Konunun anlaşılabilirliğini arttırmak için Tablo 4.6.'da gösterilen test problemleri içinden orta boyutlu test problemi olan “test problemi 21” ele alınmıştır. Bu probleme ait olan varyans analiz tablosu Şekil 4.13.'te, ana etki grafikleri ise Şekil 4.14.'te verilmiştir.

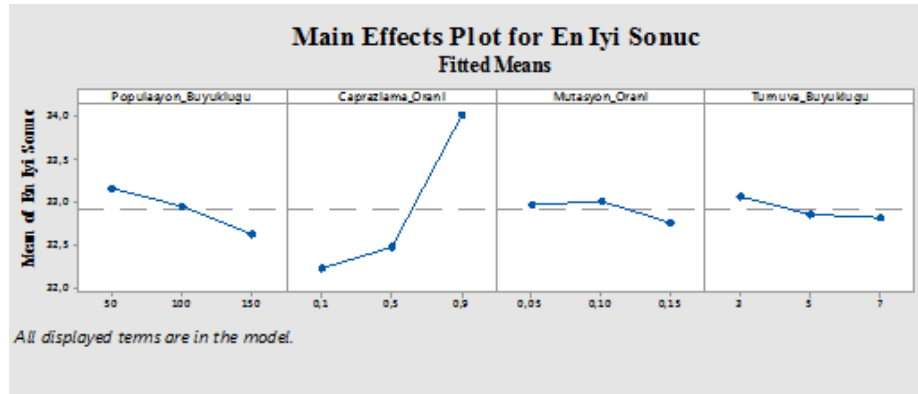
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	16	59,6820	3,7301	25,98	0,000
Linear	8	56,8840	7,1105	49,53	0,000
Populasyon_Buyuklugu	2	4,0365	2,0183	14,06	0,000
Caprazlama_Orani	2	51,0291	25,5146	177,74	0,000
Mutasyon_Orani	2	0,9610	0,4805	3,35	0,041
Turnuva_Buyuklugu	2	0,8573	0,4286	2,99	0,058
2-Way Interactions	8	2,7980	0,3498	2,44	0,023
Populasyon_Buyuklugu*Caprazlama_Orani	4	1,2168	0,3042	2,12	0,089
Caprazlama_Orani*Mutasyon_Orani	4	1,5812	0,3953	2,75	0,035
Error	64	9,1872	0,1435		
Total	80	68,8691			
Model Summary					
	S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)	
	0,378879	86,66%	83,32%	78,63%	

Şekil 4.13. GA parametreleri için varyans analizi sonuç tablosu (test problemi 21)

Şekil 4.13.'teki analiz sonuçlarına göre, popülasyon büyüklüğüne, çaprazlama oranına ve mutasyon oranına ait p değerleri, % 95 güven aralığında 0.05'in altındadır. Bu nedenle, bu faktörler C_{enb} değerini enküçüklemeye kritik faktörler olarak seçilmiştir. Bu durumda, turnuva büyüklüğü ise kritik olmayan faktör olarak belirlenmiştir. Diğer kalan 41 test problemi benzer şekilde çözülmüştür. 42 test problemine ait kritik faktörlerin özeti Tablo 4.6.'da gösterilmiştir. Tablo 4.6.'daki sonuçlara göre, ele alınan 42 test problemindeki popülasyon büyüklüğü, çaprazlama oranı, mutasyon oranı ve turnuva büyüklüğü gibi kritik faktörlerin toplam yüzdesi, sırasıyla %47.73, %36.36, %11.36 ve %4.55'tir.

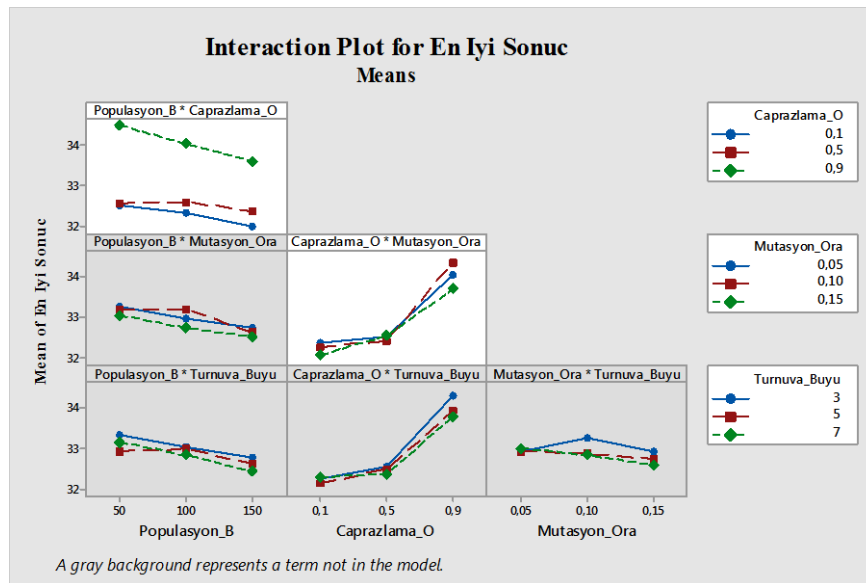
Ana etki, bir faktörün tepki üzerindeki etkisinin derecesini gösteren bir değerdir. Ana etki grafiği, kontrol faktörlerindeki varyasyonla tepki değişkenindeki varyasyonu temsil etmektedir ve faktörlerin düzey ortalamaları arasındaki farkı incelemek için kullanılmaktadır. Ana etki grafiğinde, çizgiler yatay ise faktörle ilgili herhangi bir değişiklik olmadığından faktörün önemsiz olduğu söylenmektedir. Öte yandan,

çizgiler yüksek eğime sahipse faktörün tepkisinin önemli derecede etkilendiği görülmektedir (Mitra ve ark., 2016).



Şekil 4.14. Ortalama için ana etki grafikleri (test problemi 21)

Şekil 4.14.’teki ana etkiler grafiği ile kritik faktörlerin düzeyleri belirlenmiştir. Popülasyon büyüklüğü, çaprazlama oranı, mutasyon oranı kritik faktörleri için en iyi değerler, sırasıyla 3. düzeyde (150), 1. düzeyde (0.1) ve 3. düzeyde (0.15) elde edilmiştir. Kritik olmayan faktör olan turnuva büyüklüğü faktörünün düzey belirleme işlemi için Şekil 4.15.’te yer alan bileşik etki grafiğinden faydalanılmıştır. Şekil 4.15.’e göre turnuva büyüklüğü faktörünün 1. düzeyde (7) seçilmesi ile en iyi sonuca ulaşılabilirliği görülmektedir.



Şekil 4.15. Ortalama için bileşik etki grafikleri (test problemi 21)

Tablo 4.6. Test problemi seti için her bir probleme ait kritik faktörlerin özeti

Düzy	Referanslar	Prob.	P/PA/M/H	PB	ÇO	MO	TB
Küçük	Won ve Kim (1997)	1	4/2/6/2	√			
		2	5/2/6/2	√			
	Tang ve ark. (2010)	3	4/2/7/2	√			
		4	8/2/7/2	√	√		
	Deliktas ve ark. (2017)	5	4/2/6/2	√	√	√	
		6	6/2/6/2	√	√		
		7	6/2/8/2	√	√		
		8	7/3/7/2	√	√	√	
		9	7/2/9/3	√	√		
		10	7/3/8/3	√	√		
		11	8/4/11/4	√	√		
		12	9/3/9/3	√	√		√
Orta	Deliktas ve ark. (2017)	13	10/4/11/4	√	√		√
		14	10/4/13/4	√	√		
	Zeng ve ark. (2015)	15	11/3/11/3	√	√		
	Halat ve Bashirzadeh (2015)	16	10/2/8/2	√			
		17	12/2/8/2	√			
		18	12/4/12/4	√	√		
	Tang ve ark. (2010)	19	12/3/9/3	√	√		
	Deliktas ve ark. (2017)	20	14/4/13/4	√	√	√	
		21	15/4/16/4	√	√	√	
Büyük	Harhalakis ve ark. (1990)	22	20/4/26/4	√	√		
		23	20/5/26/5	√	√	√	√
	Tang ve ark. (2010)	24	22/4/27/4	√			
	Zeng ve ark. (2015)	25	21/4/26/4	√	√	√	
		26	24/4/22/4	√	√		
	Halat ve Bashirzadeh (2015)	27	25/5/33/5	√			
		28	25/5/35/5	√	√		
		29	26/5/38/5	√			
		30	27/5/30/5	√			
		31	27/5/30/5	√	√		
		32	27/5/40/5	√	√		
		33	27/5/40/5	√	√		
		34	27/5/29/5	√	√	√	
	Zeng ve ark. (2015)	35	30/5/26/5	√	√	√	
	Tang ve ark. (2010)	36	30/5/30/5	√	√	√	
		37	35/5/30/5	√	√	√	√
	Arkat ve ark. (2007)	38	30/4/25/4	√	√		
		39	35/5/27/5	√	√		
	Tang ve ark. (2010)	40	40/6/25/6	√	√		
		41	45/6/28/6	√	√		
		42	50/6/30/6	√			
Toplam (%)				47.73	36.36	11.36	4.55

P: Parça, PA: Parça ailesi, M: Makine, H: Hücre

PB: Popülasyon büyüklüğü, ÇO: Çaprazlama oranı, MO: Mutasyon oranı, TB: Turnuva büyüklüğü

Benzer şekilde, kalan 41 test problemlerinin faktör düzeylerinin değerleri hesaplanmış ve 42 test probleminin faktör düzey değerleri Tablo 4.7’de gösterilmiştir.

Tablo 4.7. Test problemleri için faktör düzeylerinin en etkin kombinasyonları

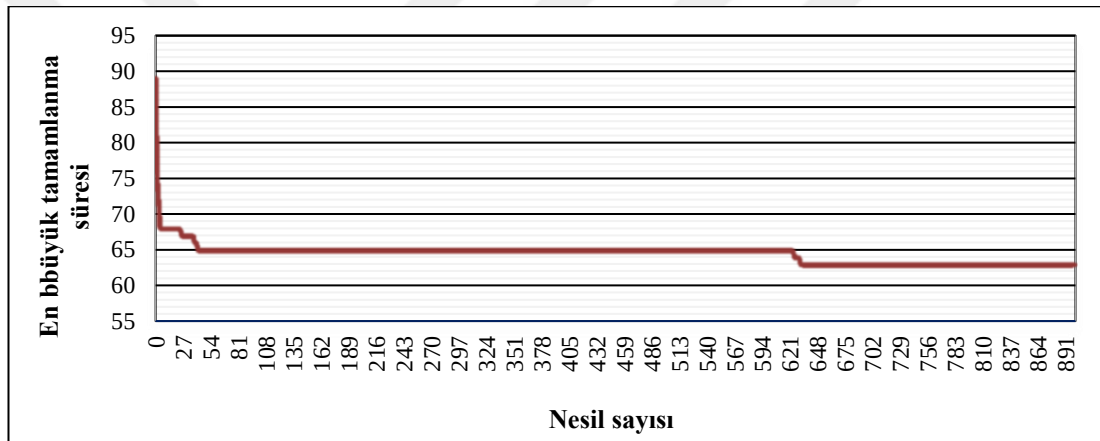
Düzyey	Referanslar	Prob.	P/PA/M/H	PB	ÇO	MO	TB
Küçük	Won ve Kim (1997)	1	4/2/6/2	100	0.5	0.15	5
		2	5/2/6/2	50	0.1	0.10	3
	Tang ve ark. (2010)	3	4/2/7/2	100	0.9	0.05	7
		4	8/2/7/2	150	0.9	0.15	5
	Deliktas ve ark. (2017)	5	4/2/6/2	50	0.5	0.05	3
		6	6/2/6/2	150	0.5	0.05	3
		7	6/2/8/2	50	0.5	0.10	5
		8	7/3/7/2	100	0.5	0.15	7
		9	7/2/9/3	150	0.5	0.05	7
		10	7/3/8/3	150	0.5	0.15	5
		11	8/4/11/4	150	0.1	0.05	3
Orta	Deliktas ve ark. (2017)	12	9/3/9/3	150	0.5	0.05	5
		13	10/4/11/4	150	0.5	0.15	7
		14	10/4/13/4	100	0.5	0.05	7
	Zeng ve ark. (2015)	15	11/3/11/3	100	0.1	0.15	3
		16	10/2/8/2	150	0.1	0.10	3
	Halat ve Bashirzadeh (2015)	17	12/2/8/2	150	0.5	0.15	5
		18	12/4/12/4	100	0.9	0.15	7
		19	12/3/9/3	100	0.5	0.15	3
		20	14/4/13/4	150	0.1	0.15	5
		21	15/4/16/4	150	0.1	0.15	7
		22	20/4/26/4	150	0.1	0.15	5
Büyük	Harhalakis ve ark. (1990)	23	20/5/26/5	150	0.5	0.15	3
		24	22/4/27/4	50	0.9	0.15	7
		25	21/4/26/4	150	0.5	0.15	7
		26	24/4/22/4	150	0.9	0.15	5
		27	25/5/33/5	150	0.1	0.15	5
		28	25/5/35/5	150	0.5	0.05	7
	Halat ve Bashirzadeh (2015)	29	26/5/38/5	100	0.5	0.15	3
		30	27/5/30/5	150	0.9	0.05	5
		31	27/5/30/5	100	0.9	0.10	7
		32	27/5/40/5	150	0.9	0.05	5
		33	27/5/40/5	150	0.9	0.15	7
		34	27/5/29/5	100	0.1	0.15	7
	Zeng ve ark. (2015)	35	30/5/26/5	150	0.5	0.10	3
		36	30/5/30/5	150	0.1	0.15	5
		37	35/5/30/5	100	0.1	0.15	7
	Arkat ve ark. (2007)	38	30/4/25/4	100	0.5	0.05	5
		39	35/5/27/5	100	0.5	0.10	7
		40	40/6/25/6	150	0.1	0.15	5
	Tang ve ark. (2010)	41	45/6/28/6	150	0.9	0.10	7
		42	50/6/30/6	100	0.1	0.15	7

P: Parça, PA: Parça ailesi, M: Makine, H: Hücre

PB: Popülasyon büyüklüğü, ÇO: Çaprazlama oranı, MO: Mutasyon oranı, TB: Turnuva büyüklüğü

Adım 5: Her bir test problemi için ele alınan parametrelerin düzey değerleri belirlendikten sonra tek amaçlı (C_{enb}) GA yaklaşımı kullanılarak her bir test problemi çözülmüştür. GA meta-sezgisel yaklaşımı, Microsoft Visual C# 2013 yazılımı ile kodlanmıştır ve Intel® Core™ i7-2760QM CPU @ 2.40 GHz ve 8.00 GB Ram özelliklerinde bir dizüstü bilgisayar kullanılmıştır.

GA yaklaşımının yakınsama hızını görmek için en büyük test problemi olan test problemi 42'nin sonuçları kullanıldı. Şekil 4.16.'da görüldüğü gibi, amaç fonksiyonu değeri olan C_{enb} dik bir şekilde azalmaktadır ve tek amaçlı GA yaklaşımı en iyi değerine 630 ardıştırmadan sonra ulaşmaktadır. Bu nedenle, en büyük nesil sayısı 900 ile sınırlandırılmıştır. Bulunan bu değer, sadece büyük boyutlu test problemleri için durdurma ölçütü olarak belirlenmiştir. Küçük ve orta boyutlu test problemleri, tek amaçlı matematiksel model (Model 3) kullanılarak Lingo 11.0 yazılımı ile çözülmüştür. Küçük ve orta boyutlu test problemlerinin en iyi (optimal) sonuçları, Lingo 11.0 yazılımı ile bulunabildiği için küçük ve orta boyutlu test problemlerinin durdurma ölçütü olarak optimal değerler dikkate alınmıştır.



Şekil 4.16. Test problemi 42 için GA yakınsama grafiği

Tek amaçlı GA yaklaşımının performansını değerlendirmek için, her bir test problemi, karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama (KTDOP) modelini en iyi olarak çözen Lingo 11.0 ile çözülmüştür. Kırk-iki test problemi için de hem Lingo 11.0 yazılımı hem de GA yaklaşımı 10 kez çalıştırılmıştır. CPU süresi, 10 koşturum sonucu oluşan ortalama süredir. Tablo 4.8.'de görüldüğü gibi, Lingo 11.0 yazılımı, 24 saatlik bir çalışma süresi içinde büyük boyutlu problemler için en iyi çözümü sağlamada başarısız olmuştur. Buna ek olarak, Lingo 11.0 yazılımının büyük boyutlu problemlerin çözümünde bellek alanını aştığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, orta boyutlu test problemleri 16, 17 ve 19 için yerel en iyi çözümü elde edebilmiştir. C_{enb} değeri, GA yaklaşımı ile 10 kez çalıştırılma sonucu bulunan en iyi çözümdür.

Tablo 4.8. GA yaklaşımı ve Lingo 11.0 yazılımı ile çözülen küçük ve orta boyutlu test problemleri için hesaplama sonuçları

Düzye	Referanslar	Prob	P/PA/M/H	Lingo 11.0			GA	
				C _{enb}	CPU süresi ^a (sn)	Durum	C _{enb}	CPU süresi ^a (sn)
Küçük	Won ve Kim (1997)	1	4/2/6/2	28	0.6	Global	28	0.0
		2	5/2/6/2	28	0.6	Global	28	0.0
	Tang ve ark. (2010)	3	4/2/7/2	16	0.5	Global	16	0.0
		4	8/2/7/2	31	7.5	Global	31	0.1
	Deliktas ve ark. (2017)	5	4/2/6/2	27	2.2	Global	27	0.0
		6	6/2/6/2	28	4.4	Global	28	0.5
		7	6/2/8/2	26	2.0	Global	26	0.0
		8	7/3/7/2	37	102.0	Global	37	0.4
		9	7/2/9/3	29	26.2	Global	29	0.7
		10	7/3/8/3	29	22.0	Global	29	0.5
		11	8/4/11/4	29	5.0	Global	29	0.2
Orta	Deliktas ve ark. (2017)	12	9/3/9/3	34	25.0	Global	34	0.3
		13	10/4/11/4	34	26.2	Global	34	0.1
	Zeng ve ark. (2015)	14	10/4/13/4	31	312.0	Global	31	0.3
		15	11/3/11/3	35	214.3	Global	35	0.4
	Halat ve Bashirzadeh (2015)	16	10/2/8/2	47 ^b	>86400	Yerel	47	0.0
		17	12/2/8/2	52 ^b	>86400	Yerel	52	0.1
	Tang ve ark. (2010)	18	12/4/12/4	35	12.0	Global	35	0.1
		19	12/3/9/3	42 ^b	>86400	Yerel	42	0.0
	Deliktas ve ark. (2017)	20	14/4/13/4	35	82.0	Global	35	8.9
		21	15/4/16/4	31	200.0	Global	31	7.5

^a Intel® Core™ i7-2760QM CPU @ 2.40 GHz ve 8.00 GB Ram özelliklerinde bir dizüstü bilgisayar kullanılmıştır. Tüm süreler, on kez çalıştırmanın ortalamasıdır ve CPU süresi saniye cinsindendir.

^b Lingo 11.0, tolerans süresi olan 24 saatlik bir çalışma süresi içinde test problemleri için yerel en iyi çözüm elde edilebilmiştir. (P: Parça, PA: Parça ailesi, M: Makine, H: Hücre)

Tablo 4.9. GA yaklaşımı ile çözülen büyük boyutlu test problemleri için hesaplama sonuçları

Düzye	Referanslar	Prob	P/PA/M/H	C _{enb}	Ortalama	Standart Sapma	CPU süresi ^a (sn)
Büyük	Harhalakis ve ark. (1990)	22	20/4/26/4	30	30.20	0.42	55.6
		23	20/5/26/5	34	34.20	0.42	57.9
	Tang ve ark. (2010)	24	22/4/27/4	62	62.00	0.00	16.3
		25	21/4/26/4	63	63.00	0.00	62.4
	Halat ve Bashirzadeh (2015)	26	24/4/22/4	51	51.00	0.00	67.1
		27	25/5/33/5	67	67.00	0.00	71.2
		28	25/5/35/5	48	48.00	0.00	81.6
		29	26/5/38/5	57	57.00	0.00	47.4
		30	27/5/30/5	67	67.00	0.00	82.6
		31	27/5/30/5	91	91.00	0.00	89.8
		32	27/5/40/5	48	48.00	0.00	99.3
	Zeng ve ark. (2015)	33	27/5/40/5	48	48.00	0.00	99.6
		34	27/5/29/5	33	33.40	0.52	58.5
		35	30/5/26/5	48	48.10	0.32	103.3
	Tang ve ark. (2010)	36	30/5/30/5	47	47.10	0.32	86.4
		37	35/5/30/5	36	37.80	1.03	76.6
	Arkat ve ark. (2007)	38	30/4/25/4	51	51.00	0.00	62.8
	Zeng ve ark. (2015)	39	35/5/27/5	51	51.00	0.00	84.2
	Tang ve ark. (2010)	40	40/6/25/6	59	59.00	0.00	130.4
		41	45/6/28/6	59	59.00	0.00	182.5
		42	50/6/30/6	63	63.00	0.00	133.8

^a Intel® Core™ i7-2760QM CPU @ 2.40 GHz ve 8.00 GB Ram özelliklerinde bir dizüstü bilgisayar kullanılmıştır. Tüm süreler, on kez çalıştırmanın ortalamasıdır ve CPU süresi saniye cinsindendir. (P: Parça, PA: Parça ailesi, M: Makine, H: Hücre)

Küçük ve orta boyutlu test problemleri için KTDOP ile elde edilen en iyi sonuçlara, GA yaklaşımı ile de ulaşılabildiği Tablo 4.8.'den görülebilmektedir. Bununla birlikte, en iyi sonuçlara GA yaklaşımı ile Lingo 11.0 yazılımına göre daha kısa sürede ulaşılabildiği de Tablo 4.8.'den görülmektedir.

Kırk-iki test probleminden büyük boyutlu 21 test probleminin KTDOP modeli ile örnek büyüklüğü nedeniyle en iyi çözümlere ulaşamadığı gözlemlenirken tek amaçlı GA meta-sezgisel yaklaşımı ile en iyi ya da en iyiye yakın sonuca ulaşılabildiği Tablo 4.9.'dan gözlemlenmektedir. Ayrıca, sonuçların her birine ait ortalama ve standart sapma değerlerinin çok fazla değişkenlik göstermediği Tablo 4.9.'dan görülmektedir. Bu da, büyük boyutlu problemler için ele alınan 900 ardışırma değerinin biraz daha azalabileceği anlamına gelmektedir. Bu azaltma işlemi, test problemleri için hesaplanan CPU sürelerinin de azalması olasılığı taşınması demektir. Bu yorumların sonucuna dayanarak, GA yaklaşımının büyük boyutlu problemlere de çözüm oluşturabildiği kanıtlanmıştır.

4.6. Önerilen Genetik Algoritma Yaklaşımının Gerçek Bir Sisteme Uygulanması

Uygulama, Eskişehir Tülomsaş Lokomotif ve Motor Tesisi'ndeki motor fabrikasında gerçekleştirilmiştir. Fabrikada fonksiyonel tesis yerleşimi uygulanması, üretimin talebe göre yapılması, fabrikada yedek parça üretiminin tesisin önemli bir aktivitesini oluşturması ve bu üretimlerin siparişe göre, orta çeşitlilikte ve orta hacimde olması gibi nedenlerden ötürü Tülomsaş'ın hücreyel üretime uygun bir üretim yapısına sahip olduğu görülmektedir.

Fabrikadaki uzmanlarla yapılan görüşmelerde, bir motorun yaklaşık 10.000 parçadan oluştuğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte bu fabrikada üretilen, üretim zorluğu yüksek olan, fabrika içinde dolaşma mesafesi uzun ve kritik olan ürünler/parçalar tespit edilmiş ve bu ürünlere ait işlem süreleri, hazırlık süreleri, taşıma süreleri, parçaların işlem gördüğü makineler ve rota bilgileri ile ilgili dokümanlar elde edilmiştir. Belirlenen bu kritik parçalar, motor fabrikasının en önemli üretim

kalemlerini oluşturmaktadır. Belirlenen bu parçalar ve alt parçaları Tablo 4.10.'da sunulmuştur.

Tablo 4.10. Tülomsaş Motor Fabrikası'nda üretilen kritik ürünler

No	Parça İsmi	Parça Kodu	No	Parça İsmi	Parça Kodu
Silindir başlığı			31	Emme sübabı	P31
1	Külbütör süportu	P1	32	Conta	P32
2	Külbütör itici parçası	P2	33	Egzos sübabı	P33
3	Silindir başlığı kapağı	P3	34	İlk kovan tesbit somunu	P34
4	Silindir başlığı tapası	P4	35	Rondela	P35
5	Uzun saplama	P5	36	İtici uç parçası	P36
6	Kısa saplama	P6	37	Boru-1	P37
7	Saplama	P7	38	Tapa-2	P38
8	Özel somun	P8	39	Küresel baskı civatası	P39
9	Dekompresyon ventil gövdesi	P9	40	İtici çubuk ucu	P40
10	Pim	P10	41	Boru-2	P41
11	Yarıklı pim	P11	42	Silindir başlık contası	P42
12	Çentikli pim	P12	43	Dekompresyon civatası	P43
13	Baga	P13	44	İtici	P44
14	Somun	P14	45	Delikli civata	P45
15	Tapa-1	P15	Yakıt pompa kaplini		
16	Kör tapa-1	P16	46	Erkek dişli	P46
17	Emme sübabı itici	P17	47	İç dişli	P47
18	İtici tij gövdesi	P18	48	Ay flanş	P48
19	İtici muhafazası	P19	49	Kaplin rondelası	P49
20	Sübab itici ayağı	P20	50	Civata	P50
21	Sübab çekirdek kovani	P21	Vantilatör ana tahrik gömleği		
22	Sübab çekirdeği	P22	51	Ara tahrik gömleği gövde	P51
23	Sübab kılavuzu	P23	52	Kilitleme plakası	P52
24	Emniyet tapası	P24	53	Ara tahrik gömleği büyük flanş	P53
25	Özel küresel altlık	P25	54	Ara tahrik gömleği küçük flanş	P54
26	Silindir başlığı	P26	55	Eğri çubuk	P55
27	Enjektör bağlama flanşı	P27	Fleksin kaplin		
28	Makara	P28	56	Sızdırmazlık bagası	P56
29	Emme külbütörü	P29	57	Yatak bagası	P57
30	Egzost külbütörü	P30	58	Primer parça	P58

Motor fabrikasında yapılan çalışma sonucunda fabrikanın makine parkının oldukça geniş olduğu tespit edilmiştir. Belirlenen kritik ürünlere ait makine türleri Tablo 4.11.'de sunulmuştur.

Ele alınan problem için, öncelikle ele alınan parça ve makinelerin parça-makine matrisinin oluşturulması sağlanmıştır. Parça-makine matrisi oluşturulduktan sonra hücrelerarası taşıma süresi, yeniden işlenebilir parçalar ve parça aileleri arası hazırlık süreleri dikkate alınarak parçaların çizelgelenmesi sağlanmaya çalışılmıştır.

Tablo 4.11. Motor fabrikasının makine parkı

No	Makine Adı	Adet	Makine Kodu	No	Makine Adı	Adet	Makine Kodu
1	Freze	6	M1	7	CNC-torna	7	M7
2	Taşlama	7	M2	8	Torna	4	M8
3	Matkap	2	M3	9	Role	1	M9
4	Tesviye	4	M4	10	Pres	1	M10
5	Testere	2	M5	11	Planya	2	M11
6	CNC-freze	4	M6	12	Rovolver	1	M12

Ele alınan uygulama probleminde, 58 parça ve 12 makine seti bulunmaktadır. Makine setlerinde sırasıyla [6, 7, 2, 4, 2, 4, 7, 4, 1, 1, 2, 1] makine olduğu göz önüne alınırsa ele alınan uygulama probleminde toplamda 41 makine bulunmaktadır. Bilgilerin gizliliği nedeniyle, işlem süreleri, teslim süreleri, hazırlık süreleri ve taşıma süreleri dönüştürülmüştür. Süreler, dakika cinsindendir.

Erozan, 2014 yılında Eskişehir Tülomsaş Lokomotif ve Motor Tesisi'nde hücresel üretim sisteminin oluşturulması için bir doktora tezi yürütmüştür (Erozan, 2014). Erozan, hücresel sistemler oluşturulması için çok amaçlı konik skalerleştirmeli genetik algoritma yaklaşımını kullanan bir karar destek sistemi önermiştir. Önerilen karar destek sistemi, hem konik hem de ağırlıklı toplam skalerleştirmeli çok amaçlı bir matematiksel modelin kısıtlarını göz önüne alan hem genetik algoritma yaklaşımı hem de bulanık kümeleme yöntemini içermektedir (Erozan, 2015a, 2015b). Erozan ve ark. (2015a), literatürden tespit ettikleri test problemlerinin sonuçları ile önerdikleri genetik algoritmanın sonuçlarını karşılaştırmış ve oluşturdukları karar destek sisteminin hücre oluşturma probleminde daha iyi olduğunu kanıtlamışlardır. Karar destek sistemi, toplam istisnai (hücrelerin dışında bulunan) parçaları en küçükleme, hücrelerdeki kullanılmayan elemanları (makineleri) en küçükleme ve hücre içi iş yükü varyasyonunu en küçükleme amaçlarını dikkate alarak çalışmaktadır. Yazarlar, oluşturdukları karar destek sistemini Tablo 4.10. ve 4.11.'daki verileri kullanarak Tülomsaş Lokomotif ve Motor Tesisi'ne uygulamıştır.

Bu çalışmada, Erozan ve arkadaşlarının 2014 yılında yapmış oldukları çalışma sonucu oluşan parça-makine matrisi kullanılmıştır. Yani, onların meydana getirmiş oldukları hücre oluşturma yapısı kullanılarak parçaların çizelgelemesi yapılmaya çalışılmıştır.

Tablo 4.12. Uygulama problemi için örnek parça-makine matrisi, işlem süreleri ve rotalama

		Hücre 1					Hücre 2		Hücre 3	Hücre 4				Rotalama
		M6(4) ^a	M9(1)	M10(1)	M11(2)	M12(1)	M5(2)	M7(7)	M2(7)	M1(6)	M3(2)	M4(4)	M8(4)	
PA 1	P38		1.30	2.28			0.15					1.13	3.10/6.15 ^b	5-8-10-8-9-4
	P4		3.00				1.15	9.38		5.25		3.00		5-7-1-9-4
	P5		1.50				1.31	5.06						5-7-9
	P6		1.50				1.31	5.06						5-7-9
	P7		0.56				0.19	3.38						5-7-9
	P9		2.25				1.15	4.15		4.50		4.50		5-7-1-9-4
	P12						0.09						4.15	5-8
	P17						3.38						30.00	5-8
	P19						3.00						7.13	5-8
	P20						0.38						13.50	5-8
PA 2	P21						0.28	11.25						5-7
	P22						0.23	9.35		7.15		3.00		5-7-1-4
	P28						0.47	9.38	23.28					5-7-2
	P31						1.34	18.56	18.21			0.56		5-4-7-2
	P32			1.04			0.21							5-10
	P33						1.34	18.56	18.21			0.56		5-4-7-2
	P34			3.00			0.56							5-10
	P37						0.38						7.15	5-8
	P40						1.15						34.15	5-8
	P42			1.50			0.38					3.38		5-10-4
	P44						1.15	71.28/7.15	11.25/8.28	7.50/14.06		3.00/12.56/2.18/ 1.15/4.15		5-7-4-1-4-2-1-4- 7-4-2-4
	P50		1.50				0.50	9.00				1.50		5-7-4-9
	P53						36.00						54.00	5-8
	P54						24.00						54.00	5-8
PA 3	P55						9.00							5
	P57						36.00						129.00	5-8
	P10	8.44					0.09		1.50			2.06	2.06	5-8-2-6-4
	P23								7.50				46.15/6.00	8-2-8
	P24			1.34										10
	P25						0.38		2.39			3.00/1.13	16.31/3.38 /7.50	5-8-4-8-2-8-4
	P26	180.00						157.15	79.50		77.28	15.00/201.38		7-4-6-3-4-2
	P35								0.56				3.21	8-2

^a Parantez içindeki değerler, belirtilen makineden kaç adet özdeş makine olduğunu göstermektedir. ^b Belirtilen makinenin belirtilen parça için kaç kere kullanıldığını gösterir ve her bir operasyonda sırasıyla kaç dk işlem süresi gerektiğini gösterir. Yeniden işlenebilir parçalar için işlem süreleri tabloda / işareti ile ayrılmıştır. (P: Parça, M: Makine, PA: Parça ailesi)

Tablo 4.12. (Devamı)

		Hücre 1				Hücre 2		Hücre 3	Hücre 4				Rotalama	
		M6(4) ^a	M9(1)	M10(1)	M11(2)	M12(1)	M5(2)	M7(7)	M2(7)	M1(6)	M3(2)	M4(4)	M8(4)	
PA 3	P36						1.15		23.44				32.06/3.38	5-8-2-8
	P43		2.28				0.38		4.50	6.03			7.50	5-8-1-9-2
	P49						3.00		9.00			6.00	9.00	5-8-2-4
	P1								9.00/4.13	5.28/26.25	34.15/27.00	4.50/3.38		1-2-1-2-3-4-3-4
	P2						1.15					3.38	32.09	5-8-3
	P3									72.38	10.13	9.00		4-3-1
	P8						0.14			2.37		0.28/3.23	0.14/4.38/2.48	5-8-1-4-8-4-8
	P11						0.18			3.45		2.04	10.18	5-8-1-4
	P13											2.02/2.48	11.18/8.37	8-4-8-4
	P14						0.19			2.09		0.19/2.53	0.19/3.38/2.09	5-8-1-4-8-4-8
	P15		1.13				0.19			3.38		2.09	7.15	5-8-1-9-4
	P16		1.15				1.15			4.50		2.28	9.00	5-8-1-4-9
	P18					10.13			54.21	37.50	5.06		56.25	12-8-3-2-1
	P27										6.38/7.15		17.28	3-8-3
	P29								37.50	25.15/28.13	30.00/60.00	6.38/6.38/10.13/12.00	22.50/10.15	4-1-8-3-8-1-4-3-4-2-4
PA 4	P30								37.51	25.15/28.14	30.00/60.01	6.38/6.38/10.13/12.01	22.50/10.16	4-1-8-3-8-1-4-3-4-2-4
	P39		1.24				1.24			5.09		1.24	17.53	5-8-1-9-4
	P41						2.25					3.38/2.25	17.28	5-4-8-4
	P45		1.13				0.19			4.15		2.28	8.28/3.38	5-8-1-9-8-4
	P46				60.00		6.00/30.00		216.00	144.00/18.00	18.00	78.00/12.00/6.00	12.00/216.00	5-8-5-8-1-4-11-1-3-4-2-4
	P47						6.00/30.00		216.00	600.00/9.00	18.00/54.00	6.00/72.00	12.00/216.00/120.00/180.00/30.00	5-8-5-8-1-8-3-4-8-2-8-3-4-1
	P48								15.00	9.00	12.00/3.00	6.00	6.00 / 60.00	8-3-8-3-2-1-4
	P51						30.00				240.00		24.00 / 84.00	5-8-3-8
	P52						18.00				4.50	3.00		5-3-4
	P56						108.00		258.00		120.00	30.00	252.00/54.00/54.00	5-8-3-4-8-2-8
	P58						108.00	162.00	516.00	60.00/60.00	54.00	48.00/186.00/30.00	180.00	5-7-3-4-1-4-8-1-2-4

^a Parantez içindeki değerler, belirtilen makineden kaç adet özdeş makine olduğunu göstermektedir.

P: Parça, M: Makine, PA: Parça ailesi

Amaçların ağırlıkları uygulama problemi için sırasıyla (0.65,0.35,0.0) olarak ele alınmıştır. Bu amaçların ağırlıkları, kullanıcının isteklerine göre değişebilmektedir. Erozan ve ark. (2015a, 2015b) tarafından önerdikleri karar destek sistemi kullanılarak parça-makine matrisi oluşturulmuştur. Probleme ait parça-makine matrisi, parça rotaları ve her bir parçaya ait işlem süreleri Tablo 4.12.'de verilmiştir. Bu parça-makine matrisi, farklı boyutlarda da olabilmektedir. Bu yapı, işlem sonucunu da etkileyebilmektedir. Hücrelerarası taşıma süresi ve parça aileleri arası hazırlık süresi Ek 3'te verilmiştir. Süreler, dakika cinsindendir.

Ele alınan uygulama problemi, kesin çözüm yöntemlerinden olan karma tamsayılı doğrusal olmayan matematiksel modelle (Model 3) Lingo 11.0 yazılımının bellek hafızasını aştığı için çözülememiştir. Bu nedenle, gerçek hayat problemine çözüm oluşturması için geliştirilen GA yaklaşımı ile çözüm araştırılmıştır. Ele alınan uygulama probleminde, GA yaklaşımı ile en uygun ya da en uyguna yakın sonuca ulaşma süresi, test problemlerindekine göre nispeten daha uzun olması nedeniyle GA yaklaşımının faktör düzey değerlerinin tespit edilmesinde daha az sayıda deney sayısı avantajından faydalanmak için tam faktöriyel deney tasarımı yerine Taguchi deney tasarımı kullanılmıştır.

Tablo 4.4.'te ele alınan adımlar, yaklaşımın etkinliğini göstermek için izleyen adımlarda anlatılmaya çalışılacaktır.

Adım 1-3: Tablo 4.5.'te daha önce belirlenmiş olan GA parametreleri ve onların düzeyleri uygulama problemi için de dikkate alınmıştır.

Adım 4: Bu parametrelerin etkinliğini araştırmak için, tam faktöriyel deney tasarımı ile toplam 81 deney yapılması gerekecektir. Her bir deneyin doğruluğunu araştırmak için beş kez tekrarlandığı dikkate alınırsa tam faktöriyel deney tasarımı ile toplamda 405 (81×5) deney yapılması gerekecektir. Bununla birlikte, uygulama probleminin çözümünde kullanılacak GA yaklaşımının faktör düzeylerini belirlemek için tüm bu deneylerin tamamlanması önemli miktarda hesaplama zamanı gerektirmektedir. Bu

nedenle, daha az sayıda deney sayısı ile aynı sonuca ulaşmak için Taguchi deney tasarımı tekniği seçilmiştir.

Adım 5-6: Dört faktör ve üç düzeyin her biri için serbestlik derecesi, 8 (4×2)'dir. Bu, üç düzeye sahip her bir faktörün iki serbestlik derecesi olduğu anlamına gelmektedir. Böylece belirli bir seviyedeki serbestlik derecesi bilindiği zaman ortogonal diziyi belirlemek daha kolaydır. Deney sayısı, ortogonal dizideki satır sayısına eşittir. Bu nedenle, deney sayısı serbestlik derecesinden daha büyük veya eşit olmalıdır. Tablo 4.13.'te gösterildiği gibi L_9 ortogonal dizisi uygulama problemi için uygundur. Bu tabloda, satırlar her bir çalışmadaki faktör düzeyini temsil etmektedir ve sütunlar ise her çalıştırmada değiştirilebilen bir faktörün belirli bir düzeyini göstermektedir.

Literatürde, diferansiyel evrim algoritması (Mozdgir, Ashkan ve ark., 2013; Tabrizi ve Ghaderi, 2016), değişken komşuluk arama sezgiseli (Soltani ve Sadjadi, 2010), memetik algoritma (Naderi ve ark., 2011), tavlama benzetimi (Cho ve ark., 2005), yapay sinir ağı (Wang ve Huang, 2008), genetik algoritma (Chen ve Yeh, 2009; Mokhtarinejad ve ark., 2015), parçacık sürü algoritması (Chih ve ark., 2011), tabu arama (Zandieh ve ark., 2009) gibi çalışmalarda algoritmaların parametrelerini optimize etmek için L_9 ortogonal dizilerin yerleşiminin kullanıldığına rastlanabilmektedir.

Tablo 4.13. L_9 ortogonal dizisi ile oluşturulan GA parametreleri kullanılarak C_{enb} değerinin hesaplanması

Deney no	Sütun				Popülasyon büyüklüğü	Çaprazlama oranı (%)	Mutasyon oranı (%)	Turnuva büyüklüğü	Ortalama C_{enb} (dk)	Standart sapma
	1	2	3	4						
1	1	1	1	1	50	0.1	0.05	3	1733.91	24.29
2	1	2	2	2	50	0.5	0.10	5	1722.75	30.31
3	1	3	3	3	50	0.9	0.15	7	1852.29	26.83
4	2	1	2	3	100	0.1	0.10	7	1676.72	12.00
5	2	2	3	1	100	0.5	0.15	3	1709.55	28.57
6	2	3	1	2	100	0.9	0.05	5	1827.77	51.00
7	3	1	3	2	150	0.1	0.15	5	1672.74	3.30
8	3	2	1	3	150	0.5	0.05	7	1674.35	5.54
9	3	3	2	1	150	0.9	0.10	3	1839.07	32.21

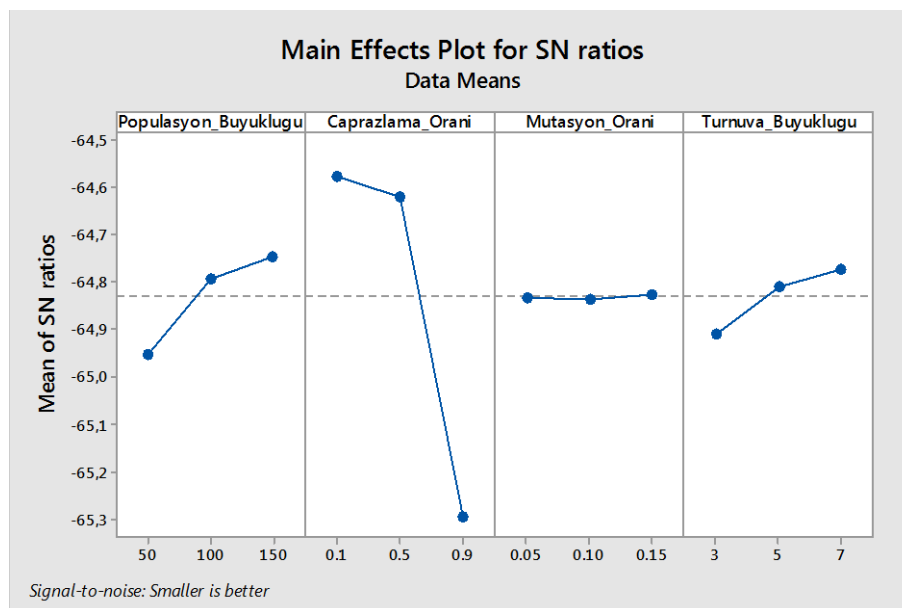
Kritik faktörler ve faktörlerin düzeyleri, “en küçük en iyidir” olarak seçilen sinyal/gürültü oranları (S/N) ve ANOVA sonuçları Minitab 17 yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Eşitlik 4.1, S/N oranının hesaplanmasında kullanılmıştır. Süreç parametrelerinin en iyi düzeyleri en yüksek S/N oranı değerine bağlıdır. Sinyal gürültü oranı sonuçları Tablo 4.14.’te verilmiştir.

Tablo 4.14. S/N oranı ve ANOVA sonuçları

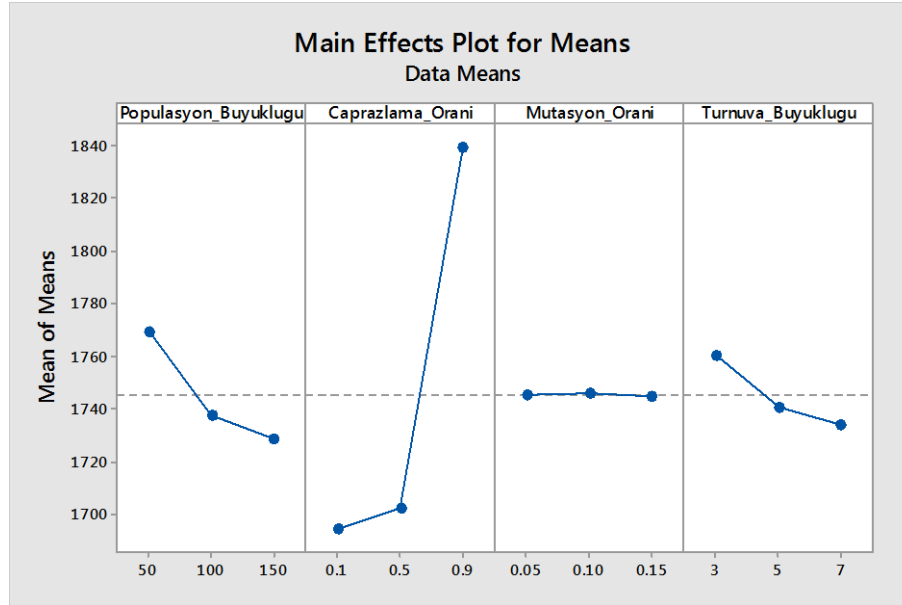
Faktörler	Sinyal/gürültü oranı			Kareler	Faktör	F değeri	P değeri
	Düzye 1	Düzye 2	Düzye 3	Toplamı	etkisi (%)		
PB	-64.95	-64.80	-64.75	2762.5	0.0628	1032.32	0.001
ÇO	-64.58	-64.62	-65.29	40063.2	0.9113	14971.16	0.000
MO	-64.83	-64.84	-64.83	-	-	-	-
TB	-64.91	-64.81	-64.77	1130.8	0.0257	422.55	0.002

PB: Popülasyon büyüklüğü, ÇO: Çaprazlama oranı, MO: Mutasyon oranı, TB: Turnuva büyüklüğü

Tablo 4.14.’teki sonuçlara göre popülasyon büyüklüğü, çaprazlama oranı ve turnuva büyüklüğünün p değerlerinin %95 güven aralığında 0.05’ten daha küçük olması, bu faktörlerin kritik faktör olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, mutasyon oranı kritik olmayan faktördür. Her bir faktöre ait olan düzeyleri belirlemek için Şekil 4.17.’deki S/N oranı için ana etkiler grafiği ve Şekil 4.18.’deki ortalamalar için ana etkiler grafiği incelenmiştir.



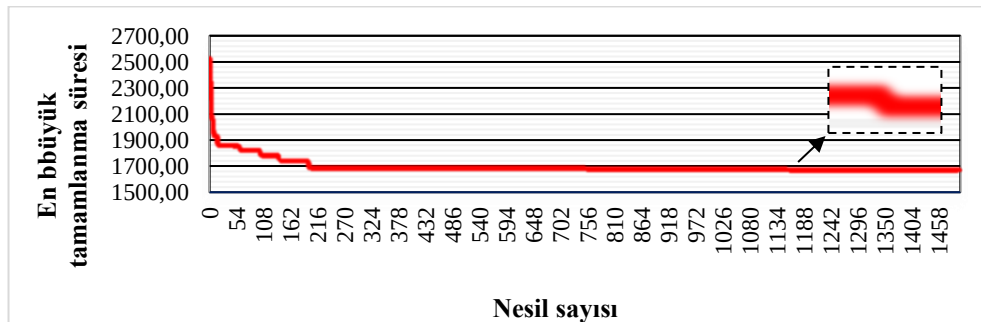
Şekil 4.17. S/N oranı için ana etkiler grafiği



Şekil 4.18. Ortalamalar için ana etkiler grafiği

Uyum fonksiyonunun en iyi olduğu düzeyler, popülasyon büyüklüğünün üçüncü düzeyinde (150), çaprazlama olasılığının birinci düzeyinde (0.1) ve turnuva büyüklüğünü üçüncü düzeyinde (7) olduğu durumda elde edilebilmiştir. Kritik olmayan faktör olan mutasyon oranının en uygun düzeyi, ikinci düzey (0.10) olarak belirlenmiştir.

Uygulama problemi için tek amaçlı GA yaklaşımının yakınsama hızı, Şekil 4.19.'da gösterilmektedir. Şekil 4.19.'da görüldüğü gibi, amaç fonksiyonu değeri olan C_{enb} dik bir şekilde azalmaktadır ve GA yaklaşımının en iyi değerine 1155 ardıştırmadan sonra ulaşıldığı gözlemlenmektedir. Bu nedenle, uygulama problemi için sonlandırma ölçütü en büyük nesil sayısı olarak belirlenmiş ve bu değer, 1500 ile sınırlandırılmıştır.



Şekil 4.19. Uygulama problemi için GA yakınsama grafiği

Uygulama problemi, 269 operasyondan oluşmaktadır. Bu da GA yaklaşımı için kullanılan kromozom yapısının, 269 genden oluşacağı anlamına gelmektedir. Kromozom yapısının çok fazla uzun olması, uygulama probleminin çözümü için kullanılan tek amaçlı GA yaklaşımının test problemlerine nispeten daha uzun çalışma süresinde sonuca ulaşmasına neden olmuştur. GA yaklaşımının tek amaç fonksiyonu (C_{enb}) dikkate alınarak çözülmesinden sonra elde edilen sonuçlar Tablo 4.15.'te sunulmaktadır. Tablo 4.15'te elde edilen sonuç, farklı parça-makine matrisi yapısına göre değişkenlik gösterebilir.

Tablo 4.15. Uygulama problemi için hesaplama sonuçları

Problem	P/PA/M/H	C_{enb}	Ortalama	Standart Sapma	CPU süresi ^a (sn)
Uygulama problemi	58/4/41/4	1671.26	1671.26	0.00	715.6

^a Intel® Core™ i7-2760QM CPU @ 2.40 GHz ve 8.00 GB Ram özelliklerinde bir dizüstü bilgisayar kullanılmıştır. Tüm süreler, on kez çalıştırmanın ortalamasıdır ve CPU süresi saniye cinsindendir. (P: Parça, PA: Parça ailesi, M: Makine, H: Hücre)

C_{enb} değeri, GA yaklaşımı ile 10 kez çalıştırılma sonucu bulunan en iyi çözümdür. CPU süresi, 10 koşurum sonucu oluşan ortalama süredir. Tablo 4.15.'te uygulama problemi için GA yaklaşımı ile bulunan en iyi veya en iyiye yakın sonuca ait operasyonların sıralaması Şekil 4.20.'de gösterilmiştir. Şekil 4.20.'de görüldüğü gibi, iş sayıları ve operasyon sayıları çift hanelere ulaştığı için anlaşılabilirliği kolaylaştırmak amacıyla belirtilen operasyonda bazı sayılar koyu kırmızı renkle gösterilmiştir. Bu, belirtilen işin kaçınıcı operasyonu olduğunu göstermektedir. Örneğin, O_{112} , 11. işin 2. operasyonu anlamını taşımaktadır. Buna ek olarak, her bir makineye atanan operasyon sıralaması ve her bir parçaya ait operasyonların makinelerde sıralanması sırasıyla Tablo 4.16. ve 4.17.'de gösterilmiştir.

Her bir makinedeki operasyonların en uygun sıralaması, belirtilen makinedeki operasyonların toplam işlem süresi, belirtilen makinede varsa parça aileleri arası hazırlık süresi (PAHS) ve bu sürelerin toplamından oluşan toplam süre Tablo 4.16.'da görülmektedir. Buna ek olarak, GA yaklaşımının çözümünden sonra, her bir makinedeki tamamlanma süreleri de Tablo 4.16.'da verilmiştir. Tablodan hangi makinelerin daha yoğun kullanıldığı hangi makinelerin de hiç kullanılmadığı görülebilmektedir. Buna göre, $M6^1$, $M6^2$, $M7^2$, $M7^3$ ve $M11^1$ makinelerinin hiç kullanılmadığı tablodan anlaşılmaktadır.

Pozisyon i :	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	29	30	31			
Operasyon sırası $v_1(i)$:	47	30	47	8	58	16	10	29	47	45	8	1	1	25	24	46	18	56	19	45	29	18	30	30	42	9	58	4	47	25	25			
Belirtilen operasyon:	O ₄₇₁	O ₃₀₁	O ₄₇₂	O ₈₁	O ₅₈₁	O ₁₆₁	O ₁₀₁	O ₂₉₁	O ₄₇₃	O ₄₅₁	O ₈₂	O ₁₁	O ₁₂	O ₂₅₁	O ₂₄₁	O ₄₆₁	O ₁₈₁	O ₅₆₁	O ₁₉₁	O ₄₅₂	O ₂₉₂	O ₁₈₂	O ₃₀₂	O ₃₀₃	O ₄₂₁	O ₉₁	O ₅₈₂	O ₄₁	O ₄₇₄	O ₂₅₂	O ₂₅₃			
32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66
26	9	44	45	39	46	48	14	31	39	1	5	29	18	48	36	6	56	44	58	46	49	45	15	44	58	57	16	44	1	37	44	35	25	1
O ₂₆₁	O ₉₂	O ₄₄₁	O ₄₅₃	O ₃₉₁	O ₄₆₂	O ₄₈₁	O ₁₄₁	O ₃₁₁	O ₃₉₂	O ₁₃	O ₅₁	O ₂₉₃	O ₁₈₃	O ₄₈₂	O ₃₆₁	O ₆₁	O ₅₆₂	O ₄₄₂	O ₅₈₃	O ₄₆₃	O ₄₉₁	O ₄₅₄	O ₁₅₁	O ₄₄₃	O ₅₈₄	O ₅₇₁	O ₁₆₂	O ₄₄₄	O ₁₄	O ₃₇₁	O ₄₄₅	O ₃₅₁	O ₂₅₄	O ₁₅
67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101
47	16	22	21	39	29	45	46	49	1	29	14	42	38	8	48	57	40	43	10	54	51	23	26	10	7	56	58	14	41	1	43	43	43	13
O ₄₇₅	O ₁₆₃	O ₂₂₁	O ₂₁₁	O ₃₉₃	O ₂₉₄	O ₄₅₅	O ₄₆₄	O ₄₉₂	O ₁₆	O ₂₉₅	O ₁₄₂	O ₄₂₂	O ₃₈₁	O ₈₃	O ₄₈₃	O ₅₇₂	O ₄₀₁	O ₄₃₁	O ₁₀₂	O ₅₄₁	O ₅₁₁	O ₂₃₁	O ₂₆₂	O ₁₀₃	O ₇₁	O ₅₆₃	O ₅₈₅	O ₁₄₃	O ₄₁₁	O ₁₇	O ₄₃₂	O ₄₃₃	O ₄₃₄	O ₁₃₁
102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136
29	51	18	12	58	30	9	14	23	52	58	15	47	56	17	42	46	33	15	27	44	45	8	34	11	14	43	31	39	44	16	26	50	26	50
O ₂₉₆	O ₅₁₂	O ₁₈₄	O ₁₂₁	O ₅₈₆	O ₃₀₄	O ₉₃	O ₁₄₄	O ₂₃₂	O ₅₂₁	O ₅₈₇	O ₁₅₂	O ₄₇₆	O ₅₆₄	O ₁₇₁	O ₄₂₃	O ₄₆₅	O ₃₃₁	O ₁₅₃	O ₂₇₁	O ₄₄₆	O ₄₅₆	O ₈₄	O ₃₄₁	O ₁₁₁	O ₁₄₅	O ₄₃₅	O ₃₁₂	O ₃₉₄	O ₄₄₇	O ₁₆₄	O ₂₆₃	O ₅₀₁	O ₂₆₄	O ₅₀₂
137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171
22	44	30	14	44	41	30	11	46	58	56	13	38	48	29	39	19	40	56	47	4	30	4	47	46	33	37	41	27	26	46	11	33	15	47
O ₂₂₂	O ₄₄₈	O ₃₀₅	O ₁₄₆	O ₄₄₉	O ₄₁₂	O ₃₀₆	O ₁₁₂	O ₄₆₆	O ₅₈₈	O ₅₆₅	O ₁₃₂	O ₃₈₂	O ₄₈₄	O ₂₉₇	O ₃₉₅	O ₁₉₂	O ₄₀₂	O ₅₆₆	O ₄₇₇	O ₄₂	O ₃₀₇	O ₄₃	O ₄₇₈	O ₄₆₇	O ₃₃₂	O ₃₇₂	O ₄₁₃	O ₂₇₂	O ₂₆₅	O ₄₆₈	O ₁₁₃	O ₃₃₃	O ₁₅₄	O ₄₇₉
172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206
17	38	51	27	58	21	9	30	55	5	32	3	53	38	14	51	10	38	36	30	47	8	52	50	48	47	49	6	22	4	4	12	36	48	29
O ₁₇₂	O ₃₈₃	O ₅₁₃	O ₂₇₃	O ₅₈₉	O ₂₁₂	O ₉₄	O ₃₀₈	O ₅₅₁	O ₅₂	O ₃₂₁	O ₃₁	O ₅₃₁	O ₃₈₄	O ₁₄₇	O ₅₁₄	O ₁₀₄	O ₃₈₅	O ₃₆₂	O ₃₀₉	O ₄₇₁₀	O ₈₅	O ₅₂₂	O ₅₀₃	O ₄₈₅	O ₄₇₁₁	O ₄₉₃	O ₆₂	O ₂₂₃	O ₄₃	O ₄₅	O ₁₂₂	O ₃₆₃	O ₄₈₆	O ₂₉₈
207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241
20	29	8	30	25	46	44	2	28	3	44	53	2	22	9	38	8	31	31	47	46	49	13	13	48	26	7	7	6	30	2	28	32	35	18
O ₂₀₁	O ₂₉₉	O ₈₆	O ₃₀₁₀	O ₂₅₅	O ₄₆₉	O ₄₄₁₀	O ₂₁	O ₂₈₁	O ₃₂	O ₄₄₁₁	O ₅₃₂	O ₂₂	O ₂₂₄	O ₉₅	O ₃₈₆	O ₈₇	O ₅₁₃	O ₃₁₄	O ₄₇₁₂	O ₄₆₁₀	O ₄₉₄	O ₁₃₃	O ₁₃₄	O ₄₈₇	O ₂₆₆	O ₇₂	O ₇₃	O ₆₃	O ₃₀₁₁	O ₂₃	O ₂₈₂	O ₃₂₂	O ₃₅₂	O ₁₈₅
242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269							
41	47	25	15	56	54	29	58	34	29	20	36	47	25	28	33	1	3	46	46	50	23	16	10	52	11	5	44							
O ₄₁₄	O ₄₇₁₃	O ₂₅₆	O ₁₅₅	O ₅₆₇	O ₅₄₂	O ₂₉₁₀	O ₅₈₁₀	O ₃₄₂	O ₂₉₁₁	O ₂₀₂	O ₃₆₄	O ₄₇₁₄	O ₂₅₇	O ₂₈₃	O ₃₃₄	O ₁₈	O ₃₃	O ₄₆₁₁	O ₄₆₁₂	O ₅₀₄	O ₂₃₃	O ₁₆₅	O ₁₀₅	O ₅₂₃	O ₁₁₄	O ₅₃	O ₄₄₁₂							

Şekil 4.20. Uygulama probleminin önerilen GA ile çözüldükten sonra bulunan en iyi C_{enb} değeri için operasyon sıralama vektörünün gösterimi

Tablo 4.16. Uygulama problemi için her bir makineye ait operasyon sırası ve makinelerdeki en son operasyonun tamamlanma süresi

MS	Operasyonların makinelerde sıralanması	TOPS	PAHS	TS	MTS	MS	Operasyonların makinelerde sıralanması	TOPS	PAHS	TS	MTS
M1 ¹	O ₂₉₂ > O ₁₅₃	28,53	0,00	28,53	557,28	M6 ¹		0,00	0,00	0,00	0,00
M1 ²	O ₄₅₃ > O ₈₃ > O ₅₈₅ > O ₄₃₃ > O ₅₈₈ > O ₄₈₆	141,55	86,15	227,70	900,76	M6 ²		0,00	0,00	0,00	0,00
M1 ³	O ₂₉₆ > O ₉₃ > O ₄₆₅ > O ₄₃ > O ₂₂₃ > O ₃₃	261,41	161,60	423,01	1209,42	M6 ³	O ₁₀₄	8,44	0,00	8,44	280,34
M1 ⁴	O ₁₃ > O ₁₈₅	63,75	0,00	63,75	228,91	M6 ⁴	O ₂₆₃	180,00	0,00	180,00	725,11
M1 ⁵	O ₃₀₂ > O ₄₇₅ > O ₁₆₃ > O ₄₄₇ > O ₃₀₆ > O ₄₆₈ > O ₄₇₁₄	699,25	80,80	779,65	1671,26						
M1 ⁶	O ₁₁ > O ₄₄₄ > O ₃₉₃ > O ₁₄₃ > O ₁₁₃	23,41	80,80	104,21	1055,38	M7 ¹	O ₂₆₁ > O ₉₂ > O ₄₄₂ > O ₂₁₂	244,23	58,45	302,28	427,24
						M7 ²		0,00	0,00	0,00	0,00
M2 ¹	O ₅₈₉	516,00	0,00	516,00	1427,01	M7 ³		0,00	0,00	0,00	0,00
M2 ²	O ₁₈₄ > O ₄₈₅ > O ₄₉₃	78,21	25,45	103,66	497,86	M7 ⁴	O ₄₂ > O ₃₁₃ > O ₂₈₂	37,32	0,00	37,32	876,27
M2 ³	O ₁₂ > O ₂₃₂ > O ₄₇₁₀ > O ₃₀₁₀ > O ₄₄₁₁ > O ₃₁₄	296,50	116,03	412,53	1600,33	M7 ⁵	O ₂₂₂ > O ₃₃₃ > O ₇₂	31,29	0,00	31,29	1200,65
M2 ⁴	O ₅₆₆ > O ₂₅₅ > O ₂₉₁₀ > O ₄₆₁₁	514,29	60,70	574,59	1560,46	M7 ⁶	O ₅₈₂ > O ₆₂ > O ₄₄₉	174,21	55,33	229,54	336,53
M2 ⁵	O ₁₄ > O ₄₄₆ > O ₃₅₂ > O ₂₈₃	39,22	159,23	198,45	909,75	M7 ⁷	O ₅₀₂ > O ₅₂	14,06	25,47	39,53	1025,18
M2 ⁶	O ₄₃₅ > O ₃₆₃ > O ₂₆₆	107,44	0,00	107,44	1425,45						
M2 ⁷	O ₁₀₃ > O ₃₃₄	20,11	58,45	78,16	1225,68	M8 ¹	O ₄₅₂ > O ₂₅₂ > O ₃₉₂ > O ₅₆₂ > O ₄₅₅ > O ₂₉₅ > O ₁₄₂ > O ₁₃₁ > O ₅₁₂ > O ₃₀₈ > O ₄₀₂ > O ₃₇₂ > O ₄₇₉ > O ₃₆₂ > O ₅₃₂ > O ₂₂ > O ₈₇ > O ₃₆₄	698,49	276,32	974,81	1504,58
M3 ¹	O ₁₈₃ > O ₂₉₄ > O ₂₇₁ > O ₄₈₄ > O ₄₇₇ > O ₂₇₃ > O ₃₀₈ > O ₃₂ > O ₂₃	143,20	0,00	143,20	1476,65	M8 ²	O ₃₀₃ > O ₄₇₄ > O ₁₆₂ > O ₄₆₄ > O ₁₅₂ > O ₄₇₆ > O ₁₁₂ > O ₄₁₃ > O ₃₈₄ > O ₈₅ > O ₂₅₆ > O ₅₆₇ > O ₂₃₃	696,14	214,91	911,05	1362,15
M3 ²	O ₄₈₂ > O ₅₈₃ > O ₁₅ > O ₅₆₃ > O ₁₇ > O ₃₀₄ > O ₂₆₄ > O ₅₁₃ > O ₅₂₂ > O ₂₉₈ > O ₄₆₉ > O ₄₇₁₂	731,33	25,45	756,38	1590,26	M8 ³	O ₄₇₂ > O ₈₂ > O ₄₆₂ > O ₂₉₃ > O ₃₅₁ > O ₂₅₄ > O ₁₀₂ > O ₅₈₇ > O ₃₈₂ > O ₁₉₂ > O ₂₇₂ > O ₁₄₇ > O ₅₁₄ > O ₁₂₂ > O ₁₃₃ > O ₅₄₂	523,41	337,01	860,42	1499,73
M4 ¹	O ₂₉₁ > O ₂₅₃ > O ₁₆₄ > O ₄₁₂ > O ₁₃₂ > O ₂₆₅ > O ₅₀₃ > O ₈₆ > O ₂₂₄ > O ₃₈₆ > O ₄₈₇ > O ₁₈ > O ₄₆₁₂	243,08	350,05	592,73	1591,72	M8 ⁴	O ₁₈₂ > O ₄₈₁ > O ₄₉₂ > O ₄₈₃ > O ₅₇₂ > O ₂₃₁ > O ₄₃₂ > O ₁₄₅ > O ₅₆₅ > O ₁₇₂ > O ₄₇₁₁ > O ₂₀₂	445,18	332,86	777,64	1605,09
M4 ²	O ₃₀₁ > O ₄₄₃ > O ₅₈₆ > O ₁₄₄ > O ₄₂₃ > O ₃₁₂ > O ₃₉₈ > O ₃₀₇ > O ₄₇₈ > O ₃₁ > O ₃₀₉ > O ₄₉₄ > O ₅₈₁₀ > O ₁₀₅ > O ₁₁₄	272,37	283,00	555,37	1547,07						
M4 ³	O ₅₈₄ > O ₁₆ > O ₅₆₄ > O ₄₄₈ > O ₄₆₆ > O ₂₉₇ > O ₃₃₂ > O ₉₅ > O ₄₆₁₀ > O ₄₁₄ > O ₄₇₁₃ > O ₁₅₅ > O ₅₂₃	265,46	161,60	427,06	1667,35	M9	O ₄₅₄ > O ₄₃₄ > O ₃₉₄ > O ₁₅₄ > O ₉₄ > O ₃₈₅ > O ₄₄ > O ₇₃ > O ₆₃ > O ₅₀₄ > O ₁₆₅ > O ₅₃	19,19	307,63	326,42	1329,97
M4 ⁴	O ₄₄₅ > O ₂₆₂ > O ₄₅₆ > O ₈₄ > O ₁₄₆ > O ₄₅ > O ₂₉₉ > O ₄₄₁₀ > O ₁₃₄ > O ₃₀₁₁ > O ₂₉₁₁ > O ₂₅₇ > O ₄₄₁₂	79,10	381,53	460,23	1656,96	M10	O ₂₄₁ > O ₄₂₂ > O ₃₈₃ > O ₃₂₂ > O ₃₄₂	9,56	169,25	178,41	980,20
M5 ¹	O ₄₇₁ > O ₈₁ > O ₅₈₁ > O ₁₆₁ > O ₁₀₁ > O ₅₆₁ > O ₉₁ > O ₃₉₁ > O ₁₄₁ > O ₃₆₁ > O ₅₇₁ > O ₃₇₁ > O ₄₀₁ > O ₄₃₁ > O ₅₄₁ > O ₅₁₁ > O ₇₁ > O ₁₂₁ > O ₅₂₁ > O ₃₃₁ > O ₅₀₁ > O ₅₃₁ > O ₂₀₁ > O ₂₈₁	376,39	490,90	866,89	866,89	M11 ¹		0,00	0,00	0,00	0,00
M5 ²	O ₄₇₃ > O ₄₅₁ > O ₂₅₁ > O ₄₆₁ > O ₁₉₁ > O ₄₂₁ > O ₄₁ > O ₄₄₁ > O ₃₁₁ > O ₅₁ > O ₆₁ > O ₄₆₃ > O ₄₉₁ > O ₁₅₁ > O ₂₂₁ > O ₂₁₁ > O ₃₈₁ > O ₄₁₁ > O ₁₇₁ > O ₃₄₁ > O ₁₁₁ > O ₅₅₁ > O ₃₂₁ > O ₂₁	97,19	563,99	660,78	695,22	M11 ²	O ₄₆₇	60,00	0,00	60,00	1185,60
						M12	O ₁₈₁	10,13	0,00	10,13	10,13

MS: Makine seti, TOPS: Toplam operasyon süresi (dakika cinsindendir), PAHS: Parça ailesi arası hazırlık süresi (dakika cinsindendir), TS: Toplam süre (dakika cinsindendir), MTS: Makine tamamlanma süresi (dakika cinsindendir)

Tablo 4.17. Uygulama problemi için her bir parçaya ait makine sırası ve parçaların en son operasyonun tamamlanma süresi

Parça	Makinelerin sıralanması	TOPS	HTS	TS	PTS	Parça Makinelerin sıralanması	TOPS	HTS	TS	PTS	
P1	M1 ⁶ > M2 ³ > M1 ⁴ > M2 ⁵ > M3 ² > M4 ³ > M3 ² > M4 ¹	113,69	89,02	202,71	1443,1	P30	M4 ² > M1 ⁵ > M8 ² > M3 ² > M8 ¹ > M1 ⁵ > M4 ² > M3 ¹ > M4 ² > M2 ³ > M4 ⁴	248,37	44,51	292,88	1567,78
P2	M5 ² > M8 ¹ > M3 ¹	36,62	21,30	57,92	1476,65	P31	M5 ² > M4 ² > M7 ⁴ > M2 ³	38,67	46,65	85,32	1600,33
P3	M4 ² > M3 ¹ > M1 ³	91,51	0,00	91,51	1209,42	P32	M5 ² > M10	1,25	25,50	26,75	977,2
P4	M5 ² > M7 ⁴ > M1 ³ > M9 > M4 ⁴	21,78	25,50	47,28	1242,93	P33	M5 ¹ > M4 ³ > M7 ⁵ > M2 ⁷	38,67	46,65	85,32	1225,68
P5	M5 ² > M7 ⁷ > M9	7,87	25,50	33,37	1329,97	P34	M5 ² > M10	3,56	25,50	29,06	980,2
P6	M5 ² > M7 ⁶ > M9	7,87	25,50	33,37	1228,21	P35	M8 ³ > M2 ⁵	3,77	19,25	23,02	536,86
P7	M5 ¹ > M7 ⁵ > M9	4,13	25,50	29,63	1226,71	P36	M5 ¹ > M8 ¹ > M2 ⁶ > M8 ¹	60,03	65,81	125,84	1504,58
P8	M5 ¹ > M8 ³ > M1 ² > M4 ⁴ > M8 ² > M4 ¹ > M8 ¹	13,02	21,30	34,32	1475,75	P37	M5 ¹ > M8 ¹	7,52	21,30	28,82	941,89
P9	M5 ¹ > M7 ¹ > M1 ³ > M9 > M4 ³	16,55	66,86	83,41	1168,06	P38	M5 ² > M8 ³ > M10 > M8 ² > M9 > M4 ¹	14,11	112,42	126,53	1384,22
P10	M5 ¹ > M8 ³ > M2 ⁷ > M6 ³ > M4 ²	14,15	71,33	85,48	1509,78	P39	M5 ¹ > M8 ¹ > M1 ⁶ > M9 > M4 ²	26,34	46,65	72,99	829,51
P11	M5 ² > M8 ² > M1 ⁶ > M4 ²	15,85	21,30	37,15	1547,07	P40	M5 ¹ > M8 ¹	35,30	21,30	56,60	934,74
P12	M5 ¹ > M8 ³	4,24	21,30	25,54	1356,56	P41	M5 ² > M4 ¹ > M8 ² > M4 ³	25,16	21,30	46,46	1309,83
P13	M8 ¹ > M4 ¹ > M8 ³ > M4 ⁴	24,05	0,00	24,05	1392,88	P42	M5 ² > M10 > M4 ²	5,26	46,75	52,01	732,81
P14	M5 ¹ > M8 ¹ > M1 ⁶ > M4 ² > M8 ⁴ > M4 ⁴ > M8 ³	10,56	21,30	31,86	1001,54	P43	M5 ¹ > M8 ⁴ > M1 ² > M9 > M2 ⁶	20,69	63,80	84,49	793,22
P15	M5 ² > M8 ² > M1 ¹ > M9 > M4 ³	13,94	66,86	80,80	1664,35	P44	M5 ² > M7 ¹ > M4 ² > M1 ⁶ > M4 ⁴ > M2 ⁵ > M1 ⁵ > M4 ³ > M7 ⁶ > M4 ⁴ > M2 ³ > M4 ⁴	143,71	146,77	290,48	1656,96
P16	M5 ¹ > M8 ² > M1 ⁵ > M4 ¹ > M9	18,08	45,61	63,69	1273,14	P45	M5 ² > M8 ¹ > M1 ² > M9 > M8 ¹ > M4 ⁴	17,13	66,86	83,99	663,76
P17	M5 ² > M8 ⁴	33,38	21,30	54,68	947,43	P46	M5 ² > M8 ³ > M5 ² > M8 ² > M1 ³ > M4 ³ > M11 ² > M1 ⁵ > M3 ² > M4 ³ > M2 ⁴ > M4 ¹	810,00	147,82	957,82	1591,72
P18	M12 > M8 ⁴ > M3 ¹ > M2 ² > M1 ⁴	163,15	65,76	228,91	228,91	P47	M5 ¹ > M8 ³ > M5 ² > M8 ² > M1 ⁵ > M8 ² > M3 ¹ > M4 ² > M8 ¹ > M2 ³ > M8 ⁴ > M3 ² > M4 ³ > M1 ⁵	1569,00	102,26	1671,26	1671,26
P19	M5 ² > M8 ³	10,13	21,30	31,43	956,7	P48	M8 ⁴ > M3 ² > M8 ⁴ > M3 ¹ > M2 ² > M1 ² > M4 ¹	111,00	44,51	155,51	1439,72
P20	M5 ¹ > M8 ⁴	13,88	21,30	35,18	1605,09	P49	M5 ² > M8 ⁴ > M2 ² > M4 ²	27,00	65,81	92,81	1168,49
P21	M5 ² > M7 ¹	11,53	0,00	11,53	427,24	P50	M5 ¹ > M7 ⁷ > M4 ¹ > M9	12,50	45,61	58,11	1246,52
P22	M5 ² > M7 ⁵ > M1 ³ > M4 ¹	19,73	21,30	41,03	1307,74	P51	M5 ¹ > M8 ¹ > M3 ² > M8 ³	378,00	21,30	399,30	1297,08
P23	M8 ⁴ > M2 ³ > M8 ²	59,65	44,51	104,16	1362,15	P52	M5 ¹ > M3 ² > M4 ³	25,50	21,30	46,80	1667,35
P24	M10	1,34	0,00	1,34	1,34	P53	M5 ¹ > M8 ¹	90,00	21,30	111,30	1415,71
P25	M5 ² > M8 ¹ > M4 ¹ > M8 ³ > M2 ⁴ > M8 ² > M4 ⁴	34,09	65,81	99,90	1594,36	P54	M5 ¹ > M8 ³	78,00	21,30	99,30	1499,73
P26	M7 ¹ > M4 ⁴ > M6 ⁴ > M3 ² > M4 ¹ > M2 ⁶	710,31	86,11	796,42	1425,45	P55	M5 ²	9,00	0,00	9,00	668,39
P27	M3 ¹ > M8 ³ > M3 ¹	30,81	0,00	30,81	1066,9	P56	M5 ¹ > M8 ¹ > M3 ² > M4 ³ > M8 ⁴ > M2 ⁴ > M8 ²	876,00	65,81	941,81	1330,7
P28	M5 ¹ > M7 ⁴ > M2 ⁵	33,13	10,20	43,33	909,75	P57	M5 ¹ > M8 ⁴	165,00	21,30	186,30	638,81
P29	M4 ¹ > M1 ¹ > M8 ³ > M3 ¹ > M8 ¹ > M1 ³ > M4 ³ > M3 ² > M4 ⁴ > M2 ⁴ > M4 ⁴	248,30	44,51	292,81	1567,78	P58	M5 ¹ > M7 ⁶ > M3 ² > M4 ³ > M1 ² > M4 ² > M8 ³ > M1 ² > M2 ¹ > M4 ²	1404,00	65,81	1469,81	1482,27

TOPS: Toplam operasyon süresi (dakika cinsindendir), HTS: Hücresel taşıma süresi (dakika cinsindendir), TS: Toplam süre (dakika cinsindendir), PTS: Parça tamamlanma süresi (dakika cinsindendir)

Her bir makinedeki toplam operasyon sürelerine (TOPS) bakılacak olursa sırasıyla M3², M1⁵, M8¹, M8², M2¹, M8³ ve M8⁴ makinelerinin diğer makinelere göre daha yoğun kullanıldığı ortaya çıkmaktadır. En son tamamlanma süresi M1⁵ makinesinde parça 47'nin son operasyonunda gerçekleşmiştir. Ayrıca, bazı makine setindeki paralel makinelerin hiç kullanılmadığı veya bazı paralel makinelerden fazla sayıda olduğu görülmüştür. Örneğin, 6. makine setindeki M6³ ve M6⁴ paralel makinelerde işlem gören operasyonlar sadece bir paralel makinede işlenmesi için kullanılabilir. Boşta kalan makineler ise, tesisin diğer fabrikalarına dağıtılabilir ya da bu makinelere farklı işler yüklenebilir.

Tablo 4.16.'dan görüldüğü gibi, çoğu makine için hesaplanan toplam süre (TS), yani TOPS ile PAHS'nin toplamından elde edilen süre, makinedeki tamamlanma süresi (MTS) ile eşit değildir. MTS, her bir makinedeki son operasyonun tamamlanma süresi anlamına gelmektedir ve GA yaklaşımı ile hesaplanmıştır. MTS ile TS'nin eşit olmama nedeni, bu tabloda hücrelerarası taşıma sürelerinin (HTS) dikkate alınmamasıdır. HTS, Tablo 4.17.'de dikkate alınmıştır. Parça aileleri hazırlık sürelerinin ve hücrelerarası taşıma sürelerinin operasyonların işlem sürelerine dâhil edilmediği için PAHS ve HTS'nin ayrı ayrı gösterilmesi adına makine sıralamalarını ile operasyon sıralamalarını gösteren iki ayrı Gantt şemasının eş zamanlı olarak oluşturulması gerekmektedir. Operasyonların tamamlanma süreleri her iki Gantt şemasında da eşit olmalıdır. Bununla birlikte, Tablo 4.17.'de her bir parçanın tamamlanma süresi görülebilmektedir. Her bir parça için geçen toplam süre, işlerin operasyonları için gereken işlem süresinin ve makineler arası taşıma süresinin toplamından oluşmaktadır. Parça tamamlanma süresi (PTS) ise, her bir işin son operasyonunun tamamlandığı süre anlamına gelmektedir ve GA yaklaşımı sonucu bulunmuş sürelerdir. Tablo 4.17.'de, her bir parçanın tamamlanma süresi ile toplam süre bazı işler için farklı çıkmıştır. Bunun nedeni, bu tabloda için de PAHS'nin dikkate alınmamasıdır. MTS ve PTS hem parça aileleri arası hazırlık süreleri hem de hücrelerarası hazırlık süreleri dikkate alınarak hesaplanmış sürelerdir. Ayrıca, Tablo 4.17. incelendiği zaman, en büyük toplam işlem süresinin parça 47 (P47) için gerektiği görülmektedir. Bu işin son operasyonunun tamamlandığı süre, ilgili operasyonun makinedeki tamamlanma süresini de etkileyecektir. Dolayısıyla, imalatçıların bu tip

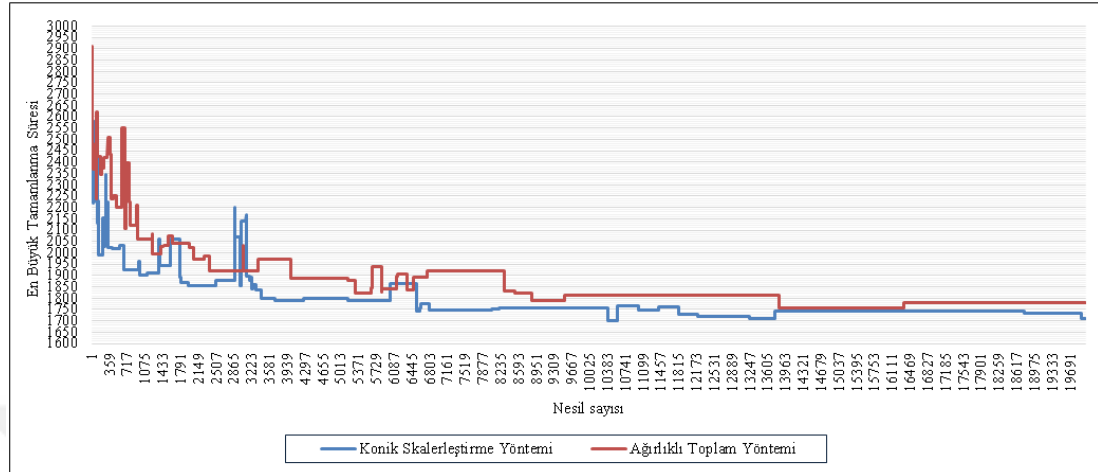
parçalar için, yani işlem süresi oldukça uzun olan parçalar için, fason üretim maliyetini ve makinelerin boшта bekleme süresi için oluşan maliyeti iyi hesaplamaları ve uygun olan seçeneği belirlemeleri gerekmektedir.

Uygulama problemi için hesaplanan amaç fonksiyonu değeri, parça-makine matris yapısına göre değişebilmektedir. Hücreleme etkinliğinin iyi olması, parçaların çizelgeleme etkinliğinin de iyi olmasına neden olmaktadır.

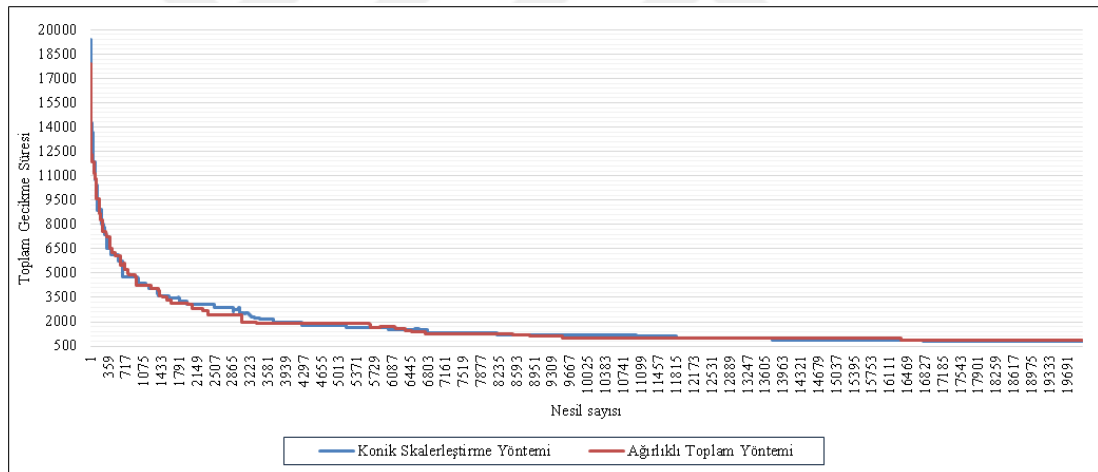
Fabrikadaki uzmanlarla yapılan görüşmeler sonucunda tek amaçlı GA yaklaşımının çok amaçlı bir probleme çözüm oluşturması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu nedenle, en büyük tamamlanma süresi amaç fonksiyonu ile birlikte toplam gecikme süresi amaç fonksiyonu da dikkate alınmıştır. Böylece, Bölüm 3'te önerilen çok amaçlı matematiksel modelin hem ağırlıklı toplam skalerleştirmeli genetik algoritma yaklaşımı ile hem de bu alanda yeni bir yöntem olan konik skalerleştirmeli genetik algoritma yaklaşımı ile çözülebilmesi mümkün olmuştur.

Konik skalerleştirme yönteminin (KSY), ağırlık toplam yöntemine (ATY) ve ϵ -kısıt yöntemine göre üstünlüğü ve avantajları daha önce Bölüm 3'de test problemleri kullanılarak kanıtlanmıştı. Benzer şekilde, gerçek hayat probleminde de KSY'nin üstünlüğünü vurgulamak için farklı ağırlık değerleriyle iki amaçlı konik skalerleştirmeli genetik algoritma yaklaşımı uygulama problemine uygulanmıştır. Şekil 4.21. ve 4.22.'de $W_1=0.6$ ve $W_2=0.4$ ağırlık değerleri için 20.000 ardışıklı iki amaçlı genetik algoritma çözümüne yönelik sonuçlar gösterilmiştir. Şekil 4.21.'de hem KSY ile hem de ATY ile hesaplanan C_{enb} amacının yakınsama grafiğini gösterirken Şekil 4.22.'de benzer şekilde aynı yöntemlerle toplam gecikme süresi amacının yakınsama grafiğini göstermektedir. Şekil 4.21.'de görüldüğü gibi, en büyük tamamlanma süresi için $W_1=0.6$ ve $W_2=0.4$ ağırlıkları ile konik skalerleştirmeli GA yaklaşımının çözüme ağırlıklı toplam skalerleştirmeli GA yaklaşımına göre daha hızlı yakınsadığı görülmektedir. Toplam gecikme süresinin yakınsama hızının hem konik skalerleştirmeli genetik algoritma çözüm yaklaşımı ile hem de ağırlıklı toplam skalerleştirmeli genetik algoritma yaklaşımı ile eş zamanlı olarak yaklaşık olarak aynı oranda azaldığı Şekil 4.22.'de görülmektedir. Benzer şekilde, farklı ağırlıklar için de

aynı durumun gözlemlendiği ve konik skalerleştirme yönteminin daha hızlı yakınsadığı gözlemlenmiştir.



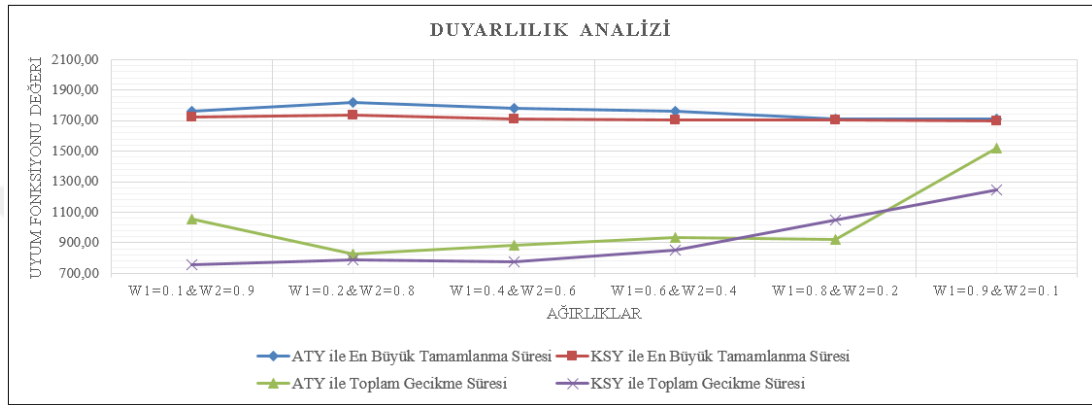
Şekil 4.21. $W_1=0.4$ ve $W_2=0.6$ ağırlıkları ile uygulama problemine ait C_{enb} amacı için yakınsama hızı



Şekil 4.22. $W_1=0.4$ ve $W_2=0.6$ ağırlıkları ile uygulama problemine ait toplam gecikme süresi amacı için yakınsama hızı

Duyarlılık analizi, bir sistemin çıktısının farklı girdilerden veya parametre değerlerinden etkilenip etkilenmediğini ve nasıl etkilendiğini incelemektir. Bununla birlikte, teorik olarak belirlenen parametre değerlerinin deneysel verilerden güvenilir bir şekilde elde edilip edilemeyeceğini belirlemede yararlı bir araçtır. Duyarlılık analizi, girdi parametrelerinin çıktı belirsizliğine katkısını değerlendirmektedir (Saltelli, 2002). Bu nedenle, iki amaçlı modelin amaçları farklı ağırlıklar dikkate alınarak hem iki amaçlı konik skalerleştirme genetik algoritma yaklaşımı için hem de

iki amaçlı ağırlıklı toplam skalerleştirme genetik algoritma yaklaşımı ile 20.000 ardıştırmada çözülmüştür. Şekil 4.23.'ten görüleceği üzere yine konik skalerleştirme yönteminin hem C_{enb} amaç fonksiyonu için hem de toplam gecikme süresi amaç fonksiyonu için altı amaç ağırlığından beşinde daha iyi uyum fonksiyon değerine ulaşması ile üstünlüğü kanıtlanmıştır. ATY ile sadece $W_1=0.8$ ve $W_2=0.2$ ağırlıkları için daha iyi bir nokta elde edilebilmiştir.



Şekil 4.23. Amaçların farklı ağırlıkları dikkate alınarak her bir amacın KSY'ye ve ATY'ye göre sonuçlarının karşılaştırılması

BÖLÜM 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Günümüz rekabet dünyasında imalat firmalarının güçlerini koruyabilmesi, esnekliklerini, hızlarını, ürün çeşitliliklerini, verimliliklerini ve etkinliklerini arttırmaları ile sağlanabilmektedir. Firmalar, müşterilerin taleplerine hızlı cevap vermeye ve müşteri ihtiyaçlarına daha iyi yanıt vermek için ürün çeşitliliğini arttırmaya çalışırken aynı zamanda verimliliklerini arttırarak ya da koruyarak mümkün olan en kısa sürede ürün üreterek üretim maliyetlerini azaltmaya ve belirlenen termin süreleri içinde üretimi gerçekleştirmeye çalışmaları gerekmektedir.

Firmaların ürün çeşitliliğini arttırmaya çalışması, özellikle hazırlık sürelerinin ve firma ya da atölye içindeki taşıma sürelerinin de yükselmesine neden olmaktadır. Bu da firmanın etkin çalışamamasına neden olmakta ve böylece çizelgeleme işlemlerinin takibini zorlaştırdığı için uygulamada sıkıntılar yaratmaktadır.

Uygulamada etkin bir çizelge oluşturmak oldukça zordur. Zorluğuna rağmen etkin bir çizelgenin oluşturulması sürekli bir biçimde verimlilik artışını ve sürenin azaltılmasını sağlayabilmektedir. Bu nedenle, hücresel imalat sistemi kullanarak oluşturulmuş hücre ve parça aileleri ile tesisin daha küçük alt sistemlere bölünmesi hem daha rahat iş akışlarının oluşmasına hem de akış zamanları daha küçük olduğu için çizelgeleme işlemlerinin daha rahat kontrol edilebilmesine olanak sağlamaktadır.

Ayrıca benzer üretim gereksinimlerine sahip parçaların gruplanması ile hazırlık sürelerinin azaltılmasına ve bu parçaları işlemek üzere farklı üretim yeteneklerine sahip makinelerin fiziksel olarak gruplanması ile de taşıma sürelerinin azaltılmasına olanak sağlaması, parçaların üretim çevrimlerini daha da kısalmaktadır. Sonuç olarak, hücresel imalat ortamında oluşturulan bir çizelgeleme sistemini kullanmak firmaya büyük bir rekabet avantajı sağlayabilmektedir.

Bu tez çalışmasında, çizelgeleme problemleri arasındaki zorluk hiyerarşisinde üstte yer alan esnek atölye tipi hücre çizelgeleme problem (EATHÇP) tipinin gerçek hayat problemine uyarlaması gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, problem için farklı hücrelerdeki makineleri ziyaret eden istisnai parçaları, hücrelerarası taşıma süresini, sıra bağımlı parça ailesi hazırlık süresini ve bir iş merkezini ya da makineyi birden fazla kez ziyaret eden yeniden işlenebilir parçayı dikkate alan Karışık Tamsayılı Doğrusal Olmayan Programlama (KTDOP) modeli geliştirilmiştir. Önerilen model oldukça esnek yapıya sahiptir. Önerilen matematiksel model, en büyük tamamlanma süresi (C_{enb}) amaç fonksiyonu ile test problemleri kullanılarak Lingo 11.0 yazılımında çözülmüştür. Önerilen KTDOP modelinin en fazla dört hücre, dört parça ailesi, on beş parça ve on iki makineye kadar makul sürelerde çözebildiği tespit edilmiştir. Ayrıca, matematiksel modele toplam gecikme süresi eklenerek model çok amaçlı hale getirilmiştir. Model, ağırlıklı toplam yöntemi (ATY), ε -kısıt yöntemi ve konik skalerleştirme yöntemi (KSY) ile tek amaca dönüştürülmüş ve seçilen test problemi üzerinde analiz edilmiştir. Bunun sonucunda, KSY'nin esnek ortamda hücre çizelgeleme problemleri için ATY'ye ve ε -kısıt yöntemine göre üstünlüğü vurgulanmıştır.

Önerilen KTDOP modelinin sadece küçük ve orta boyutlu problemleri çözebilmesinden ve gerçek hayat probleminin karmaşık yapısından dolayı KTDOP modelinin büyük boyutlu problemler için iyi performans göstermediği görülmüştür. Bu nedenle, makul sürelerde problemi çözebilecek kombinatoriyel problemlerin çözümünde kullanılan Genetik Algoritma (GA) meta-sezgisel tabanlı bir yaklaşım geliştirilmiştir. Geliştirilen GA yaklaşımında probleme özgü dört vektörden oluşan bir kromozom oluşturulmuştur. Bu vektörler, sırasıyla çizelgelenecek operasyonların sıralamasını, bu operasyonlara atanan makineleri, her bir operasyonun bulunduğu parça ailesini ve her bir makinenin bulunduğu hücreyi temsil etmektedir. Ayrıca, oluşturulan bu kromozom yapısı sayesinde, algoritma kodlandığı zaman mümkün olduğunca olursuz çözümler engellenmeye çalışılmıştır.

Geliştirilen GA yaklaşımı için literatürden küçük, orta ve büyük boyutlu kırk-iki veri seti türetilmiştir. Ele alınan test problemlerini çözmek için GA yaklaşımının uygun faktörleri ve bu faktörlerin düzeyleri belirlenmiştir. Tam faktöriyel deney tasarımı ile

test problemlerinin her biri için belirlenen faktörlerin düzeyleri seçilmiştir. Oluşturulan problem seti C_{enb} amaç fonksiyonu göz önüne alınarak KTDOP modeli ve GA yaklaşımı ile karşılaştırılmıştır. Hem hücrelerarası taşıma süresini dikkate alan hem de parça aileleri arası hazırlık sürelerini dikkate alan iki ayrı Gantt şemasının göz önüne alarak GA yaklaşımı için hesaplanan uyum fonksiyonu hesabı özellikle problemi çok zorlaştırdığı görülmektedir. Önerilen GA yaklaşımının büyük boyutlu problemleri de çözebildiği tespit edilmiş ve CPU süresi açısından performansının genellikle KTDOP modeline göre daha iyi olduğu kanıtlanmıştır. Böylece, daha makul sürede çözüm verebilen GA yaklaşımının literatürde sınırlı sayıda bulunan hücre çizelgeleme gerçek hayat problemlerine katkı yapması beklenmektedir.

Gerçek hayat problemlerinin doğası gereği, karar vericiler çizelgeleme problemlerinde birçok amacı dikkate alabilmektedirler. Bu nedenle, önerilen GA yaklaşımına ikinci bir amaç olan toplam gecikme süresi amaç fonksiyonu eklenerek model iki amaçlı hale dönüştürülmüştür. Uygulama problemi, farklı ağırlık değerleri kullanılarak iki amaçlı konik skalerleştirmeli genetik algoritma yaklaşımı ve ağırlıklı toplam skalerleştirmeli genetik algoritma yaklaşımı kullanılarak çözülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bunun sonucunda, iki amaçlı ağırlıklı toplam skalerleştirme yönteminin C_{enb} amaç ağırlığının 0.8 ve toplam gecikme amaç ağırlığının 0.2 olarak ele alınmasıyla hesaplanan toplam gecikme süresi uyum fonksiyon değerinde iyi sonuç gösterdiği onun dışındaki tüm ağırlık değerleriyle hesaplanan uyum fonksiyonlarında iki amaçlı konik skalerleştirme GA yaklaşımının daha kaliteli sonuçlar ürettiği ve daha kaliteli sonuca daha hızlı yakınsadığı gösterilmeye çalışılmıştır. Bu yönüyle, çok amaçlı hücre çizelgeleme problemlerinin çözümünde literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu çalışma sonucunda oluşturulan altyapı sayesinde karar vericinin isteğine göre modele daha fazla amaç fonksiyonu, kısıt, parametre veya karar değişkeni eklenebilir. Çalışma bu yönüyle, sürekli olarak güncellenebilir ve geliştirilebilir konumdadır. Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlara dayanarak, gelecekte yapılması düşünülen konular aşağıda verilen adımlardaki gibidir:

- Ele alınan çalışmada en büyük tamamlanma süresi ve toplam gecikme süresi olmak üzere iki amaç fonksiyonu kullanılsa da toplam akış süresi, ortalama akış süresi, toplam ağırlıklı gecikme, geciken iş sayısı ve ağırlıklı geciken işlerin sayısı gibi amaç fonksiyonları da düşünülebilir.
- Tek amaçlı büyük boyutlu problemleri çözmek için önerilen GA yaklaşımı dışında tabu araması, benzetimli tavlama, parçacık sürü algoritması, karınca koloni algoritması, iteratif yerel arama algoritması, değişken komşuluk arama algoritması gibi sezgisel ve meta-sezgisel yöntemler düşünülebilir ve önerilen GA yaklaşımı ile performansları karşılaştırılabilir.
- Ele alınan çalışmada, çok amaçlı büyük boyutlu problemleri çözmek için önerilen konik skalerleştirmeli genetik algoritma yaklaşımı ve ağırlıklı toplam skalerleştirmeli genetik algoritma yaklaşımı dışında bastırılmamış sınıflandırılmalı genetik algoritma (NSGA), bastırılmamış sınıflandırılmalı genetik algoritma II (NSGA-II), çok amaçlı genetik algoritma (MOGA), çok amaçlı evrimsel algoritma (MOEA), çok amaçlı dinamik programlama, hedef programlama gibi çok amaçlı optimizasyon problemlerin çözümünde kullanılan algoritmalar düşünülebilir.
- Ele alınan çalışmada, hücrelerarası taşıma sürelerinin ve parça ailesi sürelerinin dikkate alınarak gerçek şartlara uygun hale getirilmesine rağmen hücre içi taşıma süreleri ihmal edilmiş ve hücre içi hazırlık süreleri işlem sürelerine dâhil edilmiştir. İlerleyen çalışmalarda hücre içi taşıma sürelerinin ve hücre içi hazırlık sürelerinin de dikkate alınması gerçek şartlara uygunluğu arttırabilir.
- Çeşitli simülasyon yöntemleri ve yazılımları kullanılarak, dinamik ve stokastik ortamda oluşturulan hücre çizelgeleme probleminin etkinliği test edilebilir.
- Önerilen çalışmada işlem süreleri sabit olarak kabul edilmiştir. Bazı durumlarda, işlem süreleri öğrenme veya bozulma etkisiyle artabilir veya azalabilir. İlerleyen çalışmalarda bu olgular da dikkate alınarak bir model geliştirilebilir.
- Önerilen çok amaçlı GA yaklaşımını işletmedeki çalışanların rahatlıkla kullanabilecekleri etkili bir karar destek sistemi ile desteklenebilir ve firmaya sunulabilir.

- Etkili bir karar destek sisteminin oluşturulması, parçaları makinelere taşıyacak akıllı hatların kurulması, makinelere sensörlerin takılması ile yapılacak bir çalışma günümüzün popüler devrimi olan Endüstri 4.0 sistemine geçiş açısından bir altyapı oluşturabilir. Firmanın bu sistemi kurması başlangıç yüksek maliyeti ile karşılaşmasına neden olsa da Endüstri 4.0'ın avantajları dikkate alınırsa uzun vadede firma açısından faydalı olabilir.
- Hücre oluşturma problemi ve hücre çizelgeleme problemi bütünleşik olarak da düşünülebilir.

Sonuç olarak, hücresel imalat ortamında esnek atölye çizelgeleme problemi gerek yeni çözüm metotları açısından gerekse probleme eklenecek yeni kısıt, parametre ve değişken ile problemin farklı versiyonları açısından gelişmeye açık problemidir. Bu nedenle, hücresel çizelgeleme problemi gelecekte araştırmacılara yeni çalışma alanları sunacaktır.

KAYNAKLAR

- Abedi, M., Seidgar, H., Fazlollahtabar, H., Bijani, R. 2015. Bi-objective optimisation for scheduling the identical parallel batch-processing machines with arbitrary job sizes, unequal job release times and capacity limits. *International Journal of Production Research*, 53(6): 1680-1711.
- Adil, G., Rajamani, D., Strong, D. 1996. Cell formation considering alternate routings. *International Journal of Production Research*, 34(5): 1361-1380.
- Ahmadi, A., Kaymanesh, A., Siano, P., Janghorbani, M., Nezhad, A. E., Sarno, D. 2015. Evaluating the effectiveness of normal boundary intersection method for short-term environmental/economic hydrothermal self-scheduling. *Electric Power Systems Research*, 123: 192-204.
- Ahmadi, E., Zandieh, M., Farrokh, M., Emami, S. M. 2016. A multi objective optimization approach for flexible job shop scheduling problem under random machine breakdown by evolutionary algorithms. *Computers & Operations Research*, 73: 56-66.
- Ahmadizar, F., Hosseini, L. 2012. Bi-criteria single machine scheduling with a time-dependent learning effect and release times. *Applied Mathematical Modelling*, 36(12): 6203-6214.
- Anvari, B., Angeloudis, P., Ochieng, W. Y. 2016. A multi-objective GA-based optimisation for holistic Manufacturing, transportation and Assembly of precast construction. *Automation in Construction*, 71: 226-241.
- Arkat, J., Hosseini, L., Farahani, M. H. 2011. Minimization of exceptional elements and voids in the cell formation problem using a multi-objective genetic algorithm. *Expert Systems with Applications*, 38(8): 9597-9602.
- Arkat, J., Saidi, M., Abbasi, B. 2007. Applying simulated annealing to cellular manufacturing system design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32(5-6): 531-536.
- Balaji, A. N., Porselvi, S. 2014. Artificial Immune System Algorithm and Simulated Annealing Algorithm for Scheduling Batches of Parts based on Job Availability Model in a Multi-cell Flexible Manufacturing System. *Procedia Engineering*, 97: 1524-1533.
- Balin, S. 2011. Non-identical parallel machine scheduling using genetic algorithm. *Expert Systems with Applications*, 38(6): 6814-6821.
- Banzhaf, W., Nordin, P., Keller, R. E., Francone, F. D. 1998. Genetic programming: an introduction (Vol. 1): Morgan Kaufmann San Francisco.

- Baykasoğlu, A. 1999. Multiple objective decision support framework for configuring, loading and reconfiguring manufacturing cells. University of Nottingham,
- Bayram, H., Şahin, R. 2016. A comprehensive mathematical model for dynamic cellular manufacturing system design and Linear Programming embedded hybrid solution techniques. *Computers & Industrial Engineering*, 91: 10-29.
- Bazaraa, S. M., Sherali, H. D., Shetty, C. M. 2006. *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms* (Third Edition ed.), Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons Inc.
- Bean, J. C. 1994. Genetic algorithms and random keys for sequencing and optimization. *ORSA journal on computing*, 6(2): 154-160.
- Behnamian, J. 2014. Decomposition based hybrid VNS–TS algorithm for distributed parallel factories scheduling with virtual corporation. *Computers & Operations Research*, 52: 181-191.
- Benson, H. P. 1978. Existence of efficient solutions for vector maximization problems. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 26(4): 569-580.
- Candan, G., Yazgan, H. R. 2014. Genetic algorithm parameter optimisation using Taguchi method for a flexible manufacturing system scheduling problem. *International Journal of Production Research*, 53(3): 897-915.
- Car, Z., Mikac, T. 2006. Evolutionary approach for solving cell-formation problem in cell manufacturing. *Advanced Engineering Informatics*, 20(3): 227-232.
- Chan, F. T. S., Lau, K. W., Chan, L. Y., Lo, V. H. Y. 2008. Cell formation problem with consideration of both intracellular and intercellular movements. *International Journal of Production Research*, 46(10): 2589-2620.
- Chang, H.-C., Liu, T.-K. 2015. Optimisation of distributed manufacturing flexible job shop scheduling by using hybrid genetic algorithms. *Journal of Intelligent Manufacturing*.
- Chen, C.-F., Wu, M.-C., Lin, K.-H. 2013. Effect of solution representations on Tabu search in scheduling applications. *Computers & Operations Research*, 40(12): 2817-2825.
- Chen, F., Yeh, C. 2009. Economic statistical design of non-uniform sampling scheme $\bar{X}$ bar control charts under non-normality and Gamma shock using genetic algorithm. *Expert Systems with Applications*, 36(5): 9488-9497.
- Cheng, M., Tadikamalla, P. R., Shang, J., Zhang, B. 2015. Two-machine flow shop scheduling with deteriorating jobs: minimizing the weighted sum of makespan and total completion time. *Journal of the Operational Research Society*, 66(5): 709-719.
- Chih, M., Yeh, L.-L., Li, F.-C. 2011. Particle swarm optimization for the economic and economic statistical designs of the control chart. *Applied Soft Computing*, 11(8): 5053-5067.
- Cho, H.-S., Paik, C.-H., Yoon, H.-M., Kim, H.-G. 2005. A robust design of simulated annealing approach for mixed-model sequencing. *Computers & Industrial Engineering*, 48(4): 753-764.

- Costa, A., Cappadonna, F. A., Fichera, S. 2015. A hybrid genetic algorithm for minimizing makespan in a flow-shop sequence-dependent group scheduling problem. *Journal of Intelligent Manufacturing*.
- Coşkun, S., Motorcu, A. R., Yamankaradeniz, N., Pulat, E. 2012. Evaluation of control parameters' effects on system performance with Taguchi method in waste heat recovery application using mechanical heat pump. *International Journal of Refrigeration*, 35(4): 795-809.
- Das, I., Dennis, J. E. 1998. Normal-boundary intersection: A new method for generating the Pareto surface in nonlinear multicriteria optimization problems. *SIAM Journal on Optimization*, 8(3): 631-657.
- Davis, L., Coombs, S. 1987. Genetic algorithms and communication link speed design: theoretical considerations. Paper presented at the Genetic algorithms and their applications: proceedings of the second International Conference on Genetic Algorithms: July 28-31, 1987 at the Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- De Giovanni, L., Pezzella, F. 2010. An improved genetic algorithm for the distributed and flexible job-shop scheduling problem. *European journal of operational research*, 200(2): 395-408.
- Deb, K., Miettinen, K. 2008. *Multiobjective optimization: interactive and evolutionary approaches* (Vol. 5252): Springer Science & Business Media.
- Delgoshaei, A., Ali, A., Ariffin, M. K. A., Gomes, C. 2016. A multi-period scheduling of dynamic cellular manufacturing systems in the presence of cost uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 100: 110-132.
- Deliktas, D., Torkul, O., Ustun, O. 2017. A flexible job shop cell scheduling with sequence-dependent family setup times and intercellular transportation times using conic scalarization method. *International Transactions in Operational Research*. in press.
- Deliktas, D., Ustun, O. 2015. Student selection and assignment methodology based on fuzzy MULTIMOORA and multichoice goal programming. *International Transactions in Operational Research*. in press.
- Ebrahimi, M., Fatemi Ghomi, S. M. T., Karimi, B. 2014. Hybrid flow shop scheduling with sequence dependent family setup time and uncertain due dates. *Applied Mathematical Modelling*, 38(9-10): 2490-2504.
- Ehrgott, M. 2005. *Multicriteria optimization*: Springer Science & Business Media.
- Elmi, A., Solimanpur, M., Topaloglu, S., Elmi, A. 2011. A simulated annealing algorithm for the job shop cell scheduling problem with intercellular moves and reentrant parts. *Computers & Industrial Engineering*, 61(1): 171-178.
- Elmi, A., Topaloglu, S. 2016. Multi-degree cyclic flow shop robotic cell scheduling problem: Ant colony optimization. *Computers & Operations Research*, 73: 67-83.
- Erozan, İ. 2014. Mevcut Atölye Tipi Üretim Sisteminin Tasarlanacak Bir Hücresel İmalat Sistemi ile Karşılaştırılması ve Çok Amaçlı Bir Model, Sakarya Üniversitesi, Doktora Tezi, 1-133.

- Erozan, İ., Torkul, O., Ustun, O. 2015a. Proposal for a decision support software for the design of cellular manufacturing systems with multiple routes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76(9-12): 2027-2041.
- Erozan, İ., Torkul, O., Ustun, O. 2015b. Proposal of a nonlinear multi-objective genetic algorithm using conic scalarization to the design of cellular manufacturing systems. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 27(1): 30-57.
- Essafi, I., Mati, Y., Dauzère-Pérès, S. 2008. A genetic local search algorithm for minimizing total weighted tardiness in the job-shop scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 35(8): 2599-2616.
- Eşme, U. 2009. Application of Taguchi method for the optimization of resistance spot welding process. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 34(2): 519.
- Fattahi, P., Fallahi, A. 2010. Dynamic scheduling in flexible job shop systems by considering simultaneously efficiency and stability. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2(2): 114-123.
- França, P. M., Gupta, J. N. D., Mendes, A. S., Moscato, P., Veltink, K. J. 2005. Evolutionary algorithms for scheduling a flowshop manufacturing cell with sequence dependent family setups. *Computers & Industrial Engineering*, 48(3): 491-506.
- French, S. 1982. *Sequencing and scheduling: an introduction to the mathematics of the job-shop*: Ellis Horwood Chichester.
- Gao, K. Z., Suganthan, P. N., Pan, Q. K., Chua, T. J., Cai, T. X., Chong, C. S. 2014. Pareto-based grouping discrete harmony search algorithm for multi-objective flexible job shop scheduling. *Information Sciences*, 289: 76-90.
- Garbie, I. H. 2011. Converting Traditional Production Systems to Focused Cells as a Requirement of Global Manufacturing. *Journal of Service Science and Management*, 04(03): 268-279.
- Garey, M. R., Johnson, D. S., Sethi, R. 1976. The complexity of flowshop and jobshop scheduling. *Mathematics of operations research*, 1(2): 117-129.
- Gasimov, R. N. (2001). Characterization of the Benson proper efficiency and scalarization in nonconvex vector optimization Multiple criteria decision making in the new millennium (pp. 189-198): Springer.
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*.
- Gomes, M. C., Barbosa-Póvoa, A. P., Novais, A. Q. 2013. Reactive scheduling in a make-to-order flexible job shop with re-entrant process and assembly: a mathematical programming approach. *International Journal of Production Research*, 51(17): 5120-5141.

- Gonçalves, J. F., Resende, M. G. C. 2013. A biased random key genetic algorithm for 2D and 3D bin packing problems. *International journal of production economics*, 145(2): 500-510.
- Gopalakrishnan, H., Kosanovic, D. 2015. Operational planning of combined heat and power plants through genetic algorithms for mixed 0–1 nonlinear programming. *Computers & Operations Research*, 56: 51-67.
- Gregório, R., Oliveira, P. R. 2011. A logarithmic-quadratic proximal point scalarization method for multiobjective programming. *Journal of Global Optimization*, 49(2): 281-291.
- Groover, M. P. 2008. *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing* (Third Edition ed.), New Jersey: Pearson Education Inc.
- Guddat, J. 1985. Multiobjective and stochastic optimization based on parametric optimization (Vol. 26): Akademie-Verlag.
- Haimes, Y. Y., Ladson, L., Wismer, D. A. 1971. Bicriterion formulation of problems of integrated system identification and system optimization. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*(3): 296-&.
- Halat, K., Bashirzadeh, R. 2015. Concurrent scheduling of manufacturing cells considering sequence-dependent family setup times and intercellular transportation times. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77(9-12): 1907-1915.
- Hamzadayi, A., Yildiz, G. 2017. Modeling and solving static m identical parallel machines scheduling problem with a common server and sequence dependent setup times. *Computers & Industrial Engineering*, 106: 287-298.
- Harhalakis, G., Nagi, R., Proth, J. 1990. An efficient heuristic in manufacturing cell formation for group technology applications. *The International Journal of Production Research*, 28(1): 185-198.
- Hendizadeh, S. H., Faramarzi, H., Mansouri, S. A., Gupta, J. N., ElMekkawy, T. Y. 2008. Meta-heuristics for scheduling a flowline manufacturing cell with sequence dependent family setup times. *International journal of production economics*, 111(2): 593-605.
- Hinkelmann, K., Kempthorne, O. 2005. *Design and analysis of experiments*. Vol. 2, Advanced experimental design: Wiley.
- Holland, J. H. 1975. *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*: MIT press.
- Huang, C.-S., Huang, Y.-C., Lai, P.-J. 2012. Modified genetic algorithms for solving fuzzy flow shop scheduling problems and their implementation with CUDA. *Expert Systems with Applications*, 39(5): 4999-5005.
- Hwang, C.-L., Paidy, S. R., Yoon, K., Masud, A. S. M. 1980. Mathematical programming with multiple objectives: A tutorial. *Computers & Operations Research*, 7(1-2): 5-31.

- Hyer, N., Wemmerlov, U. 2001. Reorganizing the factory: Competing through cellular manufacturing: CRC Press.
- Ibarra-Rojas, O. J., Giesen, R., Rios-Solis, Y. A. 2014. An integrated approach for timetabling and vehicle scheduling problems to analyze the trade-off between level of service and operating costs of transit networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 70: 35-46.
- Ibrahim, A.-m., Elmekawy, T., Peng, Q. 2014. Robust Metaheuristics for Scheduling Cellular Flowshop with Family Sequence-Dependent Setup Times. *Procedia CIRP*, 17: 428-433.
- Imran, M., Kang, C., Lee, Y. H., Jahanzaib, M., Aziz, H. 2017. Cell formation in a cellular manufacturing system using simulation integrated hybrid genetic algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 105: 123-135.
- Irani, S. A. 1999. *Handbook of Cellular Manufacturing Systems*, New York: John Wiley and Sons Inc.
- Jayaswal, S., Adil, G. K. 2004. Efficient algorithm for cell formation with sequence data, machine replications and alternative process routings. *International Journal of Production Research*, 42(12): 2419-2433.
- Jeon, G., Leep, H. R. 2006. Forming part families by using genetic algorithm and designing machine cells under demand changes. *Computers & Operations Research*, 33(1): 263-283.
- Jia, S., Hu, Z.-H. 2014. Path-relinking Tabu search for the multi-objective flexible job shop scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 47: 11-26.
- Jiu, S., Zhou, Z., Liu, J. 2013. The equipment maintenance scheduling problem in a coal production system. *International Journal of Production Research*, 51(17): 5309-5336.
- Kacem, I., Hammadi, S., Borne, P. 2002. Pareto-optimality approach for flexible job-shop scheduling problems: hybridization of evolutionary algorithms and fuzzy logic. *Mathematics and computers in simulation*, 60(3): 245-276.
- Kaplanoglu, V. 2016. An object-oriented approach for multi-objective flexible job-shop scheduling problem. *Expert Systems with Applications*, 45: 71-84.
- Karthikeyan, S., Saravanan, M., Ganesh, K. 2012. GT Machine Cell Formation Problem in Scheduling for Cellular Manufacturing System Using Meta-Heuristic Method. *Procedia Engineering*, 38: 2537-2547.
- Kasimbeyli, R. 2010. A Nonlinear Cone Separation Theorem and Scalarization in Nonconvex Vector Optimization. *SIAM Journal on Optimization*, 20(3): 1591-1619.
- Kasimbeyli, R. 2013. A conic scalarization method in multi-objective optimization. *Journal of Global Optimization*, 56(2): 279-297.
- Kesen, S. E., Das, S. K., Güngör, Z. 2010. A genetic algorithm based heuristic for scheduling of virtual manufacturing cells (VMCs). *Computers & Operations Research*, 37(6): 1148-1156.

- Kundakcı, N., Kulak, O. 2016. Hybrid genetic algorithms for minimizing makespan in dynamic job shop scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering*, 96: 31-51.
- Lalla-Ruiz, E., González-Velarde, J. L., Melián-Batista, B., Moreno-Vega, J. M. 2014. Biased random key genetic algorithm for the Tactical Berth Allocation Problem. *Applied Soft Computing*, 22: 60-76.
- Li, D., Wang, Y., Xiao, G., Tang, J. 2013. Dynamic parts scheduling in multiple job shop cells considering intercell moves and flexible routes. *Computers & Operations Research*, 40(5): 1207-1223.
- Li, J.-q., Pan, Q.-k. 2012. Chemical-reaction optimization for flexible job-shop scheduling problems with maintenance activity. *Applied Soft Computing*, 12(9): 2896-2912.
- Li, J.-q., Pan, Q.-k., Liang, Y.-C. 2010. An effective hybrid tabu search algorithm for multi-objective flexible job-shop scheduling problems. *Computers & Industrial Engineering*, 59(4): 647-662.
- Li, J.-Q., Pan, Q.-K., Tasgetiren, M. F. 2014. A discrete artificial bee colony algorithm for the multi-objective flexible job-shop scheduling problem with maintenance activities. *Applied Mathematical Modelling*, 38(3): 1111-1132.
- Li, J., Pan, Q., Xie, S. 2012. An effective shuffled frog-leaping algorithm for multi-objective flexible job shop scheduling problems. *Applied Mathematics and Computation*, 218(18): 9353-9371.
- Li, L., Huo, J.-z. 2009. Multi-objective flexible job-shop scheduling problem in steel tubes production. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 29(8): 117-126.
- Li, Y., Li, X., Gupta, J. N. D. 2015. Solving the multi-objective flowline manufacturing cell scheduling problem by hybrid harmony search. *Expert Systems with Applications*, 42(3): 1409-1417.
- Lin, C.-J., Hsieh, M.-H. 2009. An efficient hybrid Taguchi-genetic algorithm for protein folding simulation. *Expert Systems with Applications*, 36(10): 12446-12453.
- Liu, H., Abraham, A., Wang, Z. 2009. A multi-swarm approach to multi-objective flexible job-shop scheduling problems. *Fundamenta Informaticae*, 95(4): 465-489.
- Logendran, R. 1998. *Group technology and cellular manufacturing: Methodologies and applications* (Vol. 1): Taylor & Francis.
- Logendran, R., Carson, S., Hanson, E. 2005. Group scheduling in flexible flow shops. *International journal of production economics*, 96(2): 143-155.
- Logendran, R., deSzoek, P., Barnard, F. 2006. Sequence-dependent group scheduling problems in flexible flow shops. *International journal of production economics*, 102(1): 66-86.

- Lu, C., Li, X., Gao, L., Liao, W., Yi, J. 2017. An effective multi-objective discrete virus optimization algorithm for flexible job-shop scheduling problem with controllable processing times. *Computers & Industrial Engineering*, 104: 156-174.
- Lu, P.-H., Wu, M.-C., Tan, H., Peng, Y.-H., Chen, C.-F. 2015. A genetic algorithm embedded with a concise chromosome representation for distributed and flexible job-shop scheduling problems. *Journal of Intelligent Manufacturing*.
- Magalhães-Mendes, J. 2013. A comparative study of crossover operators for genetic algorithms to solve the job shop scheduling problem. *WSEAS transactions on computers*, 12(4): 164-173.
- Marler, R. T., Arora, J. S. 2004. Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and multidisciplinary optimization*, 26(6): 369-395.
- Messac, A., Ismail-Yahaya, A., Mattson, C. A. 2003. The normalized normal constraint method for generating the Pareto frontier. *Structural and multidisciplinary optimization*, 25(2): 86-98.
- Messac, A., Mattson, C. A. 2004. Normal constraint method with guarantee of even representation of complete Pareto frontier. *AIAA journal*, 42(10): 2101-2111.
- Miettinen, K. M. 1999. *Nonlinear multiobjective optimization*, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Mitra, A. C., Jawarkar, M., Soni, T., Kiranchand, G. R. 2016. Implementation of Taguchi Method for Robust Suspension Design. *Procedia Engineering*, 144: 77-84.
- Mohammadi, M., Musa, S. N., Bahreininejad, A. 2015. Optimization of economic lot scheduling problem with backordering and shelf-life considerations using calibrated metaheuristic algorithms. *Applied Mathematics and Computation*, 251: 404-422.
- Mokhtarinejad, M., Ahmadi, A., Karimi, B., Rahmati, S. H. A. 2015. A novel learning based approach for a new integrated location-routing and scheduling problem within cross-docking considering direct shipment. *Applied Soft Computing*, 34: 274-285.
- Moosavian, S. A. A., Ghafari, A., Salimi, A., Abdi, N. 2008. Non-linear multiobjective optimization for control of hydropower plants network. Paper presented at the *Advanced Intelligent Mechatronics*, 2008. AIM 2008. IEEE/ASME International Conference on.
- Moosavian, S. A. A., Ghaffari, A., Salimi, A. 2010. Sequential quadratic programming and analytic hierarchy process for nonlinear multiobjective optimization of a hydropower network. *Optimal Control Applications and Methods*, 31(4): 351-364.
- Moslehi, G., Mahnam, M. 2011. A Pareto approach to multi-objective flexible job-shop scheduling problem using particle swarm optimization and local search. *International journal of production economics*, 129(1): 14-22.

- Motta, R. d. S., Afonso, S. M., Lyra, P. R. 2012. A modified NBI and NC method for the solution of N-multiobjective optimization problems. *Structural and multidisciplinary optimization*, 46(2): 239-259.
- Mousavi, S. M., Hajipour, V., Niaki, S. T. A., Aalikar, N. 2014. A multi-product multi-period inventory control problem under inflation and discount: a parameter-tuned particle swarm optimization algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(9-12): 1739-1756.
- Mozdgir, A., Fatemi Ghomi, S. M. T., Jolai, F., Navaei, J. 2013. Two-stage assembly flow-shop scheduling problem with non-identical assembly machines considering setup times. *International Journal of Production Research*, 51(12): 3625-3642.
- Mozdgir, A., Mahdavi, I., Badeleh, I. S., Solimanpur, M. 2013. Using the Taguchi method to optimize the differential evolution algorithm parameters for minimizing the workload smoothness index in simple assembly line balancing. *Mathematical and Computer Modelling*, 57(1): 137-151.
- Mrugalska, B., Wyrwicka, M. K. 2016. Towards Lean Production in Industry 4.0.
- Mueller-Gritschneider, D., Graeb, H., Schlichtmann, U. 2009. A successive approach to compute the bounded Pareto front of practical multiobjective optimization problems. *SIAM Journal on Optimization*, 20(2): 915-934.
- Naderi, B., Ghomi, S. F., Aminnayeri, M., Zandieh, M. 2011. Scheduling open shops with parallel machines to minimize total completion time. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 235(5): 1275-1287.
- Nezhad, A. E., Javadi, M. S., Rahimi, E. 2014. Applying augmented ϵ -constraint approach and lexicographic optimization to solve multi-objective hydrothermal generation scheduling considering the impacts of pumped-storage units. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 55: 195-204.
- Oğuz, C., Ercan, M. F. 2005. A genetic algorithm for hybrid flow-shop scheduling with multiprocessor tasks. *Journal of Scheduling*, 8(4): 323-351.
- Pascoletti, A., Serafini, P. 1984. Scalarizing vector optimization problems. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 42(4): 499-524.
- Pezzella, F., Morganti, G., Ciaschetti, G. 2008. A genetic algorithm for the Flexible Job-shop Scheduling Problem. *Computers & Operations Research*, 35(10): 3202-3212.
- Pinedo, M. 2002. *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems* (Second Edition ed.), New Jersey: Prentice-Hall Inc.
- Piroozfard, H., Wong, K. Y., Wong, W. P. 2016. Minimizing total carbon footprint and total late work criterion in flexible job shop scheduling by using an improved multi-objective genetic algorithm. *Resources, Conservation and Recycling*.
- Qin, J., Liu, Y., Grosvenor, R. 2016. A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond. *Procedia CIRP*, 52: 173-178.

- Rocha, R. A., Oliveira, P. R., Gregório, R. M., Souza, M. 2016. Logarithmic quasi-distance proximal point scalarization method for multi-objective programming. *Applied Mathematics and Computation*, 273: 856-867.
- Ross, P. J. 1988. Taguchi techniques for quality engineering: loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design, USA: The McGraw-Hill Companies Inc.
- Rothlauf, F., Goldberg, D. E. 2003. Redundant representations in evolutionary computation. *Evolutionary Computation*, 11(4): 381-415.
- Ruiz, E., Albareda-Sambola, M., Fernández, E., Resende, M. G. C. 2015. A biased random-key genetic algorithm for the capacitated minimum spanning tree problem. *Computers & Operations Research*, 57: 95-108.
- Saad, I., Hammadi, S., Benrejeb, M., Borne, P. 2008. Choquet integral for criteria aggregation in the flexible job-shop scheduling problems. *Mathematics and computers in simulation*, 76(5-6): 447-462.
- Saltelli, A. 2002. Sensitivity analysis for importance assessment. *Risk Analysis*, 22(3): 579-590.
- Saxena, L. K., Jain, P. K. 2011. Dynamic cellular manufacturing systems design—a comprehensive model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53(1-4): 11-34.
- Schaller, J. E., Gupta, J. N., Vakharia, A. J. 2000. Scheduling a flowline manufacturing cell with sequence dependent family setup times. *European journal of operational research*, 125(2): 324-339.
- Shafiq, S. I., Sanin, C., Szczerbicki, E., Toro, C. 2015. Virtual engineering object/virtual engineering process: a specialized form of cyber physical system for Industrie 4.0. *Procedia Computer Science*, 60: 1146-1155.
- Shahsavari-Pour, N., Ghasemishabankareh, B. 2013. A novel hybrid meta-heuristic algorithm for solving multi objective flexible job shop scheduling. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(4): 771-780.
- Shahvari, O., Logendran, R. 2016. Hybrid flow shop batching and scheduling with a bi-criteria objective. *International journal of production economics*, 179: 239-258.
- Shanker, R., Vrat, P. 1998. Post design modeling for cellular manufacturing system with cost uncertainty. *International journal of production economics*, 55(1): 97-109.
- Shen, L., Buscher, U. 2012. Solving the serial batching problem in job shop manufacturing systems. *European journal of operational research*, 221(1): 14-26.
- Shen, X.-N., Yao, X. 2015. Mathematical modeling and multi-objective evolutionary algorithms applied to dynamic flexible job shop scheduling problems. *Information Sciences*, 298: 198-224.

- Slomp, J., Chowdary, B. V., Suresh, N. C. 2005. Design of virtual manufacturing cells: a mathematical programming approach. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 21(3): 273-288.
- Solimanpur, M., Elmi, A. 2013. A tabu search approach for cell scheduling problem with makespan criterion. *International journal of production economics*, 141(2): 639-645.
- Solimanpur, M., Vrat, P., Shankar, R. 2004. A heuristic to minimize makespan of cell scheduling problem. *International journal of production economics*, 88(3): 231-241.
- Soltani, R., Sadjadi, S. J. 2010. Scheduling trucks in cross-docking systems: A robust meta-heuristics approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(5): 650-666.
- Su, C. T., Hsu, C. M. 1998. Multi-objective machine-part cell formation through parallel simulated annealing. *International Journal of Production Research*, 36(8): 2185-2207.
- Sule, D. R. 2001. *Logistics of facility location and allocation*: CRC Press.
- Sun, J.-z., Geng, G.-h., Wang, S.-y., Zhou, M.-q. 2012. Hybrid social cognitive optimization algorithm for constrained nonlinear programming. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 19(3): 91-99.
- Tabrizi, B. H., Ghaderi, S. F. 2016. A robust bi-objective model for concurrent planning of project scheduling and material procurement. *Computers & Industrial Engineering*, 98: 11-29.
- Tang, J., Wang, X., Kaku, I., Yung, K.-l. 2010. Optimization of parts scheduling in multiple cells considering intercell move using scatter search approach. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 21(4): 525-537.
- Tang, J., Yan, C., Wang, X., Zeng, C. 2014. Using lagrangian relaxation decomposition with heuristic to integrate the decisions of cell formation and parts scheduling considering intercell moves. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 11(4): 1110-1121.
- Tavakkoli-Moghaddam, R., Jafari-Zarandini, Y., Gholipour-Kanani, Y. 2010. Multi-objective particle swarm optimization for sequencing and scheduling a cellular manufacturing system. Paper presented at the International Conference on Intelligent Computing.
- Tavana, M., Khalili-Damghani, K., Santos-Arteaga, F. J., Zandi, M.-H. 2017. Drone shipping versus truck delivery in a cross-docking system with multiple fleets and products. *Expert Systems with Applications*, 72: 93-107.
- Thörnblad, K., Strömberg, A.-B., Patriksson, M., Almgren, T. 2015. Scheduling optimisation of a real flexible job shop including fixture availability and preventive maintenance. *European Journal of Industrial Engineering*, 9(1): 126-145.
- Torkashvand, M., Naderi, B., Hosseini, S. A. 2017. Modelling and scheduling multi-objective flow shop problems with interfering jobs. *Applied Soft Computing*, 54: 221-228.

- Trappey, A. J., Trappey, C. V., Govindarajan, U. H., Chuang, A. C., Sun, J. J. 2016. A review of essential standards and patent landscapes for the Internet of Things: A key enabler for Industry 4.0. *Advanced Engineering Informatics*.
- Wang, J., Guo, J. 2016. Research on the base station calibration of multi-station and time-sharing measurement based on hybrid genetic algorithm. *Measurement*, 94: 139-148.
- Wang, T.-Y., Huang, C.-Y. 2008. Optimizing back-propagation networks via a calibrated heuristic algorithm with an orthogonal array. *Expert Systems with Applications*, 34(3): 1630-1641.
- Won, Y., Kim, S. 1997. Multiple criteria clustering algorithm for solving the group technology problem with multiple process routings. *Computers & Industrial Engineering*, 32(1): 207-220.
- Wu, M.-C., Lin, C.-S., Lin, C.-H., Chen, C.-F. 2017. Effects of different chromosome representations in developing genetic algorithms to solve DFJS scheduling problems. *Computers & Operations Research*, 80: 101-112.
- Xia, W., Wu, Z. 2005. An effective hybrid optimization approach for multi-objective flexible job-shop scheduling problems. *Computers & Industrial Engineering*, 48(2): 409-425.
- Xiao, L., Song, S., Chen, X., Coit, D. W. 2016. Joint optimization of production scheduling and machine group preventive maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, 146: 68-78.
- Xing, L.-N., Chen, Y.-W., Yang, K.-W. 2009. Multi-objective flexible job shop schedule: Design and evaluation by simulation modeling. *Applied Soft Computing*, 9(1): 362-376.
- Xiong, J., Xing, L.-n., Chen, Y.-w. 2013. Robust scheduling for multi-objective flexible job-shop problems with random machine breakdowns. *International journal of production economics*, 141(1): 112-126.
- Yazdani, M., Gohari, S., Naderi, B. 2015. Multi-factory parallel machine problems: Improved mathematical models and artificial bee colony algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 81: 36-45.
- Yin, L., Li, X., Gao, L., Lu, C., Zhang, Z. 2017. A novel mathematical model and multi-objective method for the low-carbon flexible job shop scheduling problem. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 13: 15-30.
- Zandieh, M., Amiri, M., Vahdani, B., Soltani, R. 2009. A robust parameter design for multi-response problems. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 230(2): 463-476.
- Zeng, C., Tang, J., Yan, C. 2015. Job-shop cell-scheduling problem with inter-cell moves and automated guided vehicles. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 26(5): 845-859.
- Zhang, G., Gao, L., Shi, Y. 2011. An effective genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem. *Expert Systems with Applications*, 38(4): 3563-3573.

- Zhang, G., Shao, X., Li, P., Gao, L. 2009. An effective hybrid particle swarm optimization algorithm for multi-objective flexible job-shop scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering*, 56(4): 1309-1318.
- Ziaee, M. 2014. A heuristic algorithm for the distributed and flexible job-shop scheduling problem. *The Journal of Supercomputing*, 67(1): 69-83.



EKLER

EK 1: Karma tamsayılı doğrusal olmayan matematiksel modelin (Model 3) Lingo 11.0 kodları

SETS:

```
Parca/1..9/; !P(J)=Parça numarası;
Operasyon/1..4/; !O(O)=Operasyon numarası;
Makina/1..9/; !M(I)=Makina numarası;
Hucre/1..3/; !H(K)=Hucre numarası;
Parca_ailesi/1..3/; !PA(H)=Parca ailesi numarası;

Link (Parca,Operasyon,Makina):
P, !P(J,O,I)=I. makinedeki J. işin O. operasyonunun işlem
süresi;
C; !C(J,O,I)=I. makinedeki J. işin O. operasyonunun
tamamlanma süresi;

Link1(Makina,Hucre):
X; !X(I,K)= 1, I. makine K. hücrede bulunursa ve 0 dd.;
Link2(Hucre,Hucre):
T; !T(L,K)= L. hücreden K. hücreye taşıma süresi;

Link3(Parca_ailesi,Parca_ailesi):
S; !S(H,F)= H. parça ailesi F. parça ailesinden hemen sonra
işlem görüyorsa oluşan hazırlık süresi;

Link4(Parca,Parca_ailesi):
Y; !Y(J,H)= 1, J. iş H. parça ailesine aitse ve 0 dd.;

Link5(Parca,Operasyon,Makina):
R, !R(J,O,I)= 1, I. makinede J. işin O. operasyonu işlem
görüyorsaa ve 0 dd.;
A; !A(J,O,I)= 1, J. işin O. operasyonu özdeş paralel
makinelere I. makinede işlem görüyorsa ve 0 dd.;

Link6(Parca, Operasyon, Parca,
Operasyon, Makina):
Z; !Z(J,O,G,Q,I)= 1, 1, I. makinede J. işin O. operasyonu G. işin
Q. operasyonundan önce geliyorsa ve 0 dd.;

Link7(Parca,Operasyon)
/@ole('Çalışma !Alternatif makinelere sahip olan işlere ait operasyonların
sayfası_dosya','Aralık_adı_listesi')/; indislerini gösterir;

Link8(Parca,Operasyon,Makina)
```

```

                                /@ole('Çalışma
sayfası_dosya','Aralık_adı_listesi')/; !Alternatif makinelere sahip olan işlere ait operasyonların
                                hangi alternatif makineyi kullandığını gösteren indisler;

Tamamlanma1(Parca,Operasyon,Makina)
                                /@ole('Çalışma
sayfası_dosya','Aralık_adı_listesi')/; !Hangi işin hangi operasyonunun hangi makine de işlem
                                gördüğünü gösteren indisler;

Tamamlanma2(Parca,Operasyon,Makina)
                                /@ole('Çalışma
sayfası_dosya','Aralık_adı_listesi')/; !Hangi işin hangi operasyonunun hangi makine de işlem
                                görmediğini gösteren indisler;
ENDSETS

```

DATA:

```

!Her bir parçaya ait işlem süresi;
P=@ole('Çalışma sayfası_dosya','Aralık_adı_listesi');

!Her bir hücrede bulunan makineler;
X=@ole('Çalışma sayfası_dosya','Aralık_adı_listesi');

!Her bir parça ailesinde bulunan parçalar;
Y=@ole('Çalışma sayfası_dosya','Aralık_adı_listesi');

!Hücrelerarası taşıma süresi;
T=@ole('Çalışma sayfası_dosya','Aralık_adı_listesi');

!Parça aileleri arası hazırlık süresi;
S=@ole('Çalışma sayfası_dosya','Aralık_adı_listesi');

! Makinede işlem gören işlerin operasyonlarına 1, kalanına 0 atama;
R=@ole('Çalışma sayfası_dosya','Aralık_adı_listesi');

M=99999;
ENDDATA

```

!Amaç fonksiyonu;
MIN=CMAX;

```

!Eşitlik 3.11;
@FOR(Link7(J,O):
    @SUM(Makina(I):A(J,O,I)=1);
@FOR(Link8(J,O,I):A(J,O,I)=1);

!Eşitlik 3.12;
@FOR(Parca(J):
    @FOR(Operasyon(O):
        @FOR(Makina(I):A(J,O,I)<=R(J,O,I)));

!Eşitlik 3.13;
@FOR(Parca(J):
    @FOR(Operasyon(O)|O #GE# 2:
        @SUM(Makina(I):A(J,O,I)*C(J,O,I))>=@SUM(Makina(I):
            @SUM(Makina(Q):A(J,O,I)*A(J,O-1,Q)*(C(J,O-1,Q)+P(J,O,I)+
                @SUM(Hucre(K):
                    @SUM(Hucre(L):X(I,K)*X(Q,L)*T(L,K))))));

```

!Eşitlik 3.14;

```
@FOR(Makina(I):
@FOR(Parca(J):
@FOR(Operasyon(O):
@FOR(Operasyon(U):
@FOR(Parca(G)|J #NE# G #AND# J #GE# 2: C(J,O,I)>=C(G,U,I)+
@SUM(Parca_ailesi(H):
@SUM(Parca_ailesi(F):Y(G,F)*Y(J,H)*S(F,H)))-
(M*Z(J,O,G,U,I))+P(J,O,I)-(M*(2-A(J,O,I)-A(G,U,I))))));
```

!Eşitlik 3.15;

```
@FOR(Makina(I):
@FOR(Parca(J):
@FOR(Operasyon(O):
@FOR(Operasyon(U):
@FOR(Parca(G)|J #NE# G #AND# J #GE# 2: C(G,U,I)>=C(J,O,I)+
@SUM(Parca_ailesi(H):
@SUM(Parca_ailesi(F):Y(J,H)*Y(G,F)*S(H,F)))-
(M*(1-Z(J,O,G,U,I))+P(G,U,I)-(M*(2-A(J,O,I)-A(G,U,I))))));
```

!Eşitlik 3.16;

```
@FOR(Link(J,O,I):C(J,O,I)>=P(J,O,I));
```

!Eşitlik 3.17;

```
@FOR(Tamamlanma1(J,O,I):CMAX>=C(J,O,I));
@FOR(Tamamlanma2(J,O,I):C(J,O,I)=0);
```

!Eşitlik 3.18;

```
@FOR(Link6(J,O,G,U,I)|J #NE# G:@BIN(Z(J,O,G,U,I)));
@FOR(Link5(J,O,I):@BIN(A(J,O,I)));
@FOR(Link6(J,O,G,U,I)|J #EQ# G:Z(J,O,G,U,I)=0);
@FOR(Tamamlanma1(J,O,I):@GIN(C(J,O,I)));
```

EK 2: Test problemlerine ait veri seti

<i>İşlem süreleri: Her bir makinede işlem gören iş için</i>											
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
M1	4	3	---	---	6	1	6	3	4	---	---
M2	5	4	7	---	2	---	---	9	5	7	---
M3	6	---	2	6	---	5	---	---	---	9	5
M4	---	---	4	2	3	7	5	---	---	3	---
M5	---	---	---	---	---	---	5	4	---	---	---
M6	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	3
R:	1-2-3-2	2-1-2	4-2-3	3-4-3	4-2-1-4	1-4-3-1	4-1-5	1-2-5	2-1-2	3-2-4	6-3-6-3
	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22
M1	---	4	5	---	---	---	---	---	---	---	---
M2	---	3	1	---	2	---	---	---	---	---	---
M3	---	2	4	---	---	---	---	---	---	---	8
M4	4	3	1	1	---	1	---	---	---	---	3
M5	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
M6	5	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
M7	---	---	---	4	5	1	---	6	---	---	---
M8	---	---	---	2	3	2	---	---	---	---	---
M9	---	---	---	---	---	---	4	3	---	4	---
M10	---	---	---	---	---	---	6	2	8	---	---
M11	---	---	---	---	---	---	---	---	7	5	---
M12	---	---	---	---	---	---	---	---	5	3	---
R:	4-6-4	2-3-4-1	4-3-1-2	8-7-4	7-2-8-2	4-7-8	10-9	9-7-10	11-10-12	12-9-11	4-3-4-3
	P23	P24	P25	P26	P27	P28	P29	P30	P31	P32	P33
M3	---	---	---	---	---	---	---	---	5	---	---
M4	7	---	---	---	---	---	---	---	9	---	---
M5	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
M6	---	---	---	---	---	---	---	---	6	---	---
M7	---	---	---	2	8	---	5	5	---	---	---
M8	---	---	4	5	---	2	6	3	4	---	---
M9	---	7	---	---	---	---	---	---	---	5	6
M10	---	4	---	---	---	---	---	---	---	7	5
M11	---	---	---	---	---	---	---	---	---	2	3
M12	---	---	---	---	---	---	---	---	---	6	---
M13	---	---	6	7	5	9	7	---	---	---	---
M14	---	---	9	4	3	3	4	6	---	---	---
R:	4	9-10-9	13-8-14-8	14-8-13-7	7-14-13	8-14-13-14	8-13-17-7	14-8-7-8	8-4-3-6	10-12-9-11	11-9-10-9
	P34	P35	P36	P37	P38	P39	P40	P41	P42	P43	P44
M1	---	---	---	---	---	4	5	---	---	---	5
M2	---	---	---	---	2	5	2	---	---	---	---
M3	---	---	---	---	---	---	---	---	4	8	---
M4	---	---	---	---	---	---	---	1	8	---	---
M5	---	---	---	---	4	---	---	---	---	---	3
M6	---	---	---	---	---	---	---	8	3	4	---
M7	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
M8	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
M9	---	---	---	---	3	---	---	---	---	---	---
M10	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
M11	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
M12	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
M13	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	4
M14	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
M15	6	---	4	5	---	---	---	---	---	---	---
M16	2	5	6	1	---	---	---	---	---	---	---
M17	1	3	2	3	---	---	---	---	---	---	---
M18	3	7	---	6	---	---	---	---	---	---	---
M19	---	---	---	---	3	5	7	---	---	---	1
M20	---	---	---	---	---	2	---	7	7	2	---
R:	16-15-18-17	17-16-18	16-17-16-15	15-17-16-18	19-5-2-5	20-19-1-2	2-19-1-19	6-4-6-20	3-20-4-6	20-3-6-3	5-13-19-1

P: Parça, M: Makine, R: Rotalar

<i>İşlem süreleri: Her bir makinede işlem gören iş için</i>											
	P78	P79	P80	P81	P82	P83	P84	P85	P86	P87	P88
M1	2	3	---	---	---	---	---	---	---	---	---
M2	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	4
M3	---	---	3	3	---	---	---	---	2	---	---
M4	---	---	2	1	---	---	3	---	1	---	---
M5	---	2	---	4	---	---	---	---	---	---	---
M6	---	---	---	---	5	1	---	---	4	---	---
M7	---	---	---	---	---	---	---	---	---	1	5
M8	---	---	---	---	---	---	---	---	---	3	---
M9	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
⋮	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
M13	---	---	---	---	---	---	---	---	---	4	3
M14	---	---	---	---	---	---	---	1	---	---	2
⋮	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
M19	3	4	---	---	---	---	---	---	---	---	---
M20	---	---	1	2	1	---	1	---	3	---	---
⋮	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
M29	---	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---
M30	---	---	---	---	2	---	2	2	---	---	---
M31	---	---	---	---	3	2	---	3	---	---	---
M32	---	---	---	---	4	3	---	4	---	---	---
M33	---	---	---	---	---	---	---	---	---	2	1
R:	19-1-2-1	5-1-29-19	4-3-20	20-5-4-3	20-6-32-31-30	31-6-32-6	4-30-20	14-30-32-31	6-3-4-20	8-13-7-33	14-2-33-13-7
	P89	P90	P91	P92	P93						
M5	---	---	---	---	4						
M6	---	---	---	---	---						
M7	---	---	---	---	---						
M8	1	3	---	---	---						
M9	---	---	1	3	1						
M10	---	4	3	1	2						
M11	---	---	2	2	3						
M12	---	---	---	---	---						
M13	2	2	---	---	---						
⋮	---	---	---	---	---						
M32	4	---	---	---	---						
M33	3	1	---	---	---						
R:	13-32-8-33	33-10-13-8	10-9-11	9-10-11	10-5-9-11						
<i>Taşıma süreleri: c. hücreden c'. hücresine; c satır ve c' sütun</i>											
c c'	H1	H2	H3	H4	H5	H6					
H1	---	3	5	4	8	5					
H2	4	---	8	5	4	4					
H3	6	5	---	3	3	7					
H4	5	4	3	---	2	6					
H5	7	5	7	2	---	5					
H6	6	4	6	8	5	---					
<i>Hazırlık süreleri: I. parça ailesinden I'. parça ailesine; I satır ve I' sütun</i>											
II'	PA1	PA2	PA3	PA4	PA5	PA6	PA7				
PA1	---	3	7	5	4	6	7				
PA2	4	---	4	8	2	4	6				
PA3	6	5	---	4	5	5	5				
PA4	6	5	6	---	6	8	3				
PA5	7	5	2	3	---	3	6				
PA6	5	3	5	6	3	---	5				
PA7	6	8	7	8	5	8	---				

P: Parça, PA: Parça ailesi, M: Makine, H: Hücre, R: Rotalar

Prob.	P/PA/M/H	Hücrelerdeki makineler					
		Hücre 1	Hücre 2	Hücre 3	Hücre 4	Hücre 5	Hücre 6
1	4/2/6/2	M1, M2(2) ^a	M3, M4(2)	---	---	---	---
2	5/2/6/2	M1, M2(2)	M3, M4(2)	---	---	---	---
3	4/2/7/2	M1, M2(2)	M3(2) , M4, M6	---	---	---	---
4	8/2/7/2	M1, M2(2)	M3(2) , M4, M6	---	---	---	---
5	4/2/6/2	M1, M2(2)	M3(2) , M4	---	---	---	---
6	6/2/6/2	M1, M2(2)	M3(2) , M4	---	---	---	---
7	6/2/8/2	M1, M2(2) , M5	M3, M4(2) , M6	---	---	---	---
8	7/3/7/2	M1(2) , M2(2)	M3, M4(2)	---	---	---	---
9	7/2/9/3	M1(2) , M2(2)	M3, M4	M7(2) , M8	---	---	---
10	7/3/8/3	M1, M2(2)	M3(2) , M4	M7, M8	---	---	---
11	8/4/11/4	M1, M2(2)	M3, M4(2)	M7(2) , M8	M9, M10	---	---
12	9/3/9/3	M1, M2(2) , M5	M3, M4(2)	M7, M8	---	---	---
13	10/4/11/4	M1, M2(2)	M3, M4(2)	M7(2) , M8	M9, M10	---	---
14	10/4/13/4	M1, M2(2) , M5	M3, M4(2) , M6	M7(2) , M8	M9, M10	---	---
15	11/3/11/3	M1, M2(2) , M5	M3, M4(2) , M6	M7(2) , M8	---	---	---
16	10/2/8/2	M1, M2(2) , M5	M3, M4(2) , M6	---	---	---	---
17	12/2/8/2	M1, M2(2) , M5	M3, M4(2) , M6	---	---	---	---
18	12/4/12/4	M1, M2(2) , M5	M3, M4(2) , M6	M7, M8	M9, M10	---	---
19	12/3/9/3	M1, M2(2) , M5	M3, M4(2)	M7, M8	---	---	---
20	14/4/13/4	M1, M2(2) , M5	M3, M4(2) , M6	M7(2) , M8	M9, M10	---	---
21	15/4/16/4	M1, M2(2) , M5	M3, M4(2) , M6	M7(2) , M8	M9(2) , M10, M11, M12	---	---
22	20/4/26/4	M1(3) , M2, M5, M19, M29	M3, M4, M6, M20(3) , M30, M31, M32	M7, M8, M13(3) , M14, M33	M9, M10, M11	---	---
23	20/5/26/5	M1(4) , M2, M5, M19, M29	M3, M4, M20(4) , M30	M7, M8, M13, M14, M33	M6, M31, M32	M9, M10, M11	---
24	22/4/27/4	M1, M2(6) , M5	M3, M4(6) , M6	M7, M8	M9, M10, M11(6) , M12	---	---
25	21/4/26/4	M1(5) , M2, M5	M3, M4(5) , M6	M7, M8(5) , M13, M14	M9, M10, M11, M12	---	---
26	24/4/22/4	M1, M2(3) , M5, M19	M3(3) , M4, M6, M20	M7, M8(3) , M13, M14	M9, M10, M11, M12	---	---
27	25/5/33/5	M1, M2(4) , M5	M3, M4(4) , M6	M7, M8(4) , M13, M14	M9(4) , M10, M11, M12	M15, M16(4) , M17, M18	---
28	25/5/35/5	M1, M2(4) , M5, M19	M3, M4, M6(4) , M20	M7, M8(4) , M13, M14	M9, M10, M11(4) , M12	M15, M16, M17(4) , M18	---
29	26/5/38/5	M1, M2(7)	M3, M4(7)	M7, M8(7) , M14	M9, M10(7) , M11	M15, M16, M17, M18	---

^a Parantez içindeki değer, problem esnek ortamdaysa Makine 2 için iki özdeş paralel makine olduğunu gösterir. Atölye tipi ortamda özdeş paralel makine mevcut değildir.

P: Parça, PA: Parça ailesi, M: Makine, H: Hücre+

Prob.	P/PA/M/H	Hücrelerdeki makineler					
		Hücre 1	Hücre 2	Hücre 3	Hücre 4	Hücre 5	Hücre 6
30	27/5/30/5	M1(3)^b, M2(3), M5	M3, M4(3) , M6	M7, M8(3) , M13, M14	M9, M10(3) , M11, M12	M15, M16(3) , M17, M18	---
31	27/5/30/5	M1(3), M2(3), M5	M3, M4(3) , M6	M7, M8(3) , M13, M14	M9, M10(3) , M11, M12	M15, M16(3) , M17, M18	---
32	27/5/40/5	M1(3) , M2, M5, M19(3)	M3, M4(3), M6(3) , M20	M7, M8(3) , M13, M14(3)	M9(3) , M10, M11(3) , M12	M15, M16(3) , M17(3) , M18	---
33	27/5/40/5	M1(2) , M2, M5, M19	M3, M4, M6(5) , M20	M7, M8(6) , M13, M14(7)	M9, M10, M11(4) , M12	M15, M16, M17(2) , M18	---
34	27/5/29/5	M1, M2, M5, M19	M3, M4, M6, M20	M7, M8(2) , M13, M14	M9(2) , M10, M11(3) , M12(3) , M21	M15, M16(2) , M17, M18, M22	---
35	30/5/26/5	M1, M2, M5(2) , M19	M3, M4, M6(2) , M20	M7, M8, M13, M14(3)	M9(3) , M10, M11, M12	M15, M16, M17, M18	---
36	30/5/30/5	M1(2), M2(3)	M3, M4(2)	M7, M8, M13, M14(4)	M9(2), M10(4) , M11(3) , M12	M15, M16(2) , M17, M18	---
37	35/5/30/5	M1(2), M2(2) , M5	M3(3), M4(3) , M6	M7, M8(2) , M13, M14(2)	M9(2), M10(3) , M11(2) , M12	M15, M16, M17, M18	---
38	30/4/25/4	M1, M2, M5, M19	M3(2) , M4, M6, M20	M7, M8(2) , M13, M14	M9(2), M10(3) , M11(2), M12(2) , M21	---	---
39	35/5/27/5	M1, M2, M5, M19	M3, M4, M6(2) , M20	M7, M8(3) , M13, M14	M9, M10, M11(2) , M12, M21	M15, M16(2) , M17, M18, M22	---
40	40/6/25/6	M1(2), M2(2)	M3, M4(2)	M7, M8, M14	M9(2), M10(2) , M11	M15, M16, M17, M18	M23, M24, M25, M26, M27, M28
41	45/6/28/6	M1(2), M2(2)	M3, M4(2)	M7, M8(2) , M13, M14	M9(2), M10(2) , M11, M12	M15, M16, M17, M18	M23, M24, M25, M26, M27, M28
42	50/6/30/6	M1(2), M2(3) , M5, M19	M3, M4(2)	M7, M8, M13, M14	M9(2), M10(2) , M11, M12	M15, M16, M17, M18	M23, M24, M25, M26, M27, M28

^b Parantez içindeki değer, problem esnek ortamdaysa Makine 1 için üç özdeş paralel makine olduğunu gösterir. Atölye tipi ortamda özdeş paralel makine mevcut değildir.

P: Parça, PA: Parça ailesi, M: Makine, H: Hücre

Prob.	P/PA/M/H	Parça ailelerindeki parçalar						
		PA1	PA2	PA3	PA4	PA5	PA6	PA7
1	4/2/6/2	P2, P9	P4, P22	---	---	---	---	---
2	5/2/6/2	P2, P9	P4, P22, P23	---	---	---	---	---
3	4/2/7/2	P2, P9	P4, P11	---	---	---	---	---
4	8/2/7/2	P1, P2, P5, P9	P4, P11, P12, P22	---	---	---	---	---
5	4/2/6/2	P1, P2	P3, P4	---	---	---	---	---
6	6/2/6/2	P1, P2, P5	P3, P4, P6	---	---	---	---	---
7	6/2/8/2	P7, P8, P9	P10, P11, P12	---	---	---	---	---
8	7/3/7/2	P1, P2, P5	P3, P4	---	---	P13, P14	---	---
9	7/2/9/3	P1, P2, P5, P9	P15, P16, P17	---	---	---	---	---
10	7/3/8/3	P1, P2, P5	P3, P4	P15, P16	---	---	---	---
11	8/4/11/4	P1, P2	P3, P4	P15, P16	P18, P19	---	---	---
12	9/3/9/3	P1, P7, P8	P3, P4, P6	P15, P16, P17	---	---	---	---
13	10/4/11/4	P1, P2, P5	P3, P4, P6	P15, P16	P18, P19	---	---	---
14	10/4/13/4	P1, P7, P8	P10, P11, P12	P15, P16	P18, P19	---	---	---
15	11/3/11/3	P2, P5, P7, P8	P10, P11, P12, P22	P15, P16, P17	---	---	---	---
16	10/2/8/2	P2, P5, P7, P8, P9	P4, P10, P11, P12, P22	---	---	---	---	---
17	12/2/8/2	P2, P5, P7, P8, P9	P4, P6, P10, P11, P12, P22, P23	---	---	---	---	---
18	12/4/12/4	P2, P7, P8	P10, P11, P12, P22	P15, P16, P17	P18, P24	---	---	---
19	12/3/9/3	P2, P5, P7, P8	P4, P6, P10, P22, P23	P15, P16, P17	---	---	---	---
20	14/4/13/4	P1, P5, P7, P9	P3, P6, P10, P11, P12	P15, P16, P17	P18, P19	---	---	---
21	15/4/16/4	P1, P2, P5, P7	P3, P6, P11, P12	P15, P16, P17	P18, P19, P20, P21	---	---	---
22	20/4/26/4	P74, P75, P76, P77, P78, P79	P80, P81, P82, P83, P84, P85, P86	P87, P88, P89, P90	P91, P92, P93	---	---	---
23	20/5/26/5	P74, P75, P76, P77, P78, P79	P80, P81, P84, P86	P87, P88, P89, P90	P82, P83, P85	P91, P92, P93	---	---
24	22/4/27/4	P1, P2, P5, P7, P8, P9	P3, P4, P6, P10, P11, P12, P22, P23	P15, P16, P17	P20, P21, P49, P90, P92	---	---	---
25	21/4/26/4	P1, P2, P5, P7, P8	P3, P4, P11, P22, P31	P25, P26, P27, P28, P29, P30	P20, P21, P32, P33, P49	---	---	---
26	24/4/22/4	P2, P8, P38, P39, P40, P44	P10, P11, P22, P31, P41, P42, P43	P25, P26, P27, P28, P29, P30	P19, P20, P21, P32, P33	---	---	---
27	25/5/33/5	P1, P2, P5, P7, P8	P3, P4, P6, P10, P11, P22	P25, P26, P28, P29, P30	P19, P20, P21, P32, P33	---	P34, P35, P36, P37	---

P: Parça, PA: Parça ailesi, M: Makine, H: Hücre

Prob.	P/PA/M/H	Parça ailelerindeki parçalar						
		PA1	PA2	PA3	PA4	PA5	PA6	PA7
28	25/5/35/5	P8, P38, P39, P40, P44	P12, P31, P41, P42, P43	P25, P26, P28, P29, P30	P19, P20, P21, P32, P33	---	P34, P35, P36, P37, P45	---
29	26/5/38/5	P1, P2, P5, P9	P3, P4, P6, P10, P22, P23	P15, P16, P17, P30, P47, P48	P18, P19, P24, P33, P46	---	P34, P35, P36, P37, P45	---
30	27/5/30/5	P1, P2, P5, P7, P8	P3, P4, P6, P10, P11, P22	P25, P26, P28, P29, P30, P47, P48	P19, P20, P21, P32, P33	---	P34, P35, P36, P37	---
31	27/5/30/5	P1, P2, P5, P7, P8	P3, P4, P6, P10, P11, P22	P25, P26, P28, P29, P30, P47, P48	P19, P20, P21, P32, P33	---	P34, P35, P36, P37	---
32	27/5/40/5	P8, P38, P39, P40, P44	P12, P31, P41, P42, P43	P25, P26, P28, P29, P30, P47, P48	P19, P20, P21, P32, P33	---	P34, P35, P36, P37, P45	---
33	27/5/40/5	P8, P38, P39, P40, P44	P12, P31, P41, P42, P43	P25, P26, P28, P29, P30, P47, P48	P19, P20, P21, P32, P33	---	P34, P35, P36, P37, P45	---
34	27/5/29/5	P8, P38, P39, P40	P31, P41, P42, P43	P25, P26, P29, P30	P20, P21, P32, P33, P49, P50, P51, P52	---	P34, P35, P36, P37, P53, P54, P55	---
35	30/5/26/5	P7, P8, P38, P39, P40, P44	P12, P31, P41, P42, P43	P25, P26, P28, P29, P30, P47, P48	P19, P20, P21, P32, P33, P46, P49	---	P34, P35, P36, P37, P45	---
36	30/5/30/5	P1, P2, P9, P69, P70, P71	P3, P4, P6, P10, P23	P25, P26, P28, P29, P30, P47, P48	P19, P20, P21, P32, P33, P46, P49	---	P34, P35, P36, P37, P45	---
37	35/5/30/5	P1, P2, P5, P7, P8, P9	P3, P4, P6, P10, P11, P12, P22, P58, P59	P25, P26, P28, P29, P30, P47, P48	P19, P20, P21, P32, P33, P49, P56, P57	---	P34, P35, P36, P37, P45	---
38	30/4/25/4	P2, P8, P38, P39, P40, P44	P10, P11, P22, P31, P41, P42, P43	P25, P26, P27, P28, P29, P30	P19, P20, P21, P32, P33, P49, P50, P51, P52, P56, P57	---	---	---
39	35/5/27/5	P5, P7, P8, P38, P39, P40, P44	P31, P41, P42, P43, P58, P59	P25, P26, P27, P28, P29, P30, P48	P20, P21, P32, P33, P49, P50, P51, P52	---	P34, P35, P36, P37, P53, P54, P55	---
40	40/6/25/6	P1, P2, P5, P9, P69, P70, P71, P72	P3, P4, P6, P10, P22, P23, P73	P15, P16, P17, P30, P47, P48	P18, P19, P24, P33, P46, P67, P68	---	P34, P35, P36, P37, P45	P60, P61, P62, P63, P64, P65, P66
41	45/6/28/6	P1, P2, P5, P9, P69, P70, P71, P72	P3, P4, P6, P10, P22, P23, P73	P15, P16, P17, P27, P28, P29, P30, P47, P48	P18, P20, P21, P24, P32, P33, P49, P67, P68	---	P34, P35, P36, P37, P45	P60, P61, P62, P63, P64, P65, P66
42	50/6/30/6	P1, P2, P5, P7, P8, P9, P38, P40, P44, P69, P70, P71, P72	P3, P4, P6, P10, P22, P23, P73	P15, P16, P17, P27, P28, P29, P30, P47, P48	P18, P20, P21, P24, P32, P33, P49, P67, P68	---	P34, P35, P36, P37, P45	P60, P61, P62, P63, P64, P65, P66

P: Parça, PA: Parça ailesi, M: Makine, H: Hücre

EK 3: Uygulama problemine ait veri seti

<i>Taşıma süreleri</i> ^a : c. hücreden c'. hücresine; c satır ve c'sütun				
c c'	Hücre 1	Hücre 2	Hücre 3	Hücre 4
Hücre 1	---	12.14	18.19	21.25
Hücre 2	25.50	---	10.20	21.30
Hücre 3	9.53	16.45	---	25.26
Hücre 4	24.31	15.15	19.25	---
<i>Hazırlık süreleri</i> ^a : l. parça ailesinden l'. parça ailesine; l satır ve l'sütun				
l l'	PA 1	PA 2	PA 3	PA 4
PA 1	---	35.45	65.25	49.50
PA 2	75.35	---	45.45	25.47
PA 3	65.33	58.45	---	35.25
PA 4	79.26	55.33	25.45	---
<i>Teslim süreleri</i> ^a : Her bir iş için				
Parça	TS	Parça	TS	
P1	1434.50	P30	1226.12	
P2	1182.31	P31	1565.37	
P3	1283.20	P32	936.32	
P4	243.05	P33	1190.45	
P5	326.12	P34	736.38	
P6	586.01	P35	162.46	
P7	15.01	P36	837.21	
P8	795.33	P37	1073.14	
P9	962.56	P38	211.33	
P10	894.01	P39	1172.02	
P11	340.44	P40	1474.12	
P12	559.06	P41	225.59	
P13	1172.01	P42	24.34	
P14	1137.25	P43	263.27	
P15	586.03	P44	152.36	
P16	571.24	P45	864.19	
P17	1511.45	P46	1375.29	
P18	903.53	P47	1620.20	
P19	1337.16	P48	255.13	
P20	255.10	P49	1195.01	
P21	1574.27	P50	1665.40	
P22	194.47	P51	1616.37	
P23	1620.39	P52	1615.22	
P24	750.30	P53	1307.33	
P25	1552.30	P54	326.42	
P26	1180.14	P55	1441.05	
P27	829.04	P56	925.04	
P28	1555.08	P57	552.21	
P29	568.43	P58	1578.50	

^a Süreler dakika cinsindendir.

P: Parça, PA: Parça ailesi, TS: Teslim süresi

ÖZGEÇMİŞ

Derya DELİKTAŞ, 22.08.1984 tarihinde doğdu. İlk eğitimini Ziya Gökalp İlköğretim Okulu'nda, orta eğitimini Fevzipaşa Lisesi'nde, lise eğitimini İslahiye Opet Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2008 yılında Erciyes Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2009 yılında Dumlupınar Üniversitesi'nde Yüksek Lisans eğitimine başlayıp, 2011 yılında mezun oldu. 2011 yılı Eylül ayında Sakarya Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümünde Doktora Programı'na başladı. 2008 yılında Dumlupınar Üniversitesi'nde Araştırma Görevlisi kadrosuna atandı ve halen Araştırma Görevlisi olarak Dumlupınar Üniversitesi'nde görev yapmaktadır. .