



**ÜRETİM KARARLARININ ALINMASINDA META-SEZGİSEL
ALGORİTMALARIN KULLANILMASI: BİR UYGULAMA**

Rüveyda KARABUDAK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
YÖNETİM BİLİŞİM SİSTEMLERİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Rüveyda KARABUDAK

...../...../.....

ÜRETİM KARARLARININ ALINMASINDA META-SEZGİSEL ALGORİTMALARIN KULLANILMASI: BİR UYGULAMA

(Yüksek Lisans Tezi)

Rüveyda KARABUDAK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ

Haziran 2022

ÖZET

Çizelgeleme, genel olarak işlerin kısıtlı kaynakları nasıl kullanacağına yönelik bir karar verme sürecidir. İşlerin zamanında, olabilecek en az maliyetle ve kaynakları verimli kullanacak şekilde yapılması çizelgelemedeki önemli amaçlar arasındadır. Sipariş teslimlerindeki gecikmeler ile ortaya çıkan maliyet artışları, işletmeler açısından önlenmesi gereken önemli bir problemdir. Bu çalışmada esnek atölye tipi çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Ele alınan üretim ortamında süreç, vardiyalara bölünmüştür. Kendilerine has rotası bulunan işlere ait operasyonların alternatif makinelerden birinde işleme alınıp aynı vardiya içerisinde tamamlanmış olmaları gerekmektedir. Öncelikle vardiya kısıtı içeren yeni problemin tanımı yapılmış, karışık tamsayılı matematiksel programlama modeli kurulmuş ve probleme özgü olarak genişletilmiş küçük boyutlu test problemleri üzerinde matematiksel modelin performansı analiz edilmiştir. Analiz sonuçları, NP-zor sınıfında yer alan problemin büyük boyutlu gerçek hayat örneklerinin optimal sonuçlarının makul çözüm zamanlarında bulunamayacağını göstermiş, bu nedenle literatüre uygun olacak şekilde meta-sezgisel yöntemlere başvurulmuştur. Orta ve büyük boyutlu problemlerin çözümü için tavlama benzetimi algoritması geliştirilmiş ve parametre optimizasyonu yoluyla uygun parametre değerleri belirlenmiştir. Algoritma sonuçları matematiksel modelin bulduğu optimal çözüm değerleriyle karşılaştırılmış ve kabul edilebilir bir performans sergilediği görülmüştür. Son olarak önerilen sezgisel algoritmayla bir firmada tespit edilen esnek atölye tipi çizelgeleme problemi çözülmüş ve firmanın uyguladığı mevcut çizelge ile karşılaştırması yapılarak iyileşme oranı hesaplanmıştır.

Bilim Kodu : 114606

Anahtar Kelimeler : Esnek atölye çizelgeleme, üretim çizelgeleme, vardiya

Sayfa Adedi : 71

Danışman : Doç. Dr. Talip KELLEĞÖZ

USING META-HEURISTIC ALGORITHMS IN MAKING PRODUCTION

DECISIONS: A CASE STUDY

(M. Sc. Thesis)

Rüveyda KARABUDAK

GAZİ UNIVERSITY

INFORMATICS INSTITUTE

Haziran 2022

ABSTRACT

In general, scheduling is a decision-making process for how jobs will use resources. Some of important objectives of scheduling are to get the jobs done on time with the least possible cost and to use resources efficiently. Cost increases caused by delays in order deliveries is an important problem that needs to be prevented by businesses. In this study, the flexible job shop scheduling problem is discussed. In the production environment under consideration, the production horizon is divided into shifts. The operations of the jobs with their own route must be processed on one of the alternative machines and must be started and completed within the same shift. First, the formal definition of the new problem with shift constraints was made, the mixed integer programming model was developed, and the performance of the mathematical formulation was analyzed on the problem-specific extended benchmark instances. The results of the analysis showed that the optimal solutions of large-scale real-life instances of this NP-hard problem could not be found. Therefore, meta-heuristic methods were used in accordance with the literature. Simulated annealing algorithm has been developed for the solution of medium and large sized problem instances, and appropriate parameter values have been determined through parameter tuning study. The results obtained with the algorithm were compared with the optimal solutions found by the mathematical model and showed an acceptable performance. Finally, real-life problem instance determined in a company was solved with the proposed heuristic algorithm. The improvement rate was calculated by comparing the resulting solution with the real schedule applied by the company.

Science Code : 114606

Key Words : Flexible job shop scheduling, manufacturing scheduling, shift

Page Number : 71

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Talip KELLEĞÖZ

TEŞEKKÜR

Yaptığım alıŐma sűresince bana yűn gűsteren, her konuda yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen, űğrencisi olmaktan her zaman gurur duyacađım deđerli Hocam Do. Dr. Talip KELLEĐÖZ'e tűm içtenliđimle teŐekkűr ederim. Hayatımın her anında olduđu gibi tez çalıŐmam boyunca da beni destekleyen sevgili eŐim Sűleyman KARABUDAK'a sabır ve anlayıŐından dolayı teŐekkűr ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ	1
2. ÇİZELGELEME PROBLEMLERİ.....	5
2.1. Terminoloji ve Tanımlar	5
2.2. Üretim Sistemlerinde Çizelgeleme.....	6
2.2.1. Çizelgeleme problemlerinin sınıflandırılması.....	8
2.3. Hizmet sistemlerinde çizelgeleme.....	14
2.4. Literatürde Kullanılan Çözüm Yöntemleri	14
2.4.1. Analitik yöntemler	15
2.4.2. Sezgisel yöntemler	16
3. PROBLEM TANIMI.....	19
4. LİTERATÜR TARAMASI.....	21
4.1. Analitik Yöntemlere İlişkin Çalışmalar	21
4.2. Sezgisel Yöntemlere İlişkin Çalışmalar	24
5. ÖNERİLEN ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI.....	31
5.1. Problemin Matematiksel Modeli	31
5.2. Önerilen Tavlama Benzetimi Algoritması.....	34

	Sayfa
5.2.1. Çözüm temsili	37
5.2.2. Başlangıç çözümü	38
5.2.3. Yerel arama yöntemi	38
5.2.4. Hareket mekanizması	38
5.2.5. Soğutma planı.....	39
6. DENEYSEL ÇALIŞMA	41
6.1. Test Problemleri	41
6.2. Karışık Tamsayı Programlama Modeli Performans Analizi	41
6.3. Tavlama Benzetimi Algoritması İçin Parametre Analizi	45
6.4. Önerilen Tavlama Benzetimi Algoritması Performans Analizi	45
7. GERÇEK HAYAT PROBLEMİ ÜZERİNDE UYGULAMA	47
7.1. Atölye Ortamı	47
7.2. Ele Alınan Problem ve Sistemin Mevcut Durumu	48
7.3. Problemin Önerilen Sezgiselle Çözümü	53
8. KARAR DESTEK SİSTEMİ	55
9. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	61
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	71

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Analitik yöntemlere ilişkin çalışmalar	24
Çizelge 4.2. Sezgisel yöntemlere ilişkin çalışmalar.....	30
Çizelge 6.1. c katsayısı ve vardiya süresi değişimine göre amaç fonksiyonu değerleri .	42
Çizelge 6.2. Vardiya süresi değişiminde optimal çözümü bulma durumu	43
Çizelge 6.3. c katsayısı değişiminde optimal çözümü bulma durumu.....	43
Çizelge 6.4. Tüm test problemlerinin amaç fonksiyonu değerleri.....	44
Çizelge 6.5. Parametre analizinde kullanılan değerler.....	45
Çizelge 6.6. Tavlama benzetimi algoritması ile bulunan sonuçlar	46
Çizelge 7.1. Operasyonların makinelerdeki işlem süreleri	48
Çizelge 7.2. İşlerin teslim tarihleri ve ağırlıkları	51
Çizelge 7.3. Mevcut çözüm ve önerilen çözüm karşılaştırması	53

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Üretim alanındaki bilgi akışı diyagramı	7
Şekil 2.2 Teslim tarihi ile cezalandırma ilişkisi.....	13
Şekil 5.1. Tavlama benzetimi algoritması sözde kodu	36
Şekil 7.1. Atölye ortamı	47
Şekil 7.2. Mevcut çizelge.....	52
Şekil 7.3. Önerilen çizelge	54
Şekil 8.1. Karar destek sistemi ana ekranı	55
Şekil 8.2. Karar destek sistemi problem tanımı ekranı	56
Şekil 8.3. Karar destek sistemi makine tanımı ekranı.....	56
Şekil 8.4. Karar destek sistemi işler sekmesi	57
Şekil 8.5. Karar destek sistemi iş tanım ekranı	57
Şekil 8.6. Karar destek sistemi işlem süresi ekranı.....	58
Şekil 8.7. Karar destek sistemi çizelge görselleştirme ekranı, vardiya seçimi	58
Şekil 8.8. Karar destek sistemi çizelge görselleştirme ekranı, gantt şeması.....	59

SİMGELER

Bu çalışmada kullanılmış simgeler, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
$batch(b)$	Bir makinede, b adede kadar olan işlerin aynı anda işlem görebilmesi
$block$	Engelleme
$brkdwn$	Makine arızaları
C_{hn}	h işinin n operasyonunun tamamlanma zamanı
C_{jl}	j işinin l operasyonunun tamamlanma zamanı
C_{jnoo_j}	j işinin son operasyonunun tamamlanma zamanı
C_{max}	En büyük tamamlanma zamanı
d_j	j işinin teslim tarihi
e_{jli}	Operasyon karar değişkeni (0 ya da 1)
FJ_c	Esnek atölye tipi üretim ortamı
FF_c	Esnek akış tipi üretim ortamı
F_j	j işinin tamamlanma zamanı
F_m	Akış tipi üretim ortamı
$fmls$	Aynı aileden olan işlerin farklı işlem sürelerine sahip olması
$f(s)$	Üretilen komşunun amaç fonksiyonu
$f(s_0)$	Başlangıç çözümünün amaç fonksiyonu
$f(s_{iyi})$	İyi çözümün amaç fonksiyonu
i	Makine indisi
j	İş indisi
J_m	Atölye tipi üretim ortamı
L_{max}	En büyük gecikme
L_j	j işinin teslim tarihinden sapma süresi
m	Toplam makine sayısı
M	Çok büyük pozitif sayı

Simgeler**Açıklamalar**

M_j	j işini işleyebilen makine grubu
n	Toplam iş sayısı
noo_j	j işinin operasyon sayısı
nwt	İşlerin sıralı makineler arasında işlem görmek için beklemesine izin verilmemesi
O_{jl}	j işinin l operasyonu
O_m	Açık Atölye Tipi üretim ortamını
P_m	Paralel m adet özdeş makineli üretim ortamı
P_{ji}	i makinesindeki j işinin işlem süresini ifade eder.
P_{jli}	j işinin l operasyonunun i makinesindeki işlem süresi
$prec$	Öncelik kısıtlamaları
$prmp$	İşlerin bölünebilirliği
$rcrc$	Bir işin aynı makineyi tekrar ziyaret etmesi durumu
r_j	Serbest bırakma zamanı
R_m	Farklı m adet paralel makineli üretim ortamı
s	Üretilen komşu
s_0	Başlangıç çözümü
s_{iyi}	İyi çözüm
s_{jk}	Sıra bağımlı hazırlık süresi
S_{jl}	j işinin l operasyonunun başlama zamanını
Q_m	Farklı hızlarda m adet paralel makineli üretim ortamı
w_j	j işinin ağırlığı
T	Sıcaklık
T_j	j işinin geç tamamlanma süresi
T_{son}	Son Sıcaklık
U_j	j işinin birim cezası
v_{jl}	j işinin l operasyonunun gerçekleştirildiği vardiya
vs	Vardiya uzunluğu
X_{jlhn}	Pozisyon tabanlı karar değişkeni (0 ya da 1)
Y_{jli}	Makine karar değişkeni (0 ya da 1)

Simgeler**Açıklamalar** α

Makine ortamı türü

 β

İşlem karakteristiği

 γ

Amaç fonksiyonu türü

 μ

Markov zinciri uzunluğu

 θ

Hareket mekanizması seçim olasılığı

 σ

Soğutma oranı



1. GİRİŞ

Çizelgeleme, kısıtlı kaynakların yapılması gereken işlere atanması ve işlerin her bir kaynağı kullanma sırası ve zamanlarının belirlenmesi sürecidir [1]. Üretim tesislerinde siparişleri tamamlamak üzere ihtiyaç planlaması yapılmakta ve bu plana uygun olarak üretimin çizelgelenmesi beklenmektedir. Çizelgeleme sürecinde verilen kararlar gerek üretim maliyetleri gerekse müşteri tatmini açısından büyük önem arz eder. Çizelge oluşturulurken yapılması gereken işler, gerekli kaynaklar, işlem süreleri, işlerin önem dereceleri, işlerin öncelikleri ve çizelgeleme hedefleri gibi konuların göz önünde bulundurulması gerekir. Çizelgeleme sürecinin sonucunda doğru zamanda, doğru miktarda üretim yapılmış olması hedeflenir [2].

Siparişlerin geç teslim edilmesi çoğunlukla maliyet artışına sebep olup, bu da işletmeler açısından ciddi bir problemdir. Verimli kapasite kullanımı ve müşteri memnuniyetinin artırılması işletmeye rekabet avantajı sağlamaktadır. Bu nedenle üretim sistemlerinde çizelgelemenin önemi gittikçe artmaktadır [1].

Bu çalışmada atölye tipi çizelgeleme probleminin genelleştirilmiş bir hali olan esnek atölye tipi çizelgeleme problemi ele alınmıştır [3]. Çizelgeleme problemleri arasındaki zorluk hiyerarşisinde üstlerde yer alan bu problem tipi, sahada tespit edilen bir gerçek hayat problemine uyarlanmıştır. İncelenen üretim ortamında; işlerin kendine has rotaları bulunmaktadır. İşlere ait operasyonlar için en az bir tane olmak üzere alternatif makineler mevcuttur. Firmada vardiyalar halinde çalışılmaktadır ve operasyonların işleme alındığı vardiyada tamamlanmış olması gerekmektedir. İşlerin önem dereceleri aynı değildir. Problemin amaç fonksiyonu işlerin ağırlıklı geç tamamlanma süreleri toplamının en küçüklenmesidir.

Firmada mevcut durumda çizelgeleme işlemi, üretim planlama uzmanları tarafından üretim ortamındaki koşullara dikkate alınarak tecrübeye dayalı sıralama ve atama işlemleri yapılarak gerçekleştirilmektedir. Manuel olarak gecikme hesaplanması ve atama işlemleri üretim kapasitesinin büyüklüğünden dolayı uzun zaman almakta ve firmaya mali yük oluşturmaktadır.

Problemin çözümünün elde edilme süresi, girdi sayısının polinom fonksiyonuyla ifade edilebiliyorsa bu algoritmalar polinom zamanlı olarak adlandırılır. NP-zor sınıfında yer alan problemlerin optimal çözümünü verebilecek polinom zamanlı algoritma bulunmaz [1]. Çizelgeleme problemlerinin büyük bölümü NP-zor problem sınıfına girer [4]. Gerçek hayat problemlerinde, problem boyutundaki artış nedeniyle optimal çizelgenin bulunması çoğunlukla makul olmayan çözüm zamanları gerektirir. Bu nedenle problemlerin çözümü için sezgisel yöntemlerden sıkça faydalanılmaktadır [5].

Bu çalışmanın amacı klasik esnek atölye tipi çizelge probleminin vardiya süreleri içerisinde üretim yapılması kısıtı eklenmiş halinin tanımlanması ve çözüm önerisi geliştirilmesidir. Öncelikle problem formal olarak tanımlanmış ve matematiksel modeli oluşturulmuştur. Karışık tamsayılı programlama ile literatürde kullanılan çeşitli boyutlardaki test problemleri çözülmüştür ve sadece küçük boyutlu problemlerin optimal sonuçlarının kabul edilebilir sürelerde elde edildiği görülmüştür. Orta ve büyük boyutlu problemlerin çözümü için bir tavlama benzetimi algoritması geliştirilmiş ve parametre optimizasyonu yoluyla uygun parametre değerleri belirlenmiştir. Test problemlerinin geliştirilen sezgisel algoritma ile çözümünden elde edilen sonuçlar optimal çözüm değerleriyle karşılaştırılarak algoritmanın performansı ölçülmüştür. Son olarak çalışmada ele alınan gerçek hayat problemi çözülmüş ve firmanın uyguladığı mevcut çizelge ile karşılaştırma yapılarak iyileşme oranı hesaplanmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde, çizelgeleme problemlerinin sınıflandırılması, hiyerarşisi, esnek atölye tipi çizelgeleme problemi ve bu problem için literatürde kullanılan çözüm yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde çalışmaya konu olan esnek atölye tipi üretim yapan firmaya ait üretim ortamı, çizelgeleme problemine ait kısıtlar ve varsayımlar hakkında bilgi verilmiş ve problemin formal tanımı yapılmıştır. Esnek atölye tipi çizelgeleme problemine yönelik geçmiş akademik çalışmaların incelenmesi yoluyla oluşturulan literatür taraması bölüm dört kapsamında sunulmuştur. Beşinci bölüm ise ele alınan problem için geliştirilen matematiksel formülasyonu ve önerilen tavlama benzetimi algoritmasını içermektedir. Önerilen karışık tamsayılı programlama modeli ve tavlama benzetimi algoritması çözüm yaklaşımlarının etkinlileri altıncı bölümde yer alan deneysel çalışma yoluyla test edilmiştir. Çalışmanın yedinci bölümünde ele alınan üretim ortamı ve problemin karakteristikleri verilmiş ve mevcut durumu ile önerilen çözümü arasında karşılaştırma yapılmıştır. Geliştirilen tavlama benzetimi algoritmasını karar destek modeli

olarak kullanılan karar destek sistemi ise sekizinci bölümde sunulmuş olup, dokuzuncu bölüm ise değerlendirme ve sonuç bilgilerini içermektedir.





2. ÇİZELGELEME PROBLEMLERİ

Çizelgeleme problemlerinin genel amacı; işleri olabilecek en az maliyetle tamamlayıp müşteriye teslim etmek ve kaynakları etkin kullanmaktır. Çizelgeleme sürecinde göz önünde bulundurulması gereken nokta kaynakların her zaman kısıtlı, eldeki işlerin ise çoğunlukla dinamik ve değişken olmasıdır. Kaynaklar ve işler ele alınan sisteme bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Yapılacak işlerin doğru ve sistematik bir yaklaşımla çizelgelenmesi tüm sistemlerde verimlilik elde edilmesini, sipariş gecikmelerinin ve fazla mesai maliyetlerinin azaltılmasını sağlamaktadır. Çizelgeleme hayatın her yerinde olduğu için akademik açıdan çizelgeleme problemleri hizmet sistemlerinde çizelgeleme ve üretim sistemlerinde çizelgeleme problemleri olarak iki farklı başlık altında incelenebilir [6].

2.1. Terminoloji ve Tanımlar

Üretim sistemlerinde karşılaşılan problemler, çizelgeleme yaklaşımının gelişiminde önemli rol oynamıştır. Bu nedenle de çizelgeleme problemlerinin üretim sistemlerinde kullanılan tanımlamalarla ifade edilmesi anlaşılabilirliği kolaylaştırmaktadır. Çizelgeleme üretim dışındaki sistemler söz konusu olsa da sıklıkla üretim terminolojisi kullanılmaktadır. Genellikle kaynaklar makinelerle, görevler ise işlerle ifade edilir. Bazı durumlarda işler, operasyon adı verilen temel görevlerden oluşur. Çizelgeleme probleminin ortamı ise atölye olarak adlandırılır [7].

Ele alınan tüm çizelgeleme problemlerinde iş ve makine sayısının sonlu olduğu varsayılır. Genellikle n , toplam iş sayısını ve m , toplam makine sayısını gösterir. j indisi işleri ifade ederken, i indisi makineleri, (j,i) ikilisi ise i makinesindeki j işinin adımını ifade eder. Aşağıda çizelgeleme problemi içerisinde kullanılan j işine ait bazı notasyonlar verilmiştir [1].

İşlem Süresi (P_{ji})

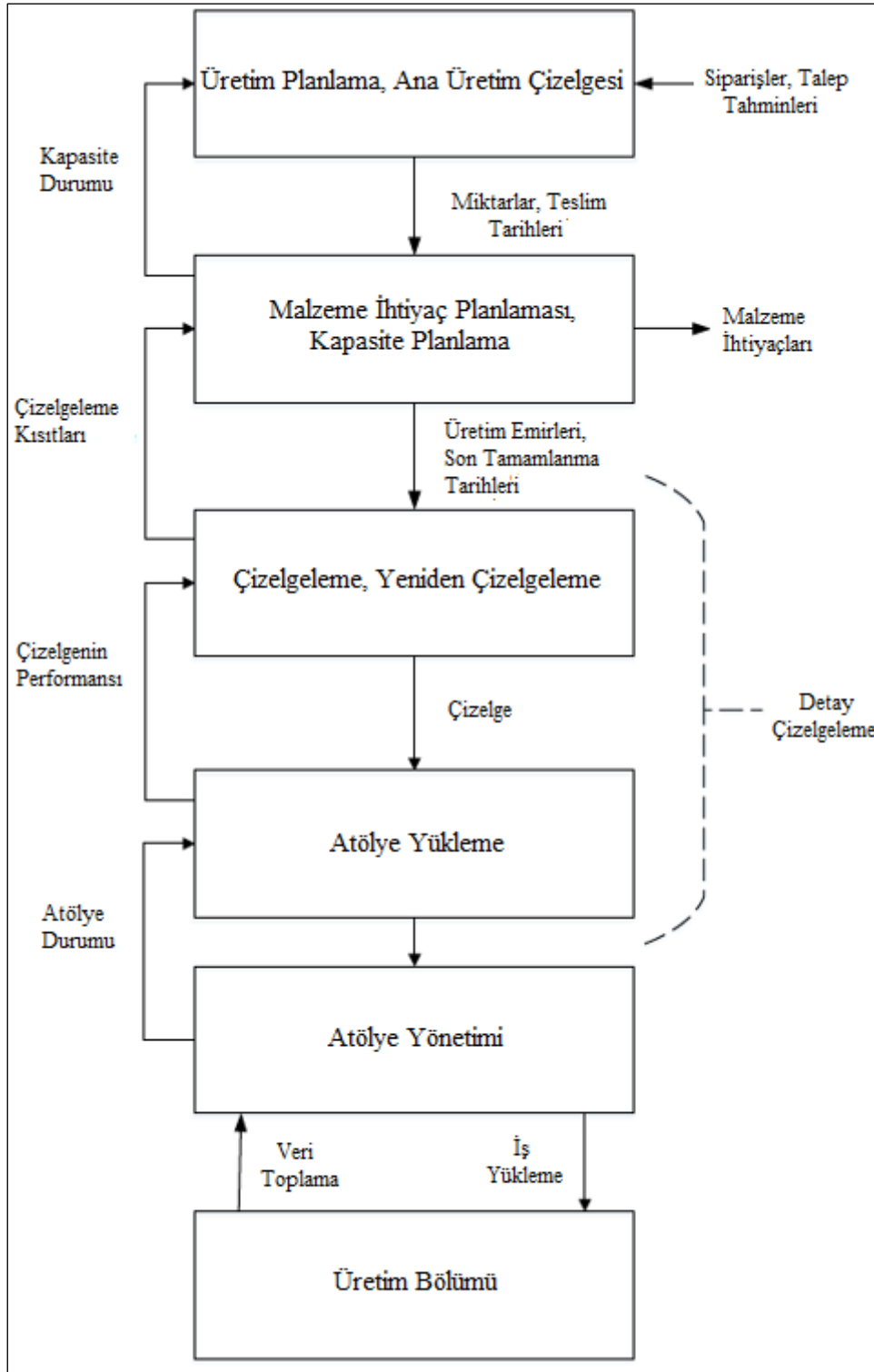
i makinesindeki j işinin işlem süresini ifade eder. j işinin işlem süresi makineye bağlı değilse i indisi gösterime dahil edilmez.

Serbest Bırakma Zamanı (r_j)	j işinin serbest bırakma zamanını ifade eder. j işinin sisteme geldiği, işlenmeye başlayabileceği zamandır.
Teslim Tarihi (d_j)	j işi için müşteriye taahhüt edilen teslim tarihini ifade eder.
Ağırlık (w_j)	j işinin ağırlığını ifade eder. j işinin sistemdeki diğer işlere göre önemini ifade eden öncelik faktörüdür. Genellikle işi sistemde tutmaktan kaynaklanan stok veya elde tutma maliyetlerini ya da işe yüklenen değeri temsil eder.
Tamamlanma Zamanı (C_{ji})	j işinin i makinesindeki işleminin tamamlanma zamanını ifade eder.
Teslim Tarihinden Sapma (L_j)	j işinin teslim tarihinden sapma süresini ifade eder.
Geç Tamamlanma Süresi (T_j)	j işinin geç tamamlanma süresini ifade eder.

Çizelgelerin anlaşılabilirliğini artırmak ve daha iyi çözümler elde etmek için çeşitli modellemeler kullanılmaktadır. Modellemeler, oluşturulan çizelgelerin öğelerinin ayrıntılı olarak görselleştirilmesini sağlamaktadır. Bunların arasında en yaygın olanı Gantt şemasıdır. Gantt şemasının dikey ekseninde kaynaklar, yatay ekseninde ise zaman ölçeği bulunur. Zaman içine yapılan kaynak atamalarını gösterir. Kaynak kullanımında söz konusu olan işlem sürelerinin kesin olarak bilindiği varsayılır. Performans ölçümleri ve çizelgeler arası karşılaştırma amaçlarıyla da bu şemadan faydalanılmaktadır [7].

2.2. Üretim Sistemlerinde Çizelgeleme

Üretim sistemlerinde alınan siparişler, son tamamlanma zamanına sahip işlere çevrilir. İşler çoğunlukla belirli bir sırayla bir iş merkezindeki makinelerde işlem görmelidir. Makinelerin dolu olması durumunda operasyonların işlem görmesi gecikebilir. Böyle ortamlarda ayrıntılı bir çizelgeleme yapılması, operasyonların devamlılığının kontrolüne yardımcı olur. Şekil 2.1., bir üretim sistemindeki bilgi akışının diyagramını göstermektedir [1].



Şekil 2.1. Üretim alanındaki bilgi akışı diyagramı [1]

Üretim sistemlerindeki çizelgeleme süreçleri, malzeme ihtiyaç planlaması gibi diğer bazı karar verme sistemleriyle bütünleşik çalışılmasını gerektirmektedir. Çizelge oluşturulduktan sonra, üretime başlamadan önce tüm kaynakların belirlenen zamanlarda kullanıma hazır olması gerekir. Operasyonların makinelerde işlenmeye başlayacağı zamanlar, üretim

planlama kapsamında çoğunlukla çizelgeleme ve malzeme ihtiyaç planlaması sistemi tarafından bütünleşik olarak belirlenmektedir [1].

Malzeme ihtiyaç planlaması sistemlerinde her işin alt parçalarını listeleyen ürün ağaçları vardır ve aynı zamanda her bir parçanın stoku bu sistemde takip edilir. İlâveten, her bir malzemenin tedarik zamanı da sistemde tutulur. Kuruluşun çizelgeleme sistemine sahip olmadığı durumlarda, malzeme ihtiyaç planlama sisteminin üretim planlama amacıyla kullanımına rastlanmaktadır. Buna karşın, karmaşık ortamlarda, bu sistemlerin çizelgelemeyi tatmin edici bir şekilde yapması kolay değildir [1].

2.2.1. Çizelgeleme problemlerinin sınıflandırılması

Üretim sistemlerinde çizelgeleme problemleri, $\alpha | \beta | \gamma$ üçlü gösterimi ile sınıflandırılır. Bu gösterimde α makine ortamını ifade ederken, β işlem özelliklerini, γ ise en iyilenecek performans ölçütünü ifade eder. Gösterim bileşenlerine ilişkin farklı yapılar aşağıda alt başlıklar halinde sunulmuştur [1].

Makine ortamına göre sınıflandırma (α)

- | | |
|-------|--|
| 1 | Tek makine ortamıdır. |
| P_m | Paralel olarak m adet özdeş makinenin bulunduğu ortamdır. j işi tek bir operasyona sahiptir ve makinelerden herhangi birinde işlem görebilir. |
| Q_m | Farklı hızlara sahip m adet paralel makinenin bulunduğu ortamdır. i makinesinin hızı v_i ile gösterilir. i makinesinin j işini işleme süresi $P_{ij} = P_j / v_i$ 'dir. (j işinin tüm operasyonlarının i makinesinde işlem gördüğü varsayılır. Tüm makineler eşdeğer özelliklere sahipse, yani tüm i 'ler için $v_i = 1$ ise, ortam P_m olur. |
| R_m | m adet farklı paralel makinenin bulunduğu ortamdır. Makine i , j işini v_{ij} hızında gerçekleştirir. j işinin i makinesindeki işlem zamanı P_{ij} , P_j / v_{ij} 'ye eşittir (j işinin tüm operasyonlarının i makinesinde işlem gördüğü |

varsayılır.). Makinelerin hızları işlerden bağımsız ise, yani tüm i ve j için $v_{ij} = v_i$ ise ortam Q_m olur.

- F_m Seri durumdaki m adet makinenin akış tipi atölye ortamına eklenmesiyle oluşan ortamdır. Tüm işlerin makinelerin her birinde işlem görmesi ve aynı rotayı izlemesi gerektiği çizelgeleme ortamıdır. Bir iş bir makinede işlem gördükten sonra, bir sonraki makine meşgul ise makinenin kuyruğuna katılır.
- FF_c Esnek akış tipi yerleşimi ifade eder. Akış tipi atölye ve paralel makine ortamlarının bir sentezidir. Seri olarak bulunan c adet iş merkezinin her birisinde paralel olarak bulunan bir grup özdeş makine vardır. Her iş önce öncelikle iş merkezi 1’de, sonra iş merkezi 2’de vb. işlem görmelidir. Her iş merkezinde j işi alternatif paralel makinelerden herhangi birinde işlem görebilir.
- J_m Atölye tipi yerleşimdir. Makine sayısı m olan bir atölyede her işin izleyeceği önceden belirlenmiş kendisine ait bir rotası vardır. Bir iş aynı makinede en fazla bir kez işlem görebileceği gibi birden fazla kez de işlem görebilir. İkinci durumda $\beta, rcrc$ olarak gösterilir.
- FJ_c Esnek Atölye Tipi üretim ortamını ifade eder. Atölye tipi ortama paralel makine ortamının dahil edilmesiyle ortaya çıkar. Bu ortamda, her birisinde bir grup paralel özdeş makinenin bulunduğu c adet iş merkezi içerir. Her işin kendi rotası vardır ve j işi bir iş merkezindeki makinelerden birinde veya birden fazlasında işlem görebilmektedir.
- O_m Açık Atölye Tipi üretim ortamını ifade eder. Tüm işler, makinelerin her birinde işlem görmelidir. Ancak bu işlem sürelerinin bazıları sıfır olabilir.

Üretim sistemlerinde makineler verimli kullanılması gereken kaynaklardır. İşletmeler tek makinenin sağladığı faydayı yeterli gördükleri takdirde ilave makine almayı reddederler çünkü alınan her makine işletme için maliyet demektir. Tek makineli sistemlerde bazı

bekleme ve gecikmeler oluşmaktadır. İşletmeler böyle durumlarda çizelgelemeden faydalanırlar. Tek makineli çizelgeleme probleminde amaç; bekleme ve gecikmeleri en aza indirerek bunlardan doğacak maliyetleri minimize etmektir [1]. Tek makine çizelgeleme problemleri gerçekte var olan tek bir makineyi dikkate alıp nihai çizelgeyi oluşturabileceği gibi, bir atölye veya fabrikanın tamamını dikkate alarak kaba çizelgeleme veya kaba kapasite planlama amacıyla da kullanılabilir.

Akış tipi çizelgeleme, birbirinden farklı m makine ve n işin bulunduğu; her bir işin m operasyondan oluştuğu, her bir operasyonun farklı makinelerde ve bütün işlerin operasyonlarının aynı sıra ile yapıldığı problemlere denir [8]. Çoğunlukla benzer ürünlerin üretildiği sistemlerde karşılaşılmaktadır.

Paralel makine durumu, tek makine durumunun geliştirilmiş bir halidir. Hangi işin hangi makinede işleneceğini belirlemek ve her makinedeki iş yükünü dengelemek için çizelgeleme yapılmalıdır. Makinelerde işlerin işlenmesi çok az miktarda bir kaynak birimi (çoğunlukla makinelerden sadece birisini) gerektirir. Kaynakların toplam mevcudiyeti sınırlıdır ve planlama ufku boyunca sabittir [9].

Atölye tipi çizelgeleme problemi, n adet iş m adet makinede işlem görmek üzere, önceden belirlenen sıra ve kapasite kısıtları yerine getirilerek, uygun bir amaç fonksiyonunu eniyileyecek şekilde işlemlerin başlama zamanını belirlemek olarak tanımlanabilir. Atölye tipi üretimde işlerin işlem göreceği toplam makine sayısı ve işlem sırası her iş için değişiklik gösterebilir [1].

Atölye tipi üretim ortamında işlerin kendine özgü rotaları tanımlanmaktadır. Paralel makineli çizelgeleme problemlerinde, işler eşdeğer makinelerden herhangi birinde işlem görebilmektedir. Atölye tipi üretim ortamına paralel makinelerin eklenmesiyle esnek atölye tipi çizelgeleme problemi ortaya çıkar.

İşlem karakteristiklerine göre sınıflandırma (β)

r_j Serbest bırakma yani işin sisteme gelme zamanıdır. j işinin r_j zamanından sonra işleme alınabileceğini ifade eder.

- prmp* İşlerin bölünebilirliği, bir işi başlattıktan sonra tamamlanıncaya kadar makinede tutmanın gerekli olmadığı anlamına gelir. Planlamacının herhangi bir zamanda bir işlemi kesintiye uğratmasına ve bunun yerine makineye farklı bir iş koymasına izin verilir. Önceden işlem görmüş bir iş kalan işlemlerinin tamamlanması amacıyla tekrar işlem görebilir. Önceden işlemeye başlanmış ama işlemi tamamlanmamış bir iş daha sonra tekrar aynı makineye veya paralel makinelerden birine geldiğinde kalan işlem süresi kadar işlem görür.
- prec* Öncelik kısıtlamaları, bir işin işlem görmeye başlamadan önce bir veya daha fazla işin tamamlanmasına ihtiyaç duyulduğunu ifade eder.
- s_{jk}* İş *j* ve iş *k*'ın ardıl olarak işlenmesi durumunda aralarında oluşan sıraya bağlı hazırlık süresidir. *j* ve *k* işleri arasındaki hazırlık süresi makineye bağımlıysa, alt simge *i* yani s_{ijk} dahil edilir. β Alanında hiçbir s_{jk} görünmezse, tüm hazırlık zamanlarının 0 veya sıradan bağımsız olduğu varsayılır ve bu durumda hazırlık süreleri işlem sürelerine dahil edilir.
- fmls* İşler iş aileleri şeklinde gruplandırılmıştır. Aynı aileden olan işler farklı işlem sürelerine sahip olabilir, ancak aralarında herhangi bir hazırlık gerektirmeden birbiri ardına bir makinede işlem görebilirler. Bununla birlikte, makine bir aileden diğerine, örneğin *g* ailesinden *h* ailesine geçerse, bir hazırlık gerekir. Bu hazırlık süresi hem *g* hem de *h* ailelerine bağlıysa ve sıra bağımlıysa, o zaman s_{gh} ile belirtilir.
- batch(b)* Bir makinede, *b* adede kadar olan işler aynı anda işlem görebilir. Aynı partideki işlerin işlem süreleri aynı olmayabilir. Partinin tamamlanma zamanı partideki son işi tamamlandığı zamandır. İşlem süresi. Aynı anda işlem görebilen iş sayısı 1 ise problem standart bir çizelgeleme problemine dönüşür. Aynı anda işlem görebilen iş sayısı sonsuzsa, makinenin herhangi bir zamanda işleyebileceği iş sayısında bir sınır yoktur.

- brkdw* Makinelerin arızalanabileceğini göstermekte olup bir makinenin sürekli olarak kullanılamayacağını ifade eder.
- M_j P_m ortamında M_j mevcut olduğunda, tüm m makineleri j işini işleyemez. M_j , j işini işleyebilen makine grubunu belirtir. β alanı M_j içermiyorsa, j işi m makinenin herhangi birinde işlem görebilir.
- block* Engellemeyi ifade eder. Akış tipi atölyelerde meydana gelebilecek bir olgudur. İşlemine tamamlanmış bir iş, bir sonraki makine henüz işini bitirmemişse kendi makinesinden ayrılamaz. Bekleyen iş, bir sonraki işin verilen makinede işlemeye başlamasını da engeller.
- nwt* Akış tipi atölyelerde ortaya çıkabilecek başka bir olgudur. İşlerin sıralı makineler arasında işlem görmek için beklemesine izin verilmez.
- rcrc* Bir işin aynı makineyi veya iş merkezini farklı operasyonlar için tekrar ziyaret etmesine izin verildiğini ifade eder.

Amaç fonksiyonuna göre sınıflandırma (γ)

En iyilenmeye çalışılan amaç, her zaman işlerin tamamlanma sürelerinin bir fonksiyonudur ve çizelgeye bağlıdır. j işinin i makinesindeki işleminin tamamlanma süresi C_{ij} ile belirtilir. j işinin işlem gördüğü son makinedeki tamamlanma süresi F_j ile gösterilir. Amaç, teslim tarihinin bir fonksiyonu da olabilir. j işinin teslim tarihinden sapma süresi L_j Eş. 2.1'deki gibi gösterilir:

$$L_j = F_j - d_j \quad (2.1)$$

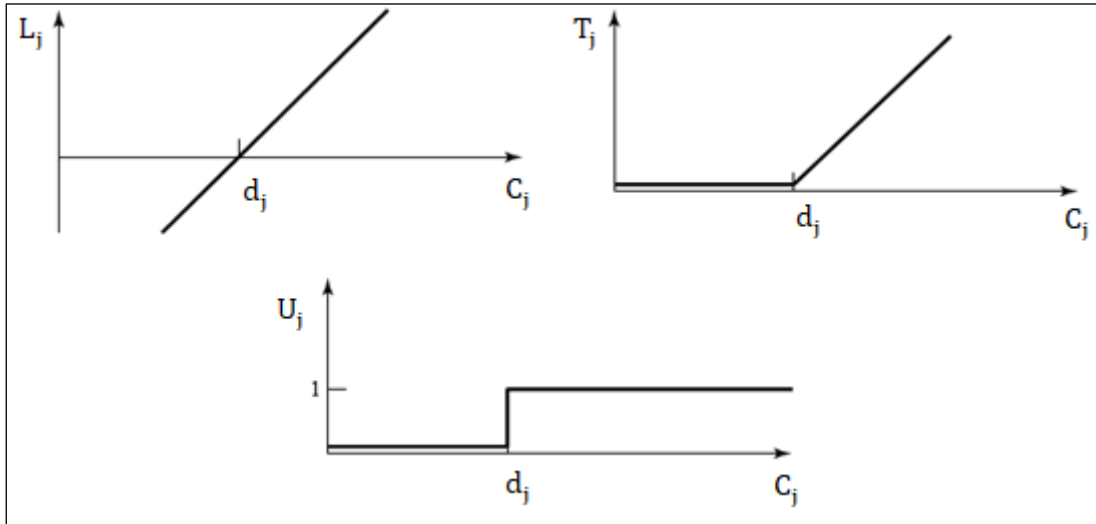
j işi geç tamamlandığında L_j olumlu, erken tamamlandığında L_j olumsuzdur. j işinin geç tamamlanma süresi T_j Eş. 2.2 kullanılarak hesaplanır:

$$T_j = \max(F_j - d_j, 0) = \max(L_j, 0) \quad (2.2)$$

Yine teslim tarihine dayalı hesaplanan j işinin birim cezası ise Eş. 2.3 kullanılarak elde edilir:

$$U_j = \begin{cases} 1, & \text{eğer } F_j > d_j \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases} \quad (2.3)$$

Geç tamamlanma, teslim tarihinden sapma ve birim ceza Şekil 2.2.'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Teslim tarihi ile cezalandırma ilişkisi [1]

En küçüklenemeye çalışılan amaç fonksiyonlarının γ alanında alabileceği değerler şunlardır:

En Büyük Tamamlanma Zamanı
(C_{max})

En büyük tamamlanma zamanının, yani sistemden ayrılan son işin tamamlanma süresinin en küçükleneceğini ifade eder. Ulaşılan mümkün en küçük C_{max} değeri genellikle makinelerin iyi bir şekilde kullanıldığını gösterir.

En Büyük Gecikme (L_{max})

En büyük gecikmenin, teslim tarihinden en büyük sapmanın en küçükleneceğini ifade eder.

Ağırlıklandırılmış Son İşin
Tamamlanma Zamanı ($\sum w_j F_j$)

İşlerin ağırlıklı tamamlanma zamanları toplamını ifade eder. Ağırlıklar, çoğunlukla, eldeki stoklardan kaynaklanan maliyetlerinin bir göstergesidir.

Ağırlıklandırılmış Toplam Gecikme Süresi ($\sum w_j T_j$)	İşlerin, ağırlıklı geç tamamlanma zamanları toplamını ifade eder. Ağırlıklar, genellikle, müşteri önem düzeylerinin bir göstergesidir.
Geciken İşlerin Ağırlıklandırılmış Sayısı ($\sum w_j U_j$)	Geciken işlerin ağırlıklandırılmış sayısını ifade eder.

2.3. Hizmet Sistemlerinde Çizelgeleme

Hizmet sistemlerinde çizelgeleme, çeşitli sektörlerde işlerin ve kaynakların değişkenlik gösterdiği farklı problem tipleriyle karşılaştığı için üretim sistemlerine göre farklılıklar göstermektedir. Üretim sistemlerinde makinelerin genel olarak belirli işlemleri yapabilmesi için standart süreleri vardır. Hizmet sistemlerinde ise müşteriler aynı talebe sahip olsalar bile kişiler arası farklılıklardan dolayı aldıkları hizmete verecekleri tepkiler aynı olmamakla birlikte genellemeler çoğu durumda yapılamamaktadır. Bu nedenle belirsizliklerle daha fazla karşılaşılan hizmet sistemlerinde çizelgeleme yapmak genellikle üretim sistemlerine göre daha karmaşık olmaktadır. Hizmet sistemlerinde çizelgeleme sürecinde diğer yardımcı sistemlerle beraber çalışılmalıdır. Üretim sistemlerinin aksine, malzeme ihtiyaç planlama gibi bir süreç çoğunlukla yoktur. Genellikle kaynaklara ve müşterilere ilişkin bilgilerin tutulduğu bilgi sistemleri kullanılmaktadır. [1].

2.4. Literatürde Kullanılan Çözüm Yöntemleri

Esnek atölye tipi çizelgeleme problemleri çözüldürken en iyi sonucu veren analitik yöntemler ya da sezgisel yöntemler kullanılabilir. Optimizasyon, eldeki kısıtlı kaynakların en etkin şekilde kullanımını sağlar. Matematiksel olarak uygun çözümler arasından amaç fonksiyonuna en iyi değeri veren optimal çözümün bulunmasını amaçlar [9].

Sezgisel yöntemler, optimal çözümlere amaç fonksiyonu değeri açısından kabul edilebilir düzeylerde yakın sonuçlar bulur ve stratejilere dayalı olarak hızlı bir şekilde çözümleri üretirler. Optimal çözümün makul sürelerde bulunamayacağı bir problem ele alındığında çoğunlukla sezgisel yöntemlerden yararlanılmaktadır [4].

2.4.1. Analitik yöntemler

Optimal sonucu bulmayı garantileyen yöntemler, NP-zor sınıfta yer alan problemlerin boyutuyla üssel artış gösteren sürelerde çözüme ulaşmaktadır. Bu sebeple sadece küçük boyutlu NP-zor problemler üzerinde makul olarak kullanılabilirler [10].

Tüm fonksiyonlar doğrusal olduğunda, doğrusal programlama yöntemi kullanılır. Modeldeki fonksiyonlardan doğrusal olmayanlar varsa doğrusal olmayan programlama yöntemi kullanılır. Problem çözümünün tamsayılardan oluşması durumunda kombinatoriyal optimizasyon problemleri ortaya çıkar. Küçük boyutlu NP-zor problemlerin optimal çözümleri çoğunlukla tamsayılı programlama yöntemi ile bulunabilirken, orta ve büyük boyutlu problemler sezgisel yöntemlerle çözülmektedir [11, 12].

Esnek atölye tipi çizelgeleme problemleri üzerine daha önceden yapılan çalışmalarda kullanılan analitik yöntemler incelendiğinde, genellikle karışık tamsayı doğrusal programlama ve dal sınır algoritmalarının kullanıldığı görülmektedir. Dal ve sınır algoritması kombinatoriyal optimizasyon problemleri için optimal çözümü garanti eden birerleme tabanlı bir kısmi arama algoritmasıdır [13]. Arama uzayının birbiri ardına bölümlendirilmesi fikrine dayanır [14]. Çözüm setini alt kümelere ayıran dallandırma kuralı, çözüm alt kümesindeki maliyet için bir alt sınır kuralı, isteğe bağlı olarak bir üst sınır kuralı ve baskınlık kuralları kullanılmaktadır. Bu algoritmalar 60'lı yıllarda itibaren çizelgeleme problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır [13].

Matematiksel programlama yöntemleri temel yöneylem araştırması tekniklerinden birisidir. En basit formu olan doğrusal programlamanın çalışma prensibi, doğrusal kısıtlar altında, doğrusal bir amaç fonksiyonunun en iyi değerini veren çözümün bulunmasıdır. Doğrusal programlamanın özel bir durumu olan tam sayılı programlama modeldeki değişkenlerde negatif olmaması gereken tam sayı olduğu durumda ortaya çıkar. Modeldeki tüm değişkenler tam sayılı olduğu durumda saf tam sayılı programlama, tam sayılı değişkenler ve sürekli değişkenler birlikte kullanıldığında ise karma tam sayılı programlama adını alır [15].

2.4.2. Sezgisel yöntemler

Modeldeki değişken ve kısıt sayıların çok olması, çözüm uzayının büyüklüğü, problemin NP-zor sınıfında yer alması gibi kesin çözüm yöntemlerinin kullanılmadığı durumlarda sezgisel yöntemlere başvurulmaktadır [4]. Sezgisel yöntemlerin kullanımı 1991 yılından itibaren hızlı bir şekilde artış göstermiştir. İhtiyaç duyduğu çözüm zamanının birerleme tekniklerine göre kısa olması ve her tür probleme kolay uyarlanabilmesinden dolayı tercih edilir. Bu yöntemler ile problemler çözülürken iyi sonuçların elde edilmesi için problemle ilişkili olarak birçok parametrenin doğru bir şekilde ayarlanması gerekmektedir. Optimal çözümü garantilememelerinin yanı sıra bu durum da dezavantajlarından birisidir [16]. Sezgisel yöntemler, sıfırdan çözüm üreten kurucu sezgiseller ve mevcut bir veya birkaç çözümü iteratif olarak iyileştiren iyileştirici sezgiseller olarak iki alt sınıfa ayrılır [17]. Literatürde sıklıkla kullanılan önemli bazı iyileştirici sezgisellere yönelik özet bilgiler aşağıda sunulmuştur.

Genetik algoritmalar

Birden fazla çözümden oluşan bir başlangıç popülasyonu üzerinden algoritma başlatılır. Popülasyon içindeki tüm kromozomların, amaç fonksiyonu değerlerine dayalı, uygunlukları hesaplanır. Mevcut popülasyon üzerinde genetik algoritma operatörleri kullanılarak kaliteli çözümler içereceği düşünülen yeni nesiller oluşturulur. Üreme operatörü, kromozomları seçme, seçilmiş kromozomları bir eşleme havuzuna kopyalama ve havuzda kromozomları çiftler halinde gruplara ayırma işlemlerini gerçekleştirir [4]. Rasgele seçilen kromozomlar çaprazlama operatörü kullanılarak yeni nesillerin oluşturulması için kullanılır. Çaprazlama operatörü, mevcut kromozomların parçalarının kullanımının kullanımı yoluyla daha yüksek uygunluk değerlerine sahip kromozomların üretilmesini amaçlar. Kromozomlar üzerinde rassal değişiklikler yapan mutasyon operatörü ise çözümlerin çeşitlendirilmesi ve yerel optimumlardan kurtulmayı amaçlar [18].

Literatürde genetik algoritmaların büyük ve karmaşık optimizasyon problemlerinin çözümünde etkili sonuçlar ürettiği gösterilmiştir [19]. Atölye tipi çizelgeleme problemlerinin çözümünde genetik algoritmaları etkili şekilde kullanan çalışmalardan birisi 2017 yılında Dao ve arkadaşları [20] tarafından yapılmıştır.

Tabu Arama

Tabu arama algoritmasının temel hali, kombinatoriyal optimizasyon problemlerini çözmek için, 1986 yılında Glover [21] tarafından yapay zeka kavramlarından geliştirilmiştir [22]. Bu algoritmada verilen bir başlangıç çözümü üzerinden belirli hareket mekanizmaları kullanılarak komşu üretimi yapılır. Komşu üretimi işlemi sırasında değerlendirme yapılarak daha iyi sonuç veren çözüm seçilir ve mevcut çözüm olarak atanır. Bu esnada çözüm üreten hareket yerel eniyi çözümlere takılmamak adına kısa süreli hafızada tutulur (tabu listesi) ve bu hareketle oluşturulan yeni komşular belirli bir süre elenir [23]. Tabu listesinin uzunluğu sabit veya değişen bir değer olarak belirlenebilmektedir [24]. Tabu listesi küçükken arama uzayının küçük bir alanına yoğunlaşılırken, tabu listesi büyük tutulduğunda daha fazla sayıda çözüm tabu listesine eklendiği için daha geniş bir alanda arama yapılmış olur [23].

Tavlama Benzetimi

Tavlama, katı bir maddeyi yüksek sıcaklığa maruz bırakma ve ardından soğutma işlemi ile yüksek kalitede kristaller elde etmektir. Malzeme minimum enerji durumuna ulaştığında soğutma işlemi sonlandırılır. Yavaş soğutuldukça daha çok kusursuz kristal oluşmaktadır. Tavlama benzetimi algoritması, tavlama işleminin fiziksel sürecinden esinlenmektedir. Kusursuz kristal eniyi çözümü temsil eder. Sıcaklık değeri ise eniyi çözüme ulaşılmasında takip edilen yol için bir kontrol parametresidir [22]. Probleme özgü olarak başlangıç sıcaklığı, son sıcaklık, markov zincir uzunluğu olarak adlandırılan aynı sıcaklıkta üretilecek komşu sayısı ve soğutma oranı belirlenir. Eniyi ve mevcut çözüm olarak atanan bir başlangıç çözümü üzerinden hareket mekanizmalarıyla komşular üretilir. Üretilen komşuların amaç fonksiyonu değeri ile mevcut çözümün amaç fonksiyonu değerinden ne kadar iyileşme veya kötüleşme elde edildiği hesaplanır. İyileşme elde edilen komşu çözüm kabul edilir. Kötüleşme elde edilen komşu ise probleme özgü belirlenen sıcaklık değerinin bir fonksiyonu ile hesaplanan kabul olasılığına göre kabul edilir. Üretilen komşular arasından kabul edilen çözüm mevcut çözüm olarak atanır ve her markov zinciri zonunda sıcaklık değeri σ parametresine uygun şekilde düşürülür. Yeni mevcut çözüm eniyi çözümden daha iyiyse yeni eniyi çözüm olarak atanır. Sıcaklık, durdurma koşulu olarak belirlenen son sıcaklık değerine ulaştığında algoritma sonlandırılır [22].

Karınca Kolonisi Algoritması

Karıncaların yiyecek toplama hareketlerinden esinlenerek oluşturulmuş sezgisel bir optimizasyon yöntemidir. Arama uzayında eniyi çözümü arayan ajanlar arasında iletişim kurarak, diğer ajanların arama sırasında yapacakları doğru seçimi bilmelerini sağlar ve çok etmenli rastgele aramaya göre daha iyi sonuçlar verir [25]. Karıncalar, yuvaları ve yiyecek kaynağı arasında geçtikleri yerlere feromen adı verilen bir kimyasal iz bırakırlar. Yuvalarına geri dönerken bu izleri takip ederler. Eğer bu yolda engelle karşılaşırlarsa feromen izlerini takip etmeleri engellenmiş olur ve eşit olasılıkla farklı yönlerde doğru yönelirler. Karıncalar arasından daha kısa olan yola yönelenler yeni izler bırakır. Bu da daha çok karıncanın bu yola yönelmesini sağlamış olur [25]. Bu süreçten geliştirilen algoritma ise belirlenen feromen değeri kullanılarak dağıtım kuralları ile çözümler üretir. Kaliteli çözümler elde etmek için her bir çözüm üzerinde yerel arama yöntemi uygulanır. Çözümler arasında eniyi değer bulunduğunda mevcut çözüm olarak atanır. Feromen değeri güncellenerek çözüm üreilmeye devam edilir [25].

3. PROBLEM TANIMI

Bu çalışmada ele alınan problem; esnek atölye tipine benzer üretim gerçekleştiren bir firmada tespit edilmiş olup, işler makinelere vardiya temelinde atanmakta ve sıralanmaktadır. Genel olarak sistemde bulunan n adet iş m adet makine üzerinde çizelgelenmektedir. Çizelgeleme ortamında her bir işe ait birden çok operasyon belirli bir rota kapsamında gerçekleşir. İşler operasyon sayıları, önem dereceleri ve rotaları bazında birbirinden farklıdır. Bir işin tamamlanması için o işe ait tüm operasyonların iş rotasına uygun şekilde tamamlanmış olması gerekmektedir. Diğer bir ifadeyle çizelgeleme süresince operasyonların öncüllük ilişkileri sağlanmalıdır. Her bir iş operasyonu için alternatif paralel makineler söz konusu olup operasyonun ilgili makinelerden birisi seçilerek gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu açılarından bakıldığında problem Esnek Atölye Tipi Çizelgeleme probleminin bir varyasyonu yapısındadır.

Dikkate alınan problemdeki en bariz özellik, firmanın çalışma sürecinin vardiyalardan oluşmasıdır. Üretim zamanı kısıtı olup bir vardiyada başlayan operasyonun aynı vardiyada tamamlanması gerekmektedir. İşlerin ait oldukları müşteri ve/veya sipariş temelinde önceliklerini yansıtan ağırlıkları bulunmaktadır. Çizelgelenen her iş aynı aciliyete sahip olmak zorunda değildir. Firmada yapılan çalışmalarda, üretim ve müşteri tatmini politikaları açısından, işlerin ağırlıklı geç tamamlanma zamanları toplamının (weighted tardiness) en küçüklenmesi fonksiyonunun problemin amaç fonksiyonu olarak alınmasının uygun olduğu anlaşılmıştır. Çalışmanın nihayetinde, karar vericilere her bir vardiyada hangi işlerin hangi makineler kullanılarak hangi zaman aralığında gerçekleştirileceği bilgisinin sağlanması amaçlanmaktadır.

Problemin formal tanımı şu şekilde yapılabilir. Planlama ufku/periodyu her birinin uzunluğu v_s olan vardiyalara bölünmüştür. Periyot süresince tamamlanması gereken $j = 1, 2, \dots, n$ adet iş olup her bir j işinin tamamlanması için gereken $O_{j1}, O_{j2}, \dots, O_{jn_{ooj}}$ olmak üzere n_{ooj} adet operasyon vardır. Her bir operasyon başladığı vardiyada tamamlanmak zorundadır. Üretim ortamında $i = 1, 2, \dots, m$ adet makine bulunmaktadır. Her bir O_{jl} operasyonunun gerçekleştirilebileceği alternatif makineler söz konusu olup operasyon süresi makine bazında farklılık gösterebilmektedir. j işinin l operasyonunun i makinesindeki işlem süresi bilinmekte olup P_{jli} ile gösterilmektedir. j işinin teslim zamanı d_j , ağırlığı ise w_j 'dir. İşin

tamamlanma süresi F_j , işe ait operasyonların tamamlanma sürelerinin maksimumudur. İşin geç tamamlanma süresi ise T_j ile gösterilir. T_j Eş. 3.1'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$T_j = \max\{0, (F_j - d_j)\} \quad (3.1)$$

Bütün işlere ait bütün operasyonlarının planlama ufkunda tamamlanmış olması gerekmektedir. Problemin performans ölçütü, Eş. 3.2'de verilen ağırlıklı geç tamamlanma süreleri toplamının en küçüklenmesidir.

$$\min \sum_{j=1}^n w_j \cdot T_j \quad (3.2)$$

Ele alınan probleme ilişkin önemli varsayımlar şu şekildedir:

- Her bir işin tamamlanması için bir veya daha fazla sayıda operasyon gerekir.
- İşlerin operasyon sırası yani rotası birbirinden farklı olabilir.
- Her bir iş farklı operasyonlardan oluşabilir.
- Her bir işin operasyonları, operasyonların sıraları önceden belirlidir.
- İşlerin teslim zamanları ve operasyonların makinelerdeki işlem süreleri deterministiktir.
- Operasyonların işlenebileceği alternatif makine grupları bulunmaktadır.
- Bir operasyonun alternatif makinelerindeki işlem süreleri birbirinden farklı olabilir, yani ilişkisiz paralel makine yapısı söz konusudur.
- Tüm makineler başlangıçta hazırdır.
- Tüm işler başlangıçta hazırdır.
- Bir makine aynı anda sadece bir operasyon gerçekleştirebilir.
- Bir operasyon sadece bir makinede işlem görebilmektedir.
- Her operasyon kesintiye uğramadan tamamlanmak zorundadır.
- Operasyonların hazırlık zamanları işlem zamanının içindedir.
- Makineler arası taşıma süreleri ihmal edilir.
- Sistemde bir vardiya süresinden daha uzun süren operasyon işlem süresi yoktur.
- Bir operasyonun işlenmeye başladığı vardiyada tamamlanması gerekmektedir.
- İşlerin bölünmesi, operasyonun yarıda bırakılması durumları söz konusu değildir.

4. LİTERATÜR TARAMASI

Literatür araştırması kapsamında esnek atölye tipi çizelgeleme problemini konu alan akademik çalışmalar incelenmiştir. İncelenen 37 çalışma, kullandığı çözüm yöntemlerine göre analitik ve sezgisel yöntemler olarak sınıflandırılarak sunulmuştur. Sınıflandırılmış çalışmalara bakıldığında, orta ve büyük boyutlu problemleri ele alanların çözüm yöntemi olarak sezgisel algoritmaları kullandıkları görülmüştür. Problemin zorluğu dikkate alındığında bu yaklaşımın diğer alanlardaki literatüre göre makul olduğu değerlendirilmektedir.

Esnek atölye tipi çizelgeleme problemi özelinde bakıldığında gerçek hayat problemi üzerinde yapılan çalışmaların az sayıda olduğu görülmektedir. Literatür taraması kapsamında görüldüğü kadarıyla, özellikle bu çalışmada ele alındığı gibi vardiya periyotlarınca üretim yapılan ortamda vardiya süreleri kısıtı altında operasyonların tamamlanması gerekliliği ve önem derecesi farklı olan tüm işlerin geç tamamlanma sürelerinin toplamının eküçüklenmesi problemi üzerinde çalışma yapılmadığı anlaşılmıştır.

Yapılan incelemeye göre esnek atölye tipi çizelgeleme problemini ilk ele alanlar Brucker ve Schile'dir [26]. Yaptıkları çalışmada, bir atölye ortamında her bir işin birden fazla operasyonunun olduğu iki işli çizelgeleme problemi üzerine çalışmışlardır. Problemin amacı son işin tamamlanma zamanını enküçüklemektir. Bir polinomsal grafik algoritması geliştirmişlerdir. Yaptıkları deneysel çalışmalar geliştirdikleri algoritmanın üç iş ve daha büyük boyutlu problemlerde etkili olmadığını göstermiştir.

4.1. Analitik Yöntemlere İlişkin Çalışmalar

Yapılan çalışmalara bakıldığında esnek atölye tipi çizelgeleme probleminin NP-zor yapıda olmasına rağmen çözüm noktasında matematiksel modeller, dinamik programlama vb. analitik yöntemlerin kullanıldığı görülmektedir.

20. yüzyılın ortalarında matematiksel optimizasyon ve tamsayı programlama yöntemlerinin kullanılmaya başlanmasıyla beraber matematiksel modeller Wagner [28] ve Manne [29] tarafından atölye tipi çizelgeleme problemleri için önerilmeye başlanmıştır [30]. Wagner [28], yaptığı çalışmada atölye tipi çizelgeleme problemi için bir iş bir makineye

atandıysa 1, diğerk durumda 0 değerini alan karar değişkeni ekleyerek model oluşturmuştur. Lee ve diğerleri [31], Wagner [28]'in oluşturduğu modeli esnek atölye tipi çizelgeleme problemi üzerinde yaptıkları çalışmada kullanmışlardır. Manne [29], tek makineli üretim ortamında işlerin sıralanması problemi için oluşturduğu matematiksel modelde işlerin başlangıç zamanlarını, tamsayı değişkenleri ile tanımlamıştır. Zhu ve Heady [32] ise Manne [29]'nin modelini esnek atölye tipi çizelgeleme probleminde kullanmıştır.

Jiyin ve MacCarthy [33], esnek atölye tipi çizelgeleme problemleri için model oluşturma ve çözüm yöntemleri kapsamında çeşitli yöntemler geliştirmişlerdir. İlk olarak stok ve taşıma maliyetlerini göz önünde bulundurarak karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli kurmuşlardır. Bunun yanında matematiksel model tabanlı iki ayrı sezgisel yöntem geliştirmişlerdir. Ele aldıkları problemin amaç fonksiyonu operasyonların ortalama tamamlanma zamanlarını en küçükleme-dir. Deneysel çalışmalar sonucunda geliştirdikleri yöntemlerin performans değerlendirmesini yapmışlardır. Sonuçlar geliştirilen sezgisel algoritmaların geleneksel yöntemlerden daha etkili olduğunu göstermiştir.

Tamaki ve diğerleri [34], esnek atölye tipi çizelgeleme probleminin çözümü için karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli kurmuşlardır. Küçük ve büyük boyutlu problemler üzerinde deney çalışması yapmışlardır. Küçük boyutlu problemlerin çözümünde etkin sonuçlar elde etmiş ve büyük boyutlu problemlerde çok fazla hesaplama zamanı gerektirdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, büyük boyutlu problemlerin çözümü amacıyla yeni bir genetik algoritma geliştirmişlerdir.

Imanipour [3], esnek atölye tipi çizelgeleme problemine hazırlık sürelerini ekleyerek problemi genişletmiştir. Son işin tamamlanma zamanını en küçüklemeyi amaçlamıştır. Problemin çözümü için öncelikle doğrusal olmayan karışık tamsayılı programlama modeli kurmuş ve tabu arama algoritmasına bağlı bir yaklaşım geliştirmiştir. Deneysel çalışmalarla modelin etkinliği gösterilmiştir.

Fattahi ve diğerleri [35], esnek atölye tipi çizelgeleme problemi için matematiksel bir model ve sezgisel yaklaşım önermişlerdir. Çalışmada, küçük boyutlu problemler için karışık tamsayı doğrusal programlama modeli, büyük boyutlu problemler için hiyerarşık yaklaşımlar içeren iki adet sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Çalışmada altı farklı melez arama yapısı önerilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada hiyerarşık yaklaşımın bütünleşik

yaklaşımdan daha iyi olduğu görülmüştür. Aynı zamanda tabu arama ve tavlama benzetimi sezgisel algoritmalarının kullanıldığı yaklaşımların diğer yaklaşımlardan daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Fattahi ve diğerleri [36], operasyonların üst üste bindiği yeni bir esnek atölye tipi çizelgeleme problemi üzerinde çalışmışlardır. Problemin karışık tamsayılı doğrusal programlama modelini kurmuşlar, büyük boyutlu problemlerin çözümü için ise tavlama benzetimi algoritması geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri tavlama benzetimi algoritmasının etkinliğini ölçmek için sonuçları dal sınır algoritması ile elde edilen en iyi sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Deneysel çalışma ile önerilen algoritmanın etkinliğini kanıtlamış, son işin tamamlanma zamanı ve makine kullanımında iyileşmeler sağlamışlardır.

Defersha ve Chen [37], son işin tamamlanma zamanının en aza indirilmesi amacıyla esnek atölye tipi çizelgeleme problemine işlerin öncesinde ve sonrasında gerçekleşen sıra bağımlı hazırlık sürelerini ekleyerek elde edilen problemin matematiksel modelini geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri modeli çözmek için paralel genetik algoritma kullanmışlardır. Problem çözümüne ait yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda önerdikleri algoritmanın iyi sonuçlar elde ettiğini göstermişlerdir.

Özgüven ve diğerleri [38], esnek atölye tipi çizelgeleme problemine süreç planı esnekliği ve sıra bağımlı hazırlık sürelerini dahil etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada iki ayrı karışık tamsayılı hedef programlama modeli geliştirmişlerdir. İlk modelde hazırlık sürelerinin dâhil edildiği, ikincisinde ise edilmediği varsayılmıştır. Küçük problemler üzerinde çözüm önerileri uygulanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Önerilen yaklaşımın küçük boyutlu problemlerin çözümü için uygun/makul olduğunu, orta ve büyük problemlerin çözümü için uygun olmadığını belirtmişlerdir.

Nourali ve diğerleri [39], son işin tamamlanma zamanını en küçükleme amacıyla sıra bağımlı hazırlık zamanlı esnek atölye tipi çizelgeleme problemi için karışık tamsayılı programlama modeli kurmuştur. Literatürdeki karşılaştırma problemlerinin çözümünü yaparak, modelin etkili sonuçlar verdiğini göstermişlerdir.

Meng ve diğerleri [40], yaptıkları çalışmada esnek atölye çizelgeleme problemi için toplam enerji tüketimini en aza indirmeyi amaçlamışlardır. Boşta kalan zaman ve boşta kalan enerji

olmak üzere iki farklı modelleme temel alınarak, altı yeni karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli önerilmiştir. Tüm modellerinin etkinliğini ölçmek için CPLEX SLOVER kullanılmıştır. Boyut ve hesaplama karmaşıklığı açısından klasik modele göre önemli ölçüde iyileşme olduğunu göstermişlerdir.

Esnek atölye tipi çizelgeleme problemi için literatürde yer alan analitik yöntemlere ilişkin çalışmalar Çizelge 4.1.'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.1. Analitik yöntemlere ilişkin çalışmalar

Yazar	Matematiksel Model	Yıl
Brucker ve Schile [26]	Polinomsal Grafik Algoritması	1996
Brandimarte [41]	Karışık Tamsayı Doğrusal Programlama	1993
Jiyin ve MacCarthy [33]	Karışık Tamsayı Doğrusal Programlama	1997
Tamaki ve diğerleri [34]	Karışık Tamsayı Doğrusal Programlama	2001
Imanipour [3]	Doğrusal olmayan Karışık Tamsayı Programlama	2006
Fattahi ve diğerleri [35]	Karışık Tamsayı Doğrusal Programlama	2007
Fattahi ve diğerleri [36]	Karışık Tamsayı Doğrusal Programlama	2009
Defersha ve Chen [37]	Karışık Tamsayı Doğrusal Programlama	2010
Özgüven vd. [38]	Karışık Tamsayı Amaç Programlama	2012
Nourali vd. [39]	Karışık Tamsayı Programlama	2012
Meng vd. [40]	Karışık Tamsayı Programlama	2018

4.2. Sezgisel Yöntemlere İlişkin Çalışmalar

Yapılan çalışmalara bakıldığında, esnek atölye tipi çizelgeleme problemi NP-zor yapıda olduğu için, orta ve büyük boyutlu problemler ele alındığında sezgisel algoritmalarından yararlanıldığı görülmüştür. Kullanılan sezgisel yöntemler arasında tabu arama ve genetik algoritmalar sıkça rastlanmaktadır.

Brandimarte [41], esnek atölye tipi çizelgeleme problemi için tabu arama algoritmasına dayalı bir hiyerarşik yaklaşım geliştirmiştir. Problem, işlere ait operasyonların alternatif makinelerden birine atanması ve çizelgelenmesi açılarından oluşan iki boyutlu bir yapıya sahiptir. Problemin her iki aşamasının çözümü için de tabu arama algoritması kullanmıştır. Algoritmanın en iyi çözüme ulaşıldığı noktada yeni bir çizelge üretmek için operasyonların atandığı makineler değiştirilmiştir. Çalışmanın diğer hiyerarşik yaklaşımlardan farklı olarak tek yönlü değil çift yönlü bir bilgi akışına sahip olduğu belirtilmiş ve farklı amaçların sağlanması için bu yöntemin kullanılabileceğini ifade etmiştir.

Mastrolili ve Gambardella [42], esnek atölye tipi çizelgeleme probleminin çözümü için yerel arama yöntemleri kullanmış ve iki tane komşu üretme mekanizması önermişlerdir. Ele aldıkları problemin performans ölçütü son işin tamamlanma zamanını en küçükmektir. Yaptıkları çalışmada bir tabu arama algoritması geliştirmişlerdir. Test problemleri ile kapsamlı bir deney çalışması yapmış ve önceki çalışmalara göre çok daha iyi performans gösterdiğini kanıtlamışlardır.

Jensen [43], esnek atölye tipi çizelgeleme probleminde dinamik koşullar altında en iyiye yakın sonuçlar veren ve özellikle kesintilerden sonra tekrar çizelgelemeyi mümkün kılan esnek çözümler üretebilmek adına genetik algoritmaların kullanımını gösteren bir çalışma yapmıştır.

Tay ve Wibowo [44], esnek atölye tipi çizelgeleme probleminin çözümü için evrimsel algoritma geliştirmişlerdir. Dört farklı kromozom gösterimi üzerinde çalışmışlar ve bunun esnek atölye tipi çizelgeleme problemlerinde etkin olduğunu belirtmişlerdir.

Ong ve diğerleri [45], esnek atölye tipi çizelgeleme problemin tekrar işlemeli halini ele almışlardır. Problemin çözümü için Klonal seçim algoritmasına dayalı bir bütünleşik bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Literatürde kullanılan test problemleri üzerinde yaptıkları deney çalışmada başarılı sonuçlar elde etmişlerdir.

Gao ve diğerleri [46], esnek atölye tipi çizelgeleme problemine makine bakımlarını da dahil etmişlerdir. Çözüm için melez bir genetik algoritma geliştirmişlerdir. Genetik algorithmada kullandıkları yerel aramada kritik yol kavramına dayalı iki komşuluk mekanizması geliştirmişlerdir.

Gholami ve Zandieh [47], esnek atölye tipi çizelgeleme probleminin dinamik yapısı için benzetim ve genetik algoritmayı bütünleştiren bir çözüm önerisinde bulunmuşlardır. Gerçek hayat problemlerinde karşılaşılan fakat yapılan çalışmalarda genellikle dikkate alınmayan makinelerin sürekli hazır olamaması veya işlerin kesintiye uğraması gibi durumları modellerine dahil etmişlerdir. Geliştirdikleri yaklaşım üzerindeki deneysel çalışma sonuçlarına göre makinelerdeki arızalanma sürelerinin çizelgelerin verimliliği üzerinde ciddi derecede etkili olduğunu göstermişlerdir.

Yazdani ve diğerleri [48], esnek atölye tipi çizelgeleme problemi için rassal olarak yerel arama yöntemi kullanan bir tavlama benzetimi algoritması ile çözüm önerisinde bulunmuşlardır. Geliştirilen tavlama benzetimi algoritmasının etkinliğini ölçmek için literatürde kullanılan test problemleri üzerinde deney çalışma yapmışlar ve sonuçlarını sunmuşlardır.

Bagheri ve diğerleri [49] yaptıkları çalışmada esnek atölye tipi çizelgeleme problemini ele almış ve son işin tamamlanma zamanını en küçüklemeyi amaçlamışlardır. Çözüm için ise yapay bağıklık tabanlı bütünleşik bir algoritma önermişlerdir. Başlangıç çözümü üretmek için çeşitli stratejiler, yeni bireyler elde etmek için ise farklı mutasyon operatörleri kullanmışlardır. Önerilen algoritmanın etkin sonuçlar verdiğini karşılaştırma problemlerini kullanarak göstermişlerdir.

Saidi-Mehrabad ve Fattahi [50], son işin tamamlanma zamanının en küçüklemeyle amaçlı işlem sırası ve alternatifler arasından makine seçiminin gerçekleştirildiği esnek atölye tipi çizelgeleme problemi için tabu arama algoritmasının kullanıldığı bir yaklaşım önermişlerdir. Bu yaklaşımda alternatif işlem sıraları ve sıra bağımlı hazırlık süreleri eşzamanlı olarak ele alınan faktörlerdir. Önerilen tabu arama algoritması, en iyi operasyon sırasını arayan ve en iyi makine alternatifini bulan iki bölümden oluşmaktadır. Algoritmanın performansının ölçülmesi için test problemleri üzerinde deneysel çalışma yapmışlar ve dal sınır algoritması ile elde edilen eniyi çözümlerle karşılaştırmışlardır. Deney çalışma sonuçları incelendiğinde önerilen algoritmanın küçük boyutlu problemler için kısa sürelerde eniyi çözümleri üretebildiğini ve büyük boyutlu gerçek hayat problemlerinde de uygulanabileceği görülmüştür.

Rossi ve Dini [25], sıra bağımlı hazırlık ve taşıma sürelerinin dâhil edildiği esnek atölye tipi çizelgeleme probleminin çözümü için karınca kolonisi algoritması önermişlerdir. Karşılaştırma problemi çözümlerini literatürdeki diğer algoritmalar ile karşılaştırarak geliştirilen algoritmanın etkinliğini kanıtlamışlardır.

Rabiee ve diğerleri [51], ele aldıkları esnek atölye tipi çizelgeleme probleminin performans ölçütü olarak son işin tamamlanma zamanını ve toplam operasyon maliyetlerini en küçüklemeyi kullanmışlardır. Problemin çözümü için üç ayrı genetik algoritma ve bir evrimsel strateji önermişlerdir. Literatürde kullanılan test problemleri üzerinde yapılan deneysel çalışma sonucunda dört yöntem arasından daha iyi sonuç veren iki algoritmayı belirlemişlerdir.

Tang ve diğerleri [52], esnek atölye tipi çizelgeleme problemi için parçacık sürü optimizasyonu ile genetik algoritmayı birleştirerek melez bir algoritma önermişlerdir. Önerdikleri algoritmada yeni bir başlangıç çözümü bulma yöntemi geliştirmişlerdir. Problemin özelliklerine uygun olduğunu belirttikleri genetik operatörler kullanmışlardır. Önerilen çözüm yönteminin etkinliğinin ölçülmesi için literatürdeki problemleri kullanılmış ve diğer yöntemler ile karşılaştırıldığında daha iyi sonuçlar elde edildiğini göstermişlerdir.

Gutierrez ve Magarino [53], genetik algoritma ile onarım sezgisellerini birleştiren yeni bir sezgisel algoritma önermişlerdir. Önerilen algoritmanın başında genetik algoritma kullanarak problemin tüm kısıtlarını sağlamayan ve optimal/uygun olmayan bir çözüm elde etmişlerdir. Bu çözümü iyileştirmek/uygun hale getirmek için onarım sezgisellerinden yararlanmışlardır. Kısıtların karşılanma düzeyi ve üretim süresinin analiz edilmesi için test problemleri üzerinde uygulama yapılmış, çözüm yönteminin etkinliği gösterilmiştir.

Teekeng ve Thammano [54], esnek atölye tipi çizelgeleme probleminin çözümü genetik algoritma öneren diğer bir çalışmayı yapmışlardır. Ele alınan problem son işin tamamlanma zamanını en küçüklemeyi amaçlamaktadır. Önerilen algoritma; etkin bir seçim yöntemi, her bir nesildeki popülasyonu kümelemek için kullandıkları hiyerarşik kümeleme yaklaşımı ve yerel en iyi çözüme yakalanmanın üstesinden gelmek ve yığın çeşitliliğini sağlamak için yeni mutasyon operatörü içermektedir. Algoritmanın etkinliği, literatürdeki 10 iyi bilinen problem kullanılarak gösterilmiştir.

Zhang ve diğeri [55], son işin tamamlanma zamanının ve stok maliyetlerinin en küçüklenmesinin amaçlandığı ve taşıma kısıtlarının dikkate alındığı esnek atölye tipi çizelgeleme problemi için bir genetik algoritma önermişlerdir. Önerilen algoritma 5 çeşit problem üzerinde uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, hem atama hem çizelgeleme problemini çözmek için önerilen yöntemin etkili olduğunu göstermiştir.

Sadrzadeh [56], son işin tamamlanma zamanının ve ortalama gecikmenin en küçüklenmesi amacıyla sahip sıra bağımlı hazırlık sürelerinin dikkate alındığı esnek atölye tipi çizelgeleme problemi için yapay bağışıklık sistemi algoritması ve parçacık sürü optimizasyonu geliştirmişlerdir. Önerilen algoritmaların etkinliğini ölçmek ve sonuçları literatürdeki meta-sezgisel algoritmalarla karşılaştırmak için farklı boyutlarda 30 örnek üzerinde uygulanmıştır. Sonuçlar değerlendirilerek yapay bağışıklık sistemi algoritmasının parçacık optimizasyonu, genetik algoritma ve değişken komşu arama algoritmasından daha iyi olduğu gösterilmiştir.

Thammano ve Phu-ang [57], son işin tamamlanma zamanını en küçüklemeyi amaçlayan esnek atölye çizelgeleme problemi için melez bir yapay arı kolonisi algoritması geliştirmiştir. Problemi, işlerin sırasının belirlenmesi ve her işlem için en iyi makinenin seçilmesi olarak ikiye ayırmışlardır. Önerilen algoritmada başlangıç çözümünün oluşturulması için dağıtım kuralları ve harmoni arama algoritması kullanılmıştır. İki arama tekniği uygunluk değerleriyle orantılı bir olasılıkla rastgele seçilmiştir. Seçilen arama tekniği ilk çözüme uygulanarak komşular bulunmuştur. Yerel en iyi çözümden kaçınılması için tavlama benzetimi algoritması kullanılmıştır. Deneysel çalışma sonuçları algoritmanın esnek atölye tipi çizelgeleme probleminin çözümünde etkili olduğunu göstermiştir.

Gonzalez ve diğeri [58], esnek atölye tipi çizelgeleme problemi için iyileştirilemeyen koşullar da dikkate alınarak etkili komşuluk yapıları ve komşuların kalitesini hızlı tahmini için bir yaklaşım önerilmiştir. Çalışılan algoritmada tabu araması ve yolları yeniden bağlama (path relinking) kullanan dağılımlı arama yöntemini birleştirilmiştir. Önerilen algoritma problemler üzerinde uygulanarak deneysel analiz çalışması yapılmış ve literatürdeki problem çözümleri ile kıyaslanmış, bu yolla algoritmanın etkinliği kanıtlanmıştır.

Roshanaei ve arkadaşları [59], esnek atölye tipi çizelgeleme problemleri için yeni çözüm yaklaşımları geliştirmişlerdir. Öncelikle iki yeni pozisyon ve sıra bağımlı karışık tamsayı

doğrusal programlama modeli kurmuşlardır. Amaçları son işin tamamlanma zamanını en küçüklemektir. Bu amaca yönelik kurdukları matematiksel modelin etkinliğini ölçmek için deneysel çalışmalar yapmış ve karşılaştırma problemleri kullanmışlardır. Kurdukları modellerin literatürde kullanılan modellere göre daha iyi sonuçlar verdiğini göstermişlerdir. Ek olarak kullanılan karışık tamsayı doğrusal programlama modellerinin ne kadar etkin olsa da büyük problemlerde iyi sonuçlar elde edilemediğini belirtmişlerdir. Büyük problemler için ise yapay bağıklık ve tavlama benzetimi algoritmalarının birleşimiyle yeni bir meta-sezgisel algoritma sunmuşlardır. Küçük boyutlu problemler üzerinde algoritmanın etkinliğini karşılaştırma yaparak analiz etmişlerdir.

Palacios [60], son işin tamamlanma zamanının en küçüklenmesinin amaçlanarak belirsiz işlem sürelerinin dikkate alındığı bulanık esnek atölye tipi çizelgeleme problemi için sezgisel tohumlama ile genetik algoritma ve tabu arama algoritmasının birleştirildiği melez bir algoritma önermişlerdir. Başlangıç çözümlerinin bulunması için sezgisel yöntemlerden faydalanılmıştır. Her bir kromozom için tabu araması kullanılan bir genetik algoritma geliştirmişlerdir. Önerilen algoritmanın performansının ölçülebilmesi için net ve bulanık yapıdaki toplam 205 örnek ile karşılaştırma yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, melez algoritmanın hem net hem de bulanık örnekleri çözerken kaliteli çözümleri sağladığını göstermiştir.

Lei [61], toplam enerji tüketimini sınırlarken toplam gecikmeyi en küçüklemeyi amaçlayan esnek atölye tipi çizelgeleme problemi üzerinde çalışmıştır. Emperyalist rekabetçi algoritma ve değişken komşu arama yöntemlerine dayalı iki aşamalı bir sezgisel algoritma geliştirmiştir. Algoritmanın etkinliğini test etmek için yapılan çalışmaların sonuçları esnek atölye tipi çizelgeleme problemlerinin çözümü için rekabetçi bir algoritma olduğunu göstermiştir.

Esnek atölye tipi çizelge problemleri için yapılan sezgisel yöntemlere ilişkin çalışmalar Çizelge 4.2.'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.2. Sezgisel yöntemlere ilişkin çalışmalar

Yazar	Kullanılan Yöntem	Yıl
Brandimarte [41]	Tabu Arama Yöntemi	1993
Mastrolili ve Gambardella [42]	Tabu Arama Yöntemi	1996
Jensen [43]	Genetik Algoritma	2003
Tay ve Wibowo [44]	Evrimsel Algoritma	2004
Ong vd. [45]	Klonal Seçim Algoritması	2005
Gao vd. [46]	Genetik Algoritma	2006
Saidi-Mehrabad ve Fattahi [50]	Tabu Arama Yöntemi	2007
Rossi ve Dini [25]	Karınca Kolonisi Algoritması	2007
Gholami ve Zandieh [47]	Genetik algoritma ve tavlama benzetimini birleştiren melez bir algoritma	2009
Bagheri vd. [49]	Yapay bağışıklık tabanlı bütünleşik bir algoritma	2010
Yazdani vd. [48]	Tavlama Benzetimi Algoritması	2010
Tang vd. [52]	Parçacık sürü optimizasyonu ile genetik algoritmayı birleştiren melez bir algoritma	2011
Gutierrez ve Magarino [53]	Genetik algoritma ile onarım sezgiselleri kullanarak elde ettikleri melez bir algoritma	2011
Rabiee ve diğerleri [51]	Genetik algoritma ve evrimsel strateji	2012
Teekeng ve Thammano [54]	Değiştirilmiş genetik algoritma	2012
Zhang ve diğerleri [55]	Tabu arama algoritması ile genetik algoritma	2012
Sadrzadeh [56]	Yapay bağışıklık ve parçacık sürü optimizasyonu	2013
Thammano ve Phu-ang [57]	Melez yapay arı kolonisi algoritması	2013
Roshanaei vd. [59]	Yapay bağışıklık ve tavlama benzetimi	2013
Gonzalez vd. [58]	Tabu arama yöntemi ile dağılımlı arama ve yeniden bağlamının birleşimi	2015
Palacios [60]	Melez Algoritma (Genetik algoritma, tabu arama algoritması ve tohumlama algoritması)	2015
Lei vd.	Emperyalist rekabetçi algoritma ve değişken komşu aramadan oluşan iki aşamalı bir meta sezgisel algoritma	2018

5. ÖNERİLEN ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI

Esnek atölye tipi çizelgeleme problemleri işlerin seçilen makinelere atanması ve sıralanması alt problemlerinden oluşmaktadır. Bu tür problemlerin çözümü için literatürde hiyerarşik ve bütünleşik olmak üzere iki tür çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Sezgisel yapıda olan hiyerarşik çözüm yaklaşımlarında işlerin atama ve sıralama alt problemleri birbirinden bağımsız gerçekleştirilirken, bütünleşik yaklaşımda ise bu iki alt problem eş zamanlı olarak çözülmektedir [62].

Esnek atölye tipi çizelgeleme problemleri üzerine literatürde nispeten sınırlı sayıda çalışma vardır. Bu tür problemleri yüksek hesaplama karmaşasından dolayı geleneksel optimizasyon yöntemleriyle çözmek, optimal sonuçlarını elde etmek oldukça zordur. Bu tür problemlerin çözümünde sıklıkla sezgisel yöntemlere başvurulmaktadır [62].

Bu çalışmada çizelgeleme alanının en zor problem sınıfından olan esnek atölye tipi çizelgeleme probleminin vardiyalı çalışma süre kısıtı altında genişletilmiş halinin karışık tam sayılı programlama formülasyonu ve sezgisel yöntemler ile çözümüne yönelik önerilerde bulunulmuştur.

5.1. Problemin Matematiksel Modeli

Problemin karışık tamsayılı programlama yapısında olan matematiksel modeli aşağıda sunulmuştur.

İndisler

i Makine, $1 \leq i \leq m$

j İş, $1 \leq j \leq n$

l Operasyon, $1 \leq l \leq noo_j$. O_{jl} ise j işinin l . operasyonunu ifade etmektedir.

Parametreler

noo_j j işinin toplam operasyon sayısı

e_{jl}	O_{jl} operasyonu i makinesine atanmaya uygunsa 1, diğer durumlarda 0 değerini alır.
M	Çok büyük pozitif sayı
d_j	j işinin teslim zamanı
w_j	j işinin ağırlığı
P_{jli}	j işinin l . operasyonun i makinesindeki işlem süresi
vs	Vardiya uzunluğu

Karar değişkenleri

Modelde işlerin tamamlanma zamanlarını ifade etmek için C_{jl} ve C_{hn} kullanılmaktadır. C_{jl} değişkeni j işinin l . operasyonunun tamamlanma zamanını; C_{hn} değişkeni ise h işinin n . operasyonunun tamamlanma zamanını ifade eder. İşlere ait en son gerçekleşen operasyon tamamlanma zamanı C_{jnoo_j} ile ifade edilmektedir.

Y_{ji}	O_{jl} operasyonu i makinesine atanmış ise 1, diğer durumlarda 0 değerini alan karar değişkenidir.
S_{jl}	j işinin l . operasyonunun başlama zamanını
C_{jl}	j işinin l . operasyonunun tamamlanma zamanını
v_{jl}	j işinin l . operasyonunun gerçekleştirildiği vardiya
T_j	j işinin geç tamamlanma süresi
X_{jlhn}	i makinesinde gerçekleşen j işinin l . operasyonu (O_{jl}), h işinin n . operasyonundan (O_{hn}) önce gerçekleşiyorsa 1, diğer durumlarda 0 alan yardımcı karar değişkenidir.

Atama kısıtları

$$\sum_{i=1} Y_{ji} = 1 \quad \forall j, l, l \leq noo_j \quad (5.1)$$

$$Y_{ji} \leq e_{ji} \quad \forall j, l, i, l \leq noo_j \quad (5.2)$$

Eş. 5.1, bütün operasyonların makinelerden sadece birine atanmasını sağlamaktadır. Eş. 5.2, Eş. 5.1'deki operasyonlar için yapılacak makine atamalarının uygunluğunu belirlemektedir [63].

Operasyon sıralama kısıtları

$$C_{jl} \geq C_{j,l-1} + \sum_{i=1}^m Y_{jli} \cdot P_{jli} \quad \forall j, l, 2 \leq l \leq noo_j \quad (5.3)$$

$$C_{jl} = S_{jl} + \sum_{i=1}^m Y_{jli} \cdot P_{jli} \quad \forall j, l, l \leq noo_j \quad (5.4)$$

$$S_{jl} \geq C_{hn} - M \cdot (2 - Y_{jli} - Y_{hni}) - M \cdot X_{jlhn} \quad \forall j, l, h, n, i, j < h, e_{jli} = 1, e_{hni} = 1, \\ l \leq noo_j, n \leq noo_h \quad (5.5)$$

$$S_{hn} \geq C_{jl} - M \cdot (2 - Y_{jli} - Y_{hni}) - M \cdot (1 - X_{jlhn}) \quad \forall j, l, h, n, i, i < h, e_{jli} = 1, e_{hni} = 1, \\ l \leq noo_j, n \leq noo_h \quad (5.6)$$

Eş. 5.3, bir işin operasyonları arasında öncelik ilişkisini kurmaktadır. Bir işin bir önceki operasyonu henüz tamamlanmadan operasyonun başlayamamasını sağlar. Eş. 5.4, işlerin operasyonlarının başlangıç ve bitiş zamanları arasındaki ilişkiyi belirler. Eş. 5.5 ve Eş. 5.6, aynı makinede işlenen farklı işlerin operasyonları arasındaki sıralamayı yapar. Farklı işlerin operasyonları makinelerin aynı alt kümesini paylaşıyorsa bu kısıtların kullanım ihtiyacı ortaya çıkar [63].

Vardiyalı çalışma kısıtları

$$S_{jl} \geq (v_{jl} - 1) * vs \quad \forall j, l, l \leq noo_j \quad (5.7)$$

$$C_{jl} \leq v_{jl} * vs \quad \forall j, l, l \leq noo_j \quad (5.8)$$

Eş. 5.7 ve Eş. 5.8, her bir operasyonun aynı vardiyada başlamasını ve bitmesini sağlar.

Geç tamamlanma zamanı belirleme kısıtları

$$T_j \geq C_{jnoo_j} - d_j \quad \forall j \quad (5.9)$$

Eş. 5.9, işlerin geç tamamlanma sürelerinin hesaplanmasını sağlar.

Karar değişkenleri ve küme kısıtları

$$S_{jl}, C_{jl} \geq 0 \quad \forall j, l, l \leq noo_j \quad (5.10)$$

$$X_{jlmn}, Y_{jli} \in \{0,1\} \quad (5.11)$$

$$v_{jl} \geq 0 \text{ ve tamsayı} \quad (5.12)$$

Eş. 5.10, modelin süreklilik değişkenlerinin negatif olmadığını göstermektedir. Eş. 5.11, karar değişkenlerinin 0 ya da 1 değerini aldığını ifade etmektedir. Eş. 5.12, vardiya zamanına yönelik değişkenlerin tamsayı olduğunu göstermektedir.

Amaç fonksiyonu

$$\min \sum_{j=1}^n w_j \cdot T_j \quad (5.13)$$

Eş. 5.13, işlerin ağırlıklı geç tamamlanma süreleri toplamının en küçüklenmesini sağlamaktadır.

5.2. Önerilen Tavlama Benzetimi Algoritması

Tanıtilmasından bu yana, tavlama benzetimi algoritması, büyük ve karmaşık eniyileme problemleri için iyi sonuçlar üretmiştir [64]. Özellikle çizelgeleme problemlerinde çok başarılıdır [65]. Mevcut çözümden daha kötü olan komşu çözümleri belli bir olasılıkla kabul eder, bu nedenle yerel eniyi çözümlere takılmamış olur. Kabul olasılığı, algoritma boyunca azalan bir kontrol parametresi olan sıcaklık tarafından belirlenir [66]. Ele alınan esnek atölye çizelgeleme probleminin orta ve büyük boyutlu örneklerinin çözümü için tavlama benzetimi temeline dayanan sezgisel bir algoritma geliştirilmiştir. Algoritma sunumunda kullanılan notasyonlar aşağıda verilmiştir.

s_0	Başlangıç çözümü
s	Üretilen Komşu
s_{iyi}	İlgili zaman noktasına kadar elde edilen en iyi çözüm
$f(s_0)$	Başlangıç çözümünün amaç fonksiyonu değeri
$f(s)$	Üretilen komşunun amaç fonksiyonu değeri
$f(s_{iyi})$	En iyi çözümün amaç fonksiyonu değeri
T	Mevcut sıcaklık
T_0	Başlangıç Sıcaklığı
T_{son}	Bitiş sıcaklığı
σ	Soğutma oranı
μ	Aynı sıcaklıkta üretilen komşu sayısı, markov zinciri uzunluğu
θ	Hareket mekanizması seçim olasılığı

Tavlama benzetimi algoritması, verilen problemin S çözüm uzayında amaç fonksiyonu değeri en küçük olan çözümün araştırılmasında kullanılan yerel arama tabanlı stokastik bir arama tekniğidir. Standart algoritmasındaki parametreleri başlangıç sıcaklığı, bitiş sıcaklığı, soğutma oranı ve markov zinciri uzunluğu şeklindedir. Sıcaklık yavaş yavaş azaltılırken, her sıcaklık değerinde belirli sayıda yani markov zinciri uzunluğu kadar komşu çözüm üretilerek arama işlemi sürdürülür.

Standart tavlama benzetimi algoritması ana hatlarıyla şu şekilde çalışmaktadır [64]. Rassal olarak veya probleme özel bir kurucu sezgiselle belirlenen başlangıç çözümü (s_0) üzerinden arama süreci başlatılır. Başlangıçta mevcut çözüm (s) ve en iyi çözüm (s_{iyi}) başlangıç çözümüne eşitlenir. Mevcut çözüm üzerinden bulunan komşu çözüm (s') aday bir mevcut çözümdür. Öyle ki, eğer $f(s') \leq f(s)$ ise s' komşusu mevcut çözüm olarak alınır. Yeni mevcut çözüm üzerinden arama sürecine devam edilir. Aynı zamanda eğer $f(s') \leq f(s_{iyi})$ ise s' komşusu s_{iyi} olarak da atanır. Eğer $f(s') > f(s)$ ise mevcut iterasyondaki sıcaklık değeri ve amaç fonksiyonu değerleri arasındaki farka bağlı olarak hesaplanan kabul olasılığı (P_{kabul}) ile yine komşu çözüme hareket edilir. P_{kabul} , Eş. 5.15'teki gibi hesaplanır [64, 48].

$$P_{kabul} = e^{-\Delta/T} \quad (5.15)$$

Eş. 5.16 ile belirtilen Δ , amaç fonksiyonu değerindeki değişimi gösterir. Başlangıçta sıcaklık çok yüksek değerlere sahiptir ve algoritma ilerledikçe T azaltılır. Bu yapı komşu çözümün kabul olasılığını etkiler. Belirlenen son sıcaklığa ulaşıldığında algoritma sona erer [64, 22].

$$\Delta = f(s') - f(s) \quad (5.16)$$

Önerilen tavlama benzetimi algoritmasında s_{iyi} çözümü her güncellendiğinde s_{iyi} üzerinde hareket mekanizması olarak kullanılan ve aynı zamanda başlangıç çözümüne uygulanan yerel arama yöntemi uygulanarak olası tüm pozisyonlara yerleştirme yapılır ve yerel arama sonucu s_{iyi} çözümünden gidilebilecek daha iyi bir çözüm varsa bulunur ve s_{iyi} bulunan çözümle güncellenir. Sıcaklık sabitken μ sayısı kadar komşu üretilir. μ sayısı kadar komşu çözüme ulaşıldıktan sonra T sıcaklığı $T * \sigma$ kadar azaltılır. T sıcaklığı T_{son} değerine ulaşıncaya dek soğutma işlemine devam edilir. T_{son} değerine ulaşıldığında bulunan s_{iyi} çözümü problemin çözümü olarak raporlanır. Geliştirilen tavlama benzetimi algoritmasına ait sözde kod şekil 5.1.' de verilmiştir.

Algoritma 1: Önerilen Tavlama Benzetimi Algoritması

```

Rassal bir çözüm üretip  $s_0$ 'ı belirle;
 $s_0$ 'ı yerel aramayla iyileştir,  $s_0$ 'ı güncelle;
Amaç fonksiyonu  $f(s_0)$  hesapla;
Başlangıç sıcaklığı  $T_0$ 'ı belirle ve  $T=T_0$  al;
Son sıcaklığı  $T_{son}$  belirle;
 $s \leftarrow s_0$ ;  $f(s) \leftarrow f(s_0)$ ;
 $s_{iyi} \leftarrow s_0$ ;  $f(s_{iyi}) \leftarrow f(s_0)$ ;
while  $T \geq T_{son}$  do
     $i=1$ ;
    while  $i \leq \mu$  do
         $(0,1)$  aralığında düzgün dağılımdan bir rassal sayı üret ( $r$ );
        if  $r \geq \theta$  then
            yerel arama ile  $s$ 'nin bir komşusu olan  $s'$  çözümünü üret;
        else
             $(0,1)$  aralığında düzgün dağılımdan bir rassal sayı üret ( $r2$ );
            if  $r2 \geq 0.5$  then
                çiftli yer değiştirme hareketi ile  $s$ 'nin bir komşusu olan  $s'$  çözümünü üret;
            else
                yerleştirme hareketi ile  $s$ 'nin bir komşusu olan  $s'$  çözümünü üret;
            end
        end
    end
    if  $f(s') - f(s) \leq 0$  then
         $s \leftarrow s'$ ;
    else
         $(0,1)$  aralığında düzgün dağılımdan bir rassal sayı üret ( $u$ );
        if  $u \leq \exp(-(f(s') - f(s))/T)$  then
             $s \leftarrow s'$  ( $s'$  çözümünü kabul et);
        else
             $s$  ile devam et ( $s'$  çözümünü kabul etme);
        end
    end
     $f(s) \leq f(s_{iyi})$  ise  $s_{iyi} \leftarrow s$  ve  $s_{iyi}$  üzerinde yerel arama yaparak  $s_{iyi}$  güncelle;
     $i += 1$ ;
     $T = T * \sigma$ ;
end

```

Şekil 5.1. Tavlama benzetimi algoritması sözde kodu

5.2.1. Çözüm temsili

Esnek Atölye Tipi Çizelgeleme Probleminde işlere ait operasyonlar alternatif makinelerde işlem görebilir. Literatürdeki araştırmalar genellikle problemi iki alt problem olarak ayırmaktadır. Birinci alt problem, operasyonların makinelere atanması ve ikinci alt problem, makinelerdeki operasyonların sıralanmasıdır [65]. Çözümün gösterimi, alt problemleri iki ayrı kodlama ile temsil ederek ele alınır.

Zhang ve arkadaşlarının [65] çalışmalarında Esnek Atölye Tipi Çizelgeleme Problemi çözümünü temsil etmek için iki veri yapısı kullanmışlardır. Birinci veri yapısı makineleri, ikinci veri yapısı ise operasyonları temsil etmek için kullanılır. İlk veri yapısı her bir operasyonun işlem görebileceği alternatif makineler küme dizisinin indisini ifade eden tamsayı değerleri dizisidir. Dizinin uzunluğu, tüm işlerin operasyonları sayısının toplamına eşittir. İkinci veri yapısı, birinci veri yapısı ile aynı uzunluğa sahiptir. Bir işin tüm operasyonları aynı sayı ile listelenir ve öncelik kısıtlı operasyonlar kümesine göre yorumlanır; bu nedenle, bu sayıların herhangi bir permütasyonu bir operasyon dizisidir. Her j işi, noo_j sıralı işlemlerini temsil etmek için noo_j kez kullanılır. Permütasyon soldan sağa okunduğunda, bir iş indisinin k 'inci kez karşılaşılması, işin k 'inci operasyonu olduğunu gösterir. Her bir operasyon indisini, iş indisi ile değiştirerek göstermek, uygun olmayan çok sayıda gösterim oluşturulmasından kaçınılmasını sağlamaktadır.

Çözüm temsilinin daha iyi ifade edilmesi amacıyla operasyon sayıları sırasıyla 1, 2, 2, 4, 1, 1 ve 2 adet (toplam 13) olan 7 iş 3 makineli bir probleme ait kodlama aşağıda verilmiştir. Kodlama uzunluğu, toplam operasyon sayısının iki katı olan 26'ya eşittir.

1	7	4	2	4	2	6	4	5	7	3	4	3	1	2	1	3	3	1	2	2	1	3	2	2	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Kodlamamanın ilk bölümü operasyon sıralamasını vermektedir. 1-7-4-2-4-2-6-4-5-7-3-4-3 olan operasyon listesi $O_{11}-O_{71}-O_{41}-O_{21}-O_{42}-O_{22}-O_{61}-O_{43}-O_{51}-O_{72}-O_{31}-O_{44}-O_{32}$ sıralamasının gösterimidir. İkinci bölüm ise operasyonların atandığı makine bilgilerine sahiptir. Verilen kodlamaya göre O_{11} operasyonu 1 nolu makineye, O_{71} operasyonu 2 nolu makineye, O_{41} operasyonu yine 1 nolu makineye, O_{21} operasyonu 3 nolu makineye vb. atanmıştır.

5.2.2. Başlangıç çözümü

Yöntemin başlangıç aday çözümü rassal olarak elde edilmiştir. Daha iyi bir sonuç yakalayabilmek, çözüm kalitesini yüksek tutmak için rassal olarak üretilen başlangıç aday çözümü üzerine yerleştirme hareketi tabanlı bir iyileştirme mekanizması ile yerel arama yöntemi uygulanmıştır.

5.2.3. Yerel arama yöntemi

Mevcut bir çizelgede bulunan işlerden biri seçilir ve olası tüm pozisyonlara yerleştirme işlemi uygulanarak yeni çizelgeler üretilir. Bu şekilde seçilen bir pozisyondaki operasyonun yerleştirme hareketiyle oluşturabileceği tüm komşuları arasından arama yapılmış olur. Oluşturulan komşu çizelgelerden eniyi amaç fonksiyonu değerine sahip olan seçilir. İşleme mevcut çizelgede bulunan diğer tüm işler için aynı uygulama yapılarak devam edilir. Çözümün hiçbir pozisyonu için iyileşme sağlanamazsa süreç sona erer. Bu yolla, mevcut bir çizelgeden yerleştirme hareketi kullanılarak gidilebilecek en iyi çözüm elde edilmiş olur. Elde edilen son çizelge, mutlaka mevcut çizelgeye eşit veya ondan daha iyi olacaktır.

Önerilen algoritma kapsamında yerel arama yöntemi hem rassal oluşturulan başlangıç çözümüne uygulanmakta, hem de en iyi çözüm güncellendikçe en iyi çözüme uygulanmaktadır.

5.2.4. Hareket mekanizması

Başlangıç çözümü üzerinden üretilen komşu çözümlerde çiftli yer değiştirme, yerleştirme ve yerel arama yöntemi kullanılmıştır. Yeni komşular üretilirken θ oranında yerel arama, $(1 - \theta)$ oranında ise çiftli yer değiştirme ve yerleştirme hareketlerinden biri 0,5 olasılıkla uygulanmaktadır.

Çiftli yer değiştirme (swap) mekanizması

Mevcut çizelgede bulunan iş sıralamasından rassal olarak seçilen bir pozisyondaki iş yine rassal olarak seçilen farklı bir pozisyondaki iş ile yer değiştirir. Diğer pozisyonlardaki işlerde değişiklik yapılmaz.

Mevcut Çizelge	Rassal Seçilen pozisyonlar	Yeni Çizelge
1-7-4-2-4-2-6-4-5-7-3-4-3	4-8	1-7-4-4-4-2-6-2-5-7-3-4-3

Yerleştirme mekanizması

Mevcut çizelgede bulunan iş sıralamasından rassal olarak seçilen bir pozisyonda bulunan iş yine rassal olarak seçilen farklı bir pozisyona yerleştirilir. Yerleştirme yapılan pozisyondan sonraki işlerin sırası birer kaydırılır.

Mevcut Çizelge	Rassal Seçilen pozisyonlar	Yeni Çizelge
1-7-4-2-4-2-6-4-5-7-3-4-3	4-8	1-7-4-4-2-6-4-2-5-7-3-4-3

Yerel arama

Mevcut çizelgede bulunan iş sıralamasından bir iş seçilir ve olası tüm pozisyonlara yerleştirme işlemi uygulanarak yeni çizelgeler üretilir. Üretilen çizelgelerden en iyi sonucu veren seçilir. Çizelgedeki diğer işler olası tüm pozisyonlara yerleştirilerek devam edilir.

Mevcut Çizelge	Rassal Seçilen pozisyon	Yeni Çizelge
1-7-4-2-4-2	2	7-1-4-2-4-2
		1-4-7-2-4-2
		1-4-2-7-4-2
		1-4-2-4-7-2
		1-4-2-4-2-7

5.2.5. Soğutma planı

Algoritmada, belirlenen σ değeri ile geometrik soğutma planı [66] uygulanmıştır. Aynı sıcaklıkta markov zinciri uzunluğu kadar komşu üretimi yapıldıktan sonra başlangıç sıcaklığı olan T değeri $(1 - \sigma)\%$ kadar azaltılır. Mevcut pozisyon k olmak üzere pozisyonun sıcaklığı Eş. 5.14 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$T_k = T_{k-1} * \sigma \quad 0 < \sigma < 1 \quad (5.14)$$



6. DENEYSEL ÇALIŞMA

Çalışmanın bu bölümünde literatürde kullanılan esnek atölye tipi çizelgeleme karşılaştırma problemleri vardiyalı çalışma yapısı ve ağırlıklı geç tamamlanma süreleri hesaplaması için genişletilmiş, önerilen karışık tamsayılı programlama modeli ve sezgisel algoritma ile çözülmüş ve sonuçlar raporlanmıştır. Aynı zamanda, problem çözümünde en etkin parametre değerlerinin belirlenmesi amacıyla, geliştirilen tavlama benzetimi algoritması için parametre analizi yapılmıştır.

6.1. Test Problemleri

Önerilen çözüm yaklaşımlarının etkinliğini test etmek için literatürde kullanılan esnek atölye tipi çizelgeleme karşılaştırma problemleri kullanılmıştır [45, 46]. Literatürde kullanılan farklı boyutlardaki test problemleri iş sayısı, operasyon sayısı, makine sayısı, operasyonların işlenebileceği makine ve operasyonların makinelerdeki işlem sürelerinden oluşmaktadır. İlgili verilerin bu çalışmada dikkate alınan problem yapısına uyarlanması için işlere teslim tarihleri ve ağırlıklar dahil edilmiştir.

İşlerin teslim tarihlerinin belirlenmesi amacıyla, literatürde yaygın olarak kullanılan Toplam İş Yükü Yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde teslim tarihi ait olacağı işin operasyon süreleri toplamının belirli bir katı olarak hesaplanmaktadır. Her bir iş için teslim tarihi üretme, ilgili işin tüm operasyonlarının işlem sürelerini toplayarak ve bu toplamı gecikme sıklığını temsil eden belirli bir kat sayı değeri (c) ile çarparak yapılır. İşin teslim tarihini gevşek, orta ve sıkı yapmak için c değeri sırasıyla, literatüre uygun şekilde, 1,2; 1,5 ve 1,8 olarak alınmıştır [67]. İşlere ait ağırlık değerleri ise, Binchao ve Timothy [68]'in çalışmalarında olduğu gibi, [0,001; 0,999] aralığındaki düzgün dağılım kullanılarak belirlenmiştir. Vardiya süreleri ele alınacak gerçek probleme uygun makul değerler olması amacıyla 450, 675, 900 dakika olarak kullanılmıştır.

6.2. Karışık Tamsayılı Programlama Modeli Performans Analizi

Karışık tamsayılı programlama modeli GAMS / CPLEX 36.2.0 paket programında çözümlenerek en iyi sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Çözücüye izin verilen maksimum CPU zamanı bir saat yani 3600 saniye olarak ayarlanmıştır. FJSP_Fattahi_17, FJSP_Fattahi_18,

FJSP_Fattahi_19 problemleri için belirlenmiş teslim tarihi ve vardiya sürelerine göre elde edilen sonuçlar Çizelge 6.1.'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. c katsayısı ve vardiya süresi değişimine göre amaç fonksiyonu değerleri

Problem Adı	$n \times o \times m$	c	Vardiya Süresi	Çözüm Zamanı (saniye)	Optimum	Amaç Fonksiyonu
FJSP_Fattahi_17	8x4x7	1,2	450	121,09	1*	275,26
FJSP_Fattahi_17	8x4x7	1,2	675	505,06	1	336,56
FJSP_Fattahi_17	8x4x7	1,2	900	299,97	1	197,87
FJSP_Fattahi_17	8x4x7	1,5	450	344,3	1	150,48
FJSP_Fattahi_17	8x4x7	1,5	675	579,05	1	64,99
FJSP_Fattahi_17	8x4x7	1,5	900	3600,08	8**	48,83
FJSP_Fattahi_17	8x4x7	1,8	450	392,75	1	14,95
FJSP_Fattahi_17	8x4x7	1,8	675	2,69	1	0
FJSP_Fattahi_17	8x4x7	1,8	900	1,8	1	0
FJSP_Fattahi_18	9x4x8	1,2	450	460,09	1	442,9
FJSP_Fattahi_18	9x4x8	1,2	675	771,56	1	341,6
FJSP_Fattahi_18	9x4x8	1,2	900	3600,08	8	515,21
FJSP_Fattahi_18	9x4x8	1,5	450	382,81	1	24,95
FJSP_Fattahi_18	9x4x8	1,5	675	115,83	1	4,39
FJSP_Fattahi_18	9x4x8	1,5	900	3600,19	8	41,63
FJSP_Fattahi_18	9x4x8	1,8	450	1303	1	1,13
FJSP_Fattahi_18	9x4x8	1,8	675	1925,13	1	0
FJSP_Fattahi_18	9x4x8	1,8	900	1032,02	1	0
FJSP_Fattahi_19	11x4x8	1,2	450	3600,02	8	571,95
FJSP_Fattahi_19	11x4x8	1,2	675	3600,10	8	764,75
FJSP_Fattahi_19	11x4x8	1,2	900	3600,08	8	1347,61
FJSP_Fattahi_19	11x4x8	1,5	450	3600,03	1	434,37
FJSP_Fattahi_19	11x4x8	1,5	675	3600,14	8	398
FJSP_Fattahi_19	11x4x8	1,5	900	3600,06	8	399,77
FJSP_Fattahi_19	11x4x8	1,8	450	3600,63	8	160,96
FJSP_Fattahi_19	11x4x8	1,8	675	3600,06	8	32,97
FJSP_Fattahi_19	11x4x8	1,8	900	3600,03	8	16,41

n : İş sayısı; o : Toplam operasyon sayısı; m : Makine sayısı; c : Teslim zamanı belirleme katsayısı; * Optimal çözüm; ** Uygun çözüm

Elde edilen sonuçlar c katsayısı değişimine göre incelendiğinde; c 'nin düşük tutulduğu durumlarda işlere atanan teslim tarihleri kısaldığı için amaç fonksiyonu değerinde artış, büyük tutulduğu durumda ise teslim tarihleri uzadığı için amaç fonksiyonu değerinde azalış yaşandığı görülmüştür. c , orta bir değer aldığı anda ise toplam amaç fonksiyonu değerinde ortalama değerlerde olduğu gözlemlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar vardiya süresindeki değişime göre incelendiğinde; sürenin kısa tutulduğu durumlarda operasyonların makinelerde atanması sonrası işleme alınması aşamasındaki üretim süresinin kısılmasıyla amaç fonksiyonu değerinde artış, uzun tutulduğu durumlarda üretim süresinin artmasıyla amaç fonksiyonu değerinde azalış yaşandığı görülmüştür.

Çizelge 6.2.' de görüldüğü şekilde, vardiya süresi 450 iken çözümlerin %78'i, 675 iken %67'si, 900 iken %33'ü optimal bulunmuştur. Vardiya süresi arttıkça optimal sonucu bulunan problem sayısı azalmıştır.

Çizelge 6.2. Vardiya süresi değişiminde optimal çözümü bulma durumu

Vardiya Süresi	Optimal Çözüm Sayısı	Uygun Çözüm Sayısı
450	7	2
675	6	3
900	3	6

Çizelge 6.3.' de görüldüğü şekilde, c katsayısı 1.2 iken çözümlerin %56'sı, 1.5 iken %56'sı, 1.5 iken %67'si optimal bulunmuştur. c katsayısı değişiminin optimal sonuca ulaşmada doğrudan etkisi olmadığı görülmüştür.

Çizelge 6.3. c katsayısı değişiminde optimal çözümü bulma durumu

c	Optimal Çözüm Sayısı	Uygun Çözüm Sayısı
1.2	5	4
1.5	5	4
1.8	6	3

Problem çözümlerine bakıldığında en fazla optimal sonuca vardiya süresi 450 iken ulaşıldığı; çözümlerde elde edilen amaç fonksiyonu değerlerine bakıldığında ise en uygun değerlerin c katsayısı 1.5 iken elde edildiği görülmüştür. c katsayısı 1.5 ve vardiya süresi 450 iken tüm test problemlerinin amaç fonksiyonu değerleri Çizelge 6.4.'de verilmiştir.

Tüm test problemlerinin çözümleri incelenecek olursa; çeşitli boyutlardaki toplam 24 adet test probleminin 20 tanesinde, %83'ünde optimal sonucun bulunduğu görülmüştür. 11 iş, 4'er operasyon ve 8 makineden oluşan problem boyutundan sonraki boyutlarda optimal sonuçlar elde edilememiştir. Problem boyutu arttıkça optimal çözümler yerine uygun çözümler bulunmaya başlandığı görülmüştür. Bu durum büyük boyutlu gerçek hayat problemleri için karışık tamsayı programlama modelinin yetersiz kaldığını göstermektedir. Orta ve büyük boyutlu problemlerin için sezgisel algoritma kullanımı ihtiyacı ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 6.4. Tüm test problemlerinin amaç fonksiyonu değerleri

Problem Adı	$n \times o \times m$	c	Vardiya Süresi	Çözüm Zamanı	Optimum	Amaç Fonksiyonu
FJSP_Fattahi_01	2x2x2	1,5	450	0,06	1*	0
FJSP_Fattahi_02	2x2x2	1,5	450	0,08	1	0
FJSP_Fattahi_03	3x2x2	1,5	450	0,09	1	1,88
FJSP_Fattahi_04	3x2x2	1,5	450	0,09	1	0
FJSP_Fattahi_05	3x2x2	1,5	450	0,09	1	0,79
FJSP_Fattahi_06	3x3x3	1,5	450	0,08	1	0
FJSP_Fattahi_07	3x3x5	1,5	450	0,06	1	0
FJSP_Fattahi_08	3x3x4	1,5	450	0,08	1	0
FJSP_Fattahi_09	3x3x3	1,5	450	0,08	1	0
FJSP_Fattahi_10	4x3x5	1,5	450	0,09	1	13,67
FJSP_Fattahi_11	5x3x6	1,5	450	0,08	1	0
FJSP_Fattahi_12	5x3x7	1,5	450	0,64	1	3,12
FJSP_Fattahi_13	6x3x7	1,5	450	0,77	1	3,98
FJSP_Fattahi_14	7x3x7	1,5	450	0,94	1	0
FJSP_Fattahi_15	7x3x7	1,5	450	1,64	1	3,87
FJSP_Fattahi_16	8x3x7	1,5	450	7,3	1	24,18
FJSP_Fattahi_17	8x4x7	1,5	450	344,3	1	150,48
FJSP_Fattahi_18	9x4x8	1,5	450	382,81	1	24,95
mt10	10x10x10	1,5	450	155,7	1	29,62
FJSP_Fattahi_19	11x4x8	1,5	450	3581,03	1	434,37
FJSP_Fattahi_20	12x4x8	1,5	450	3600,05	8**	426,72
Hurink et al-la10	15x5x5	1,5	450	3600,11	8	1005,31
mt10c1	10x10x11	1,5	450	3600,06	8	202,37
Hurink et al-la40	15x9x15	1,5	450	3600,84	8	4053,31

n : İş sayısı; o : Toplam operasyon sayısı; m : Makine sayısı; c : Teslim zamanı belirleme katsayısı; * Optimal çözüm; ** Uygun çözüm

6.3. Tavlama Benzetimi Algoritması İçin Parametre Analizi

Önerilen tavlama Benzetimi tabanlı sezgisel algoritmanın uygun parametre değerlerinin belirlenmesi amacıyla parametre optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla FJSP_Fattahi_17, FJSP_Fattahi_18, FJSP_Fattahi_19 karşılaştırma problemleri kullanılmıştır. Önerilen algoritma kapsamında kullanılan parametreler; başlangıç sıcaklığı, bitiş sıcaklığı, markov zinciri uzunluğu, σ değeri ve θ değeridir. Bu değerlerin tam faktöriyel deney tasarımı temelinde her bir kombinasyonu için her bir problem 5 kez çözülmüş ve en iyi çözümler kaydedilmiştir. Çalışma kapsamında, her bir parametre için, dikkate alınan farklı değerler ve en iyi performans gösteren değer Çizelge 6.5'te sunulmuştur.

Çizelge 6.5. Parametre analizinde kullanılan değerler

Parametre	İncelenen Değerler Kümesi	Seçilen Değer
Başlangıç Sıcaklığı	100, 500, 1000	500
Son Sıcaklık	1, 100, 250	1
μ	50, 100, 500	100
σ	0,9; 0,95; 0,99	0,99
θ	0,1; 0,5; 0,8	0,5

6.4. Önerilen Tavlama Benzetimi Algoritması Performans Analizi

Tavlama Benzetimi tabanlı sezgisel algoritmanın geliştirilmesindeki temel neden önerilen matematiksel formülasyonun tespit edilen gerçek hayat problemini çözmeye yetersiz kalmasıdır. Bu durum, matematiksel modelin uzunca bir süre çalıştırılmasına rağmen hiç çözüm bulamamasından anlaşılmıştır. Bu bölüm kapsamında karışık tamsayılı programlama modeli ile en iyi çözüm değerleri bulunan tüm problemler, daha önce belirlenen parametre değerlerini kullanan sezgisel ile çözdürülmüştür. Çözüm sonuçları Çizelge 6.6.'te verilmiştir. Önerilen tavlama benzetimi algoritmasının performansını değerlendirmek için Sapma Oranı (En iyi bulunan değerden sapma) Eş. 6.1'deki şekilde hesaplanmıştır:

$$Sapma\ Oranı = \frac{TB\ Çözüm\ değeri - Karışık\ tamsayılı\ programlama\ ile\ bulunan\ eniyi\ değer}{Karışık\ tamsayılı\ programlama\ ile\ bulunan\ eniyi\ değer} \quad (6.1)$$

Çizelge 6.6. Tavlama benzetimi algoritması ile bulunan sonuçlar

Problem Adı	$n \times o \times m$	Tavlama Benzetimi En İyi Değer	Matematiksel Model En İyi Değer	Sapma Oranı	CPU (sn)
FJSP_Fattahi_01	2x2x2	0	0	0	0
FJSP_Fattahi_02	2x2x2	0	0	0	0
FJSP_Fattahi_03	3x2x2	1,88	1,88	0	0,147144
FJSP_Fattahi_04	3x2x2	0	0	0	0
FJSP_Fattahi_05	3x2x2	0,79	0,79	0	0,14706
FJSP_Fattahi_06	3x3x3	0	0	0	0,022076
FJSP_Fattahi_07	3x3x5	0	0	0	0,015668
FJSP_Fattahi_08	3x3x4	0	0	0	0,015629
FJSP_Fattahi_09	3x3x3	0	0	0	0,022133
FJSP_Fattahi_10	4x3x5	13,67	13,67	0	0,522511
FJSP_Fattahi_11	5x3x6	0	0	0	0,162861
FJSP_Fattahi_12	5x3x7	3,12	3,12	0	7,831251
FJSP_Fattahi_13	6x3x7	3,98	3,98	0	13,99214
FJSP_Fattahi_14	7x3x7	0	0	0	0,969884
FJSP_Fattahi_15	7x3x7	3,87	3,87	0	22,57643
FJSP_Fattahi_16	8x3x7	24,18	24,18	0	34,94598
FJSP_Fattahi_17	8x4x7	150,48	150,48	0	441,794
FJSP_Fattahi_18	9x4x8	34,64	24,95	0,38853	552,5608
mt10	10x10x10	40,29	29,62	0,36008	732,301
FJSP_Fattahi_19	11x4x8	434,37	434,37	0	1089,919

n : İş sayısı; o : Toplam operasyon sayısı; m : Makine sayısı; c : Teslim zamanı belirleme katsayısı

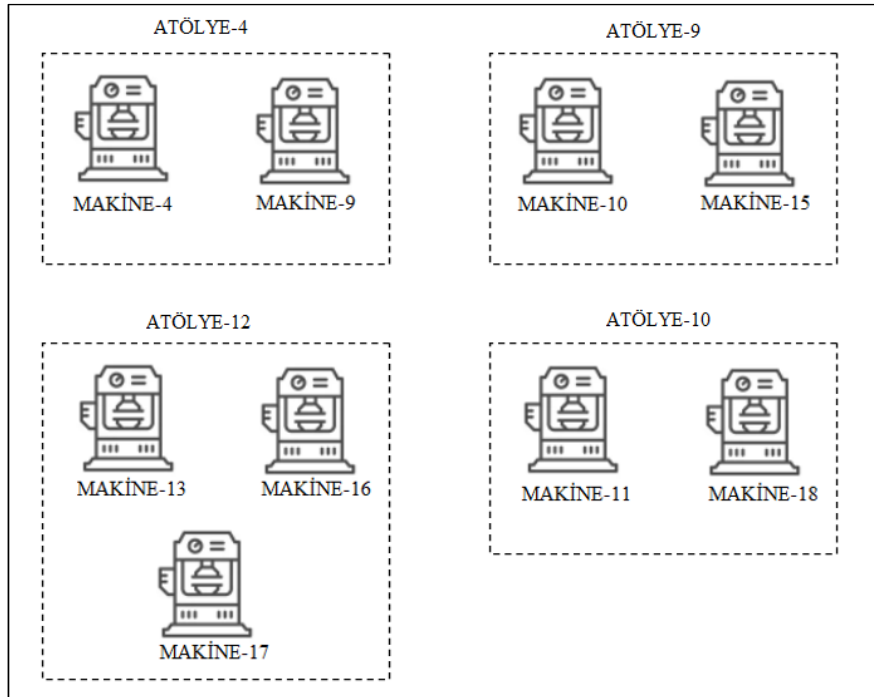
Optimal sonucu bilinen 20 adet test probleminin geliştirilen tavlama benzetimi algoritması ile çözümünden elde edilen değerler incelendiğinde; algoritmanın problemlerin 18 tanesinde, %90'ında optimal sonuca ulaştığı görülmüştür. 2 adet problemde optimal sonuçtan sapma tespit edilmiştir. Bu problemlerde algoritmanın stokastik yapısı nedeniyle yerel optimal çözümden çıkılamadığı düşünülmektedir. Problemlerin neredeyse tamamında optimal çözüme ulaşılabilirdiği için kullanılan sezgisel yöntemin optimale yakınlık performansının oldukça iyi olduğu söylenebilir. Bu sebeple de çalışmada ele alınan gerçek hayat probleminin çözümünde geliştirilen tavlama benzetimi algoritmasından faydalanılmıştır.

7. GERÇEK HAYAT PROBLEMİ ÜZERİNDE UYGULAMA

Bu bölümde, uygulama yapılan üretim sisteminde tespit edilen çizelgeleme problemi konusunda bilgiler verilecek problemin çözümü gerçekleştirilecektir. Firmanın gizlik politikaları gereği firma, makinelerin mahiyeti ve ürün bilgileri tez kapsamında yayınlanmamıştır. Üretim sisteminde her bir işe ait birden çok operasyon bulunmakta olup bu operasyonlar belirli bir rota kapsamında yapılmaktadır. İşler; operasyon sayısı, mahiyeti ve rotası bazında birbirinden farklıdır. Her bir işlem aşamasında alternatif paralel makineler söz konusu olup problemdeki en bariz özellik, çalışma sürecinin vardiyalardan oluşmasıdır. Performans ölçütü sipariş gecikmelerinden kaynaklanan maliyettir ve firma yetkililerinden alınan bilgiye göre toplam ağırlık geç tamamlanma zamanının en küçüklenmesi bu maliyeti en küçükleyecektir.

7.1. Atölye Ortamı

Ele alınan üretim ortamında 13 adet atölye ve bunlarda yerleşik toplam 18 adet makine bulunmaktadır. Atölyelerde bulunan alternatif makineler Şekil 7.1.'de betimlenmiştir. Geri kalan 9 makineye ait alternatif bulunmamaktadır.



Şekil 7.1. Atölye ortamı

Çizelge 7.1. (devam) Operasyonların makinlerdeki işlem süreleri

İş	Operasyon	Makine																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
18	J18-1													154			154	154	
	J18-2									126					126				
	J18-3													153					
	J18-4										281								281
	J18-5				140					140									
19	J19-1													54			154	54	
	J19-2									126					126				
	J19-3													153					
	J19-4										181								181
	J19-5				140					140									
20	J20-1													54			54	54	
	J20-2									126					126				
	J20-3													153					
	J20-4										181								181
	J20-5				140					140									
21	J21-1													54			54	54	
	J21-2									126					126				
	J21-3													153					
	J21-4										181								181
	J21-5				140					140									
22	J22-1									241					241				
	J22-2												254			254	254		
	J22-3												90			90	90		
	J22-4												248			248	248		
	J22-5										181								181
23	J23-1									241					241				
	J23-2												254			254	254		
	J23-3												248			248	248		
	J23-4										181								181
	J23-5											230							
24	J24-1					377													
	J24-2				225					225									
	J24-3									126					126				
	J24-4										181								81
	J24-5							177											
	J24-6											230							
25	J25-1									241					241				
	J25-2												254			254	254		
	J25-3												248			248	248		
	J25-4									126					126				
	J25-5										81								81
	J25-6											230							
26	J26-1									241					241				
	J26-2												254			254	254		
	J26-3												290			290	290		
	J26-4												248			248	248		
	J26-5									126					126				
	J26-6											281							281

İşlerin teslim zamanları ve firma yetkilileriyle belirlenen ağırlıkları çizelge 7.2’de görüldüğü gibidir. Yine aynı çizelgede, firmada belirtilen işler için uygulanmış çizelgeye ilişkin özet bilgiler de (işlerin tamamlanma zamanları ve ağırlıklı geç tamamlanma değerleri) sunulmuştur.

Çizelge 7.2. İşlerin teslim tarihleri ve ağırlıkları

İş	Ağırlık	Teslim Zamanı	Tamamlanma Zamanı	Ağırlıklı geç tamamlanma değeri
1	0,01	1350	4340	29,9
2	0,05	1350	3440	104,5
3	0,01	1350	4926	35,76
4	0,08	1350	2090	59,2
5	0,02	1350	5090	74,8
6	0,08	4050	3740	0
7	0,08	1350	1490	11,2
8	0,08	1350	1190	0
9	0,08	4050	2990	0
10	0,08	1350	1640	23,2
11	0,02	2700	3120	8,4
12	0,04	2700	2980	11,2
13	0,08	1350	1330	0
14	0,08	1350	1130	0
15	0,08	1350	1877	42,16
16	0,04	12150	3580	0
17	0,08	6750	3571	0
18	0,07	13500	2671	0
19	0,07	6750	5090	0
20	0,03	9450	2840	0
21	0,08	8100	3880	0
22	0,08	5400	2881	0
23	0,01	9450	2480	0
24	0,01	4050	2930	0
25	0,01	12150	2237	0
26	0,08	4050	3431	0
Toplam				400,32

Mevcut çizelgeye göre işlerin ağırlıklı geç tamamlanma süreleri toplamı 400,32 olarak hesaplanmıştır ve toplam 12 vardiyada tüm işlerin tamamlandığı görülmüştür. Probleme ilişkin firmada gerçekleşen mevcut çizelge şekil 7.2.’deki gibidir. Bir vardiyada işleme alınan operasyonun aynı vardiyada tamamlanması gerektiğinden vardiya geçişleri öncesinde makinelerde boş zamanlar oluşmaktadır. Ayrıca, öncelik ilişkileri nedeniyle de makinelerde operasyonlar arası boş zamanlara rastlanmaktadır.

7.3. Problemin Önerilen Sezgiselle Çözümü

Gerçek hayat problemi kapsamında ele alınan 26 işli, 18 makineli ve 127 operasyonlu esnek atölye tipi çizelgeleme probleminin NP-zor yapısından dolayı en iyi çözümünü bulmak karışık tamsayılı programlama modeli ile mümkün olmamıştır. Bu nedenle kaliteli bir çözüm elde edilebilmek için tavlama benzetimi üzerinde çalışılmıştır.

Geliştirilen sezgisel algoritma ile elde edilen çizelgeye göre işlerin ağırlıklı geç tamamlanma süreleri toplamı 239 olarak hesaplanmıştır ve toplam 11 vardiyada tüm işlerin tamamlandığı görülmüştür. Operasyonların vardiya süreleri içerisinde makinelere atanması ve sıralanması sonucu oluşan çizelge şekil 7.3.'te verilmiştir.

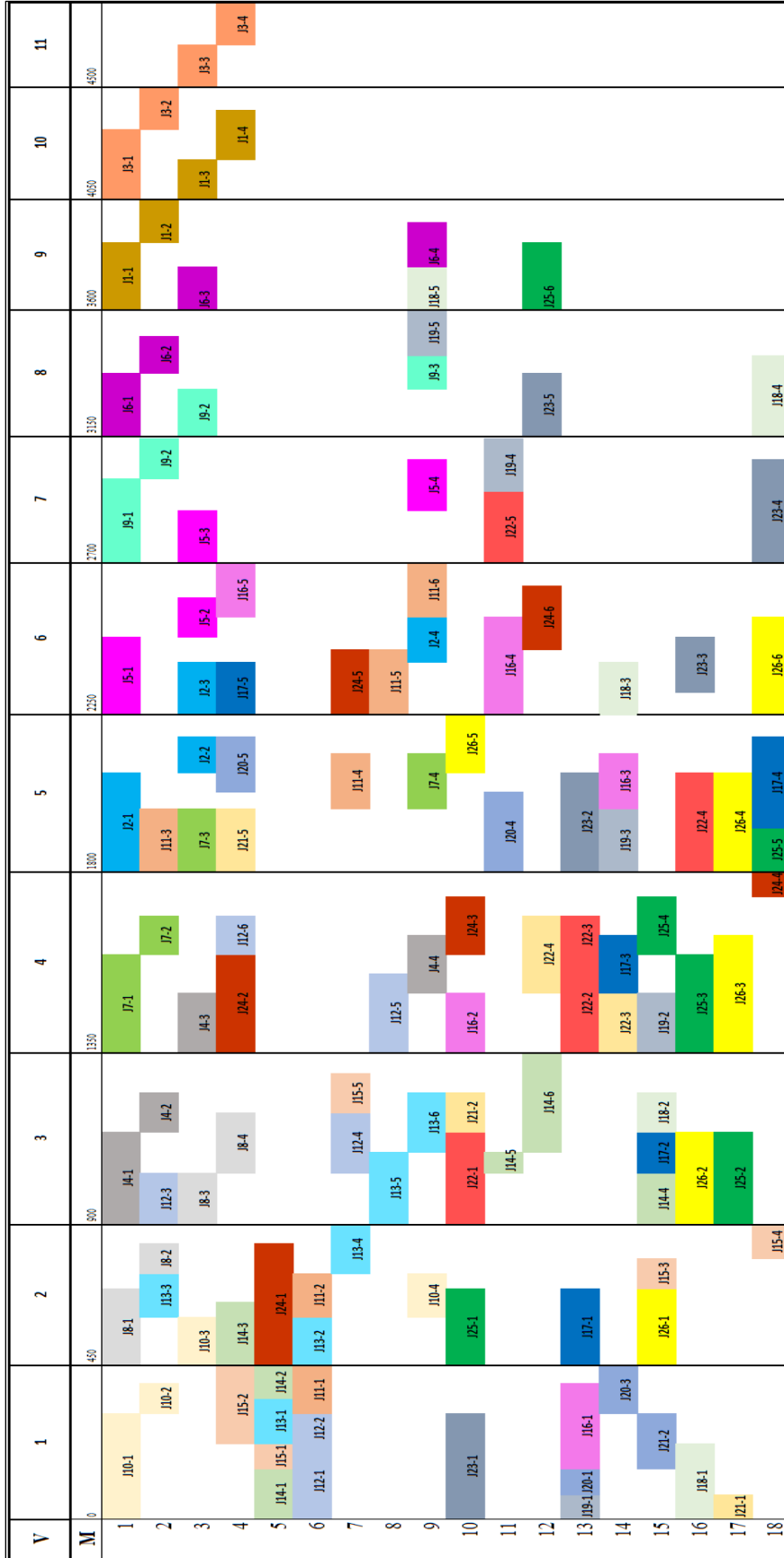
Çalışmada kullanılan tavlama benzetimi algoritması ile firmadaki mevcut çizelgeye kıyasla işlerin ağırlıklı geç tamamlanma süreleri toplamında iyileşme elde edildiği görülmüştür. Mevcut çözüm üzerinde elde edilen iyileşme yüzdesi Eş. 7.1'deki gibi hesaplanmıştır:

$$iyileşme \% = \frac{\text{önerilen çözüm} - \text{mevcut çözüm}}{\text{mevcut çözüm}} \times 100 \quad (7.1)$$

Çalışmada önerilen sezgisel algoritmanın problemin çözümünde sağladığı iyileştirme Çizelge 7.3'te verilmiştir:

Çizelge 7.3. Mevcut çözüm ve önerilen çözüm karşılaştırması

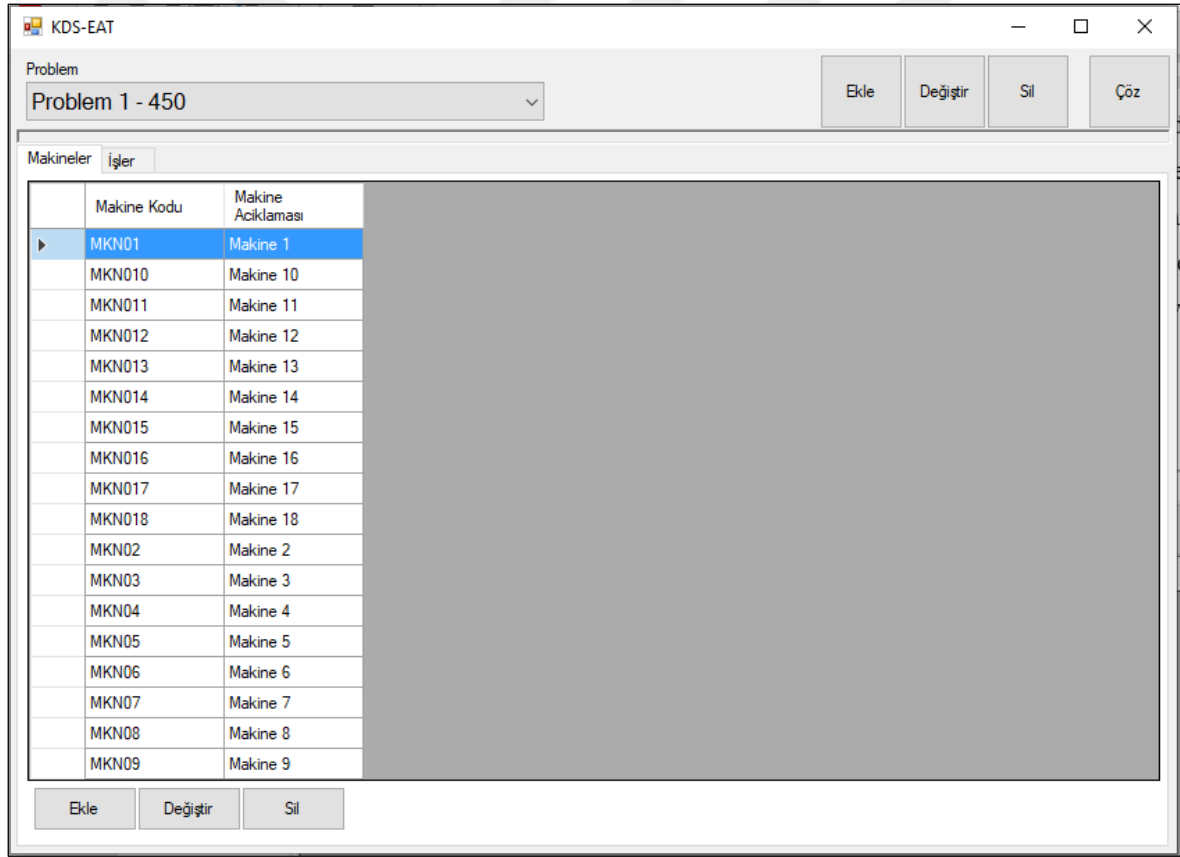
Mevcut Çözüm	Önerilen Çözüm	İyileşme
400,32	239	40,29 %



Şekil 7.3. Önerilen çizelge

8. KARAR DESTEK SİSTEMİ

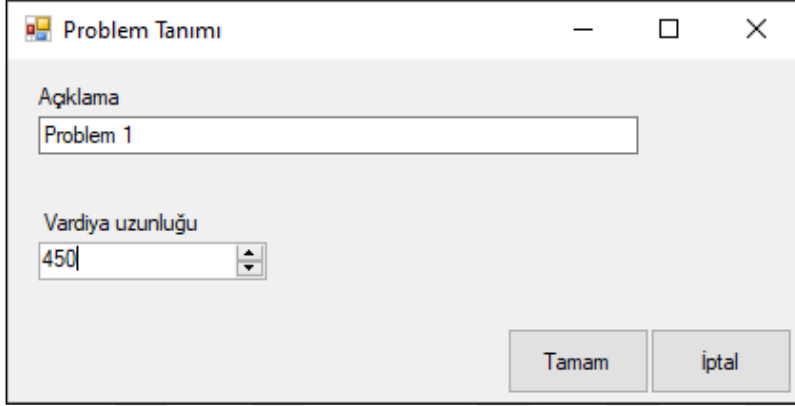
Esnek atölye tipi çizelgeleme problemlerinin geliştirilen tavlama benzetimi algoritması ile çözülmesini sağlayacak bir karar destek sistemi kurulmuştur. Oluşturulan bu sistemde, karar vericiler tarafından çözülmesi beklenen problem, probleme konu olan makine ve işler, işlere ait operasyonlar ve operasyonların alternatif makinelerdeki işlem süreleri tanımlanır. Probleme ait tüm tanımlamalar yapıldıktan sonra sezgisel algoritma yardımıyla çözülür. Sistem tarafından çözüm çizelgesi gantt şeması olarak görselleştirilir. Karar vericiler, operasyonların makinelere atandığı çizelgeyi vardiya bazlı bölünmüş olarak detaylı görüntülerler. Karar destek sistemine ait ana ekran şekil 8.1.'deki gibidir.



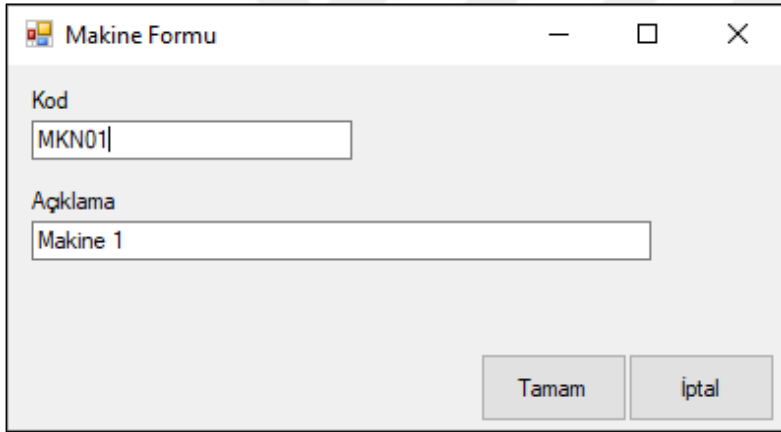
Şekil 8.1. Karar destek sistemi ana ekranı

Şekil 8.1.'de gösterilen ana ekranında; yeni bir problem tanımlanabilir, daha önce tanımlanan problem kayıtları görüntülenebilir, güncellenebilir veya silinebilir. Problem ekleme ve değiştirme formu şekil 8.2.'deki gibidir. Bu ekran yardımıyla problemin açıklaması ve vardiya süresi sisteme tanımlanır.

Makine sekmesinde; probleme ait yeni bir makine tanımlanabilir, daha önce tanımlanan makineler görüntülenebilir, güncellenebilir veya silinebilir. Makine ekleme ve değiştirme form ekranı Şekil 8.3.’deki gibidir.



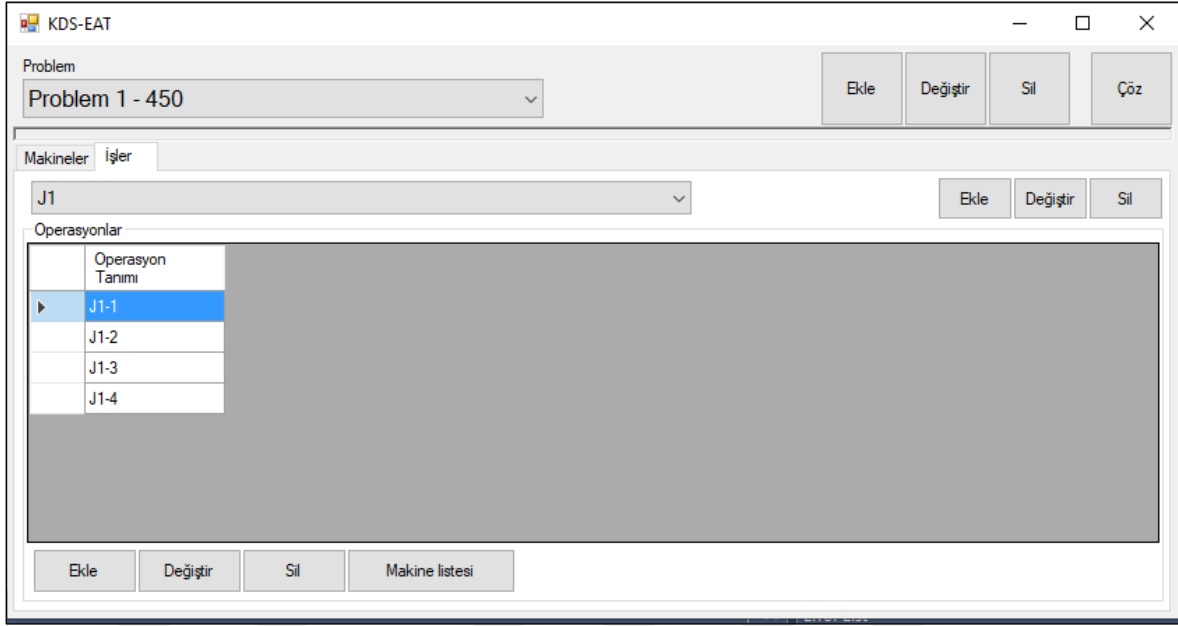
Şekil 8.2. Karar destek sistemi problem tanımı ekranı



Şekil 8.3. Karar destek sistemi makine tanımı ekranı

Karar destek sistemine ait ana ekranda bulunan diğer sekme işlere aittir. Probleme ait işlerin, işlere ait operasyonların ve operasyonların alternatif makinelerdeki işlem sũrelerinin tanımlandığı sekme Şekilde 8.4.’deki gibidir.

İşler sekmesinde; probleme ait yeni bir iş tanımlanabilir, daha önce tanımlanan iş kayıtları görüntülenebilir veya silinebilir. İş ekleme ve değiştirme formu Şekil 8.5.’deki gibidir. Bu ekran yardımıyla işlere ait ağırlık ve teslim tarihi bilgileri sisteme tanımlanır.



Şekil 8.4. Karar destek sistemi işler sekmesi

Açıklama
J1

Ağırlık
0.7

Teslim Tarihi
18 Mayıs 2022 Çarşamba

Tamam İptal

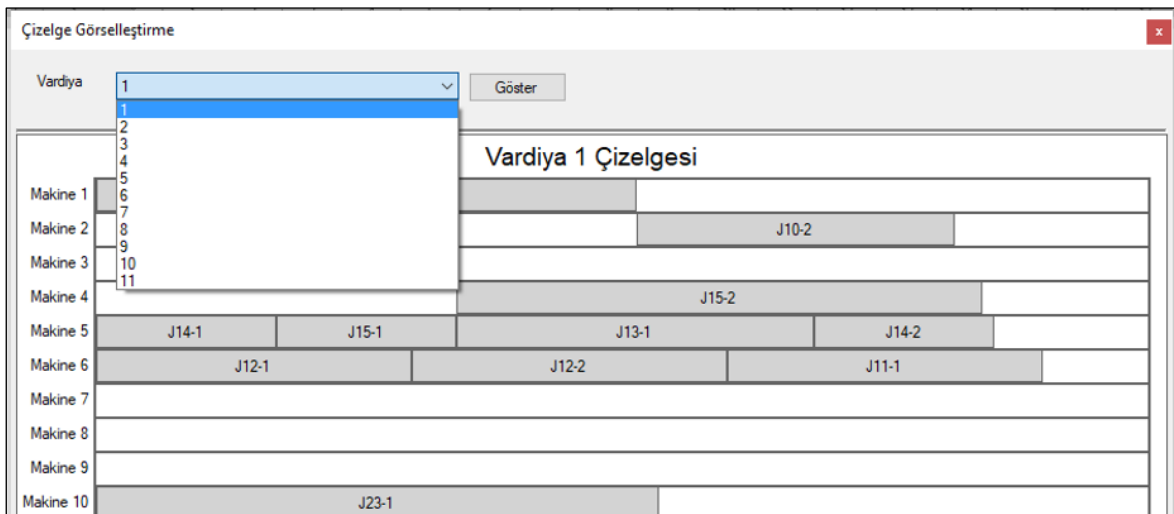
Şekil 8.5. Karar destek sistemi iş tanım ekranı

İşler sekmesinden gidilen işlem süresi ekranından, operasyonların alternatif makinelerdeki işlem süreleri tanımlanabilir, güncellenebilir veya silinebilir. İşlem süresi ekranı şekil 8.6.'daki gibidir.

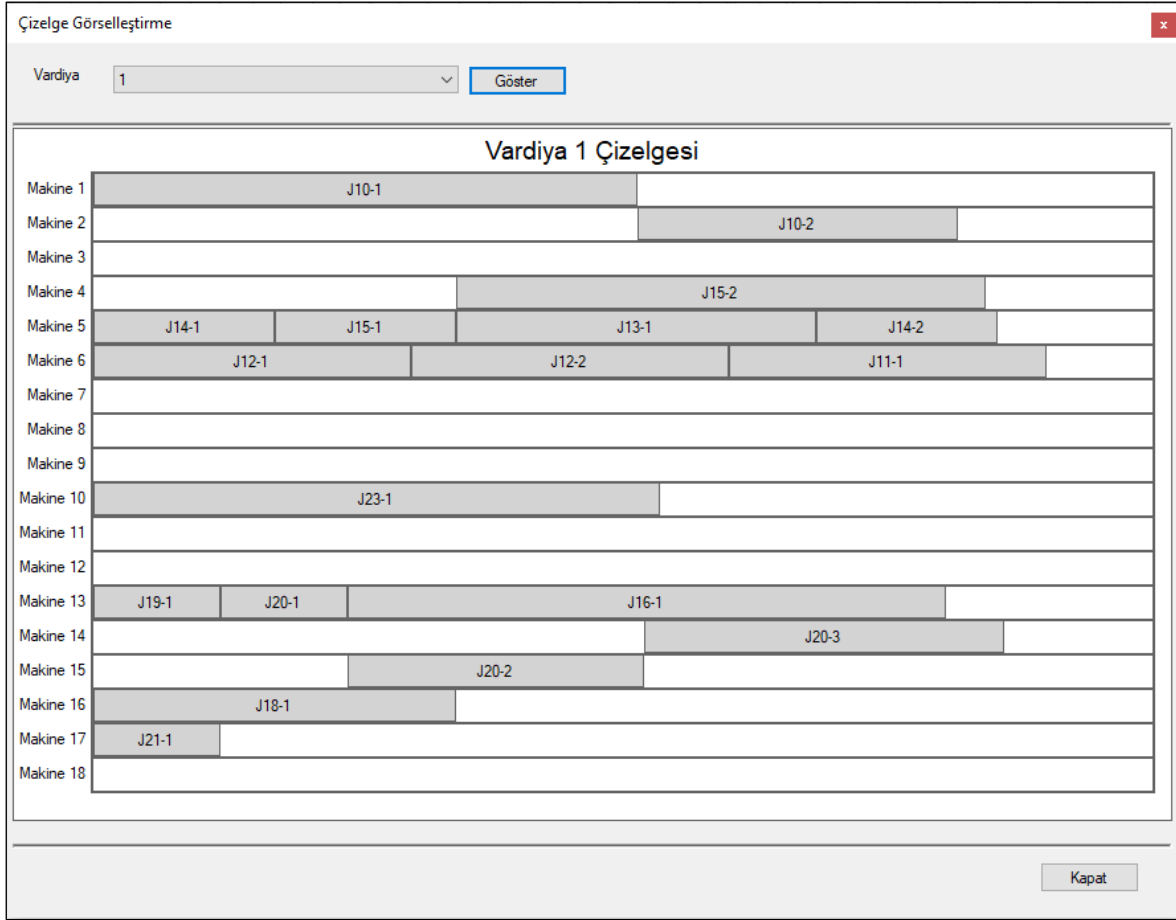
	Makine	SURE
▶	MKN04 - Makine 4	140
*		

Şekil 8.6. Karar destek sistemi işlem süresi ekranı

Karar destek sistemine ait tanımlamalar yapıldıktan sonra ana ekranda bulunan çöz butonu kullanılarak geliştirilen tavlama benzetimi algoritması ile problem çözülür. Algoritma sonucu elde edilen çözüm çizelgesi gantt şeması kullanılarak görselleştirilir. Şekil 8.7.'deki çizelge görselleştirme ekranında oluşturulan çizelgede işlerin toplam kaç vardiyada planlandığı görüntülenebilir. Bu ekranda, incelenecek vardiya seçimi yapılarak, şekil 8.8.'deki gibi ilgili vardiya süresince makinelere atanmış ve sıralanmış işler, işlerin başlama ve bitiş zamanları detaylarıyla görüntülenebilir.



Şekil 8.7. Karar destek sistemi çizelge görselleştirme ekranı, vardiya seçimi



Şekil 8.8. Karar destek sistemi çizelge görselleştirme ekranı, gantt şeması



9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çizelgeleme genel olarak eldeki işlerin bir grup kaynağa atanması ve kaynaklarda sıralanıp başlangıç ve bitiş zamanlarının tespit edilmesi sürecidir. Müşterilerden alınan talepleri gecikme olmadan karşılamak ve maliyetleri düşük tutmak; üretim ve hizmet sistemlerinin ortak amaçlarındandır. Çizelgeleme bu noktada devreye girer ve sistemler için verimlilik sağlamak amacıyla kullanılır. Üretim sistemlerinde, mevcut koşullar göz önünde bulundurularak hızlı kararlar alınması gerekliliği yönetim sürecinin karmaşıklığını artırmaktadır. Doğru ve sistematik bir yaklaşım olmadan anlık kararlarla çizelgelerin oluşturulması siparişlerde gecikmelere ve bunun sonucunda da firmalara büyük maliyetler olarak yansımaya neden olabilmektedir [6].

Birden çok işe ait farklı operasyonların farklı rotalarla alternatif paralel makinelerden birinde işlem gördüğü üretim şekli esnek atölye tipi üretim olarak tanımlanmaktadır. Esnek atölye tipi çizelgeleme problemleri, atölye tipi çizelgeleme problemlerinin bütün zorluklarını ve karmaşıklığına sahiptir. İlaveten gelen işlerin makinelere atanması gerekliliği probleme etkin bir çözüm bulunmasını daha da zorlaştırmaktadır. Çizelgeleme problemlerinin büyük bir kısmı NP-zor sınıfında yer alan kombinatoriyal optimizasyon problemlerinden olduğu için özellikle gerçek hayat boyutundaki örneklerine optimal çözüm bulmak her zaman mümkün olmamaktadır. Genellikle küçük boyutlu problemlerde optimal çözümler bulunabilmektedir [5].

Bu çalışmada; esnek atölye tipi üretimin gerçekleştiği bir firmadaki işlere ait operasyonların sıralanması ve kısıtlar göz önünde bulundurularak ağırlıklı geç tamamlanma süreleri toplamının en küçüklenmesini sağlayacak şekilde işlerin makinelere atanması problemi ele alınmıştır. Firmada üretim vardiyalar halinde yapılmaktadır ve vardiya süreleri baz alınarak çizelgeler oluşturulmaktadır. Vardiya sürelerinin aşamayacağı durumlarda hangi işlere öncelik verileceğinin kararı teslimatları doğrudan etkilemektedir.

Firmada mevcut durumda çizelgeleme işlemi üretim planlama uzmanları tarafından çoğu zaman anlık kararlar sonucu sıralama ve atama işlemleri yapılarak gerçekleştirilmektedir. Üretim kapasitesinin büyüklüğünden dolayı manuel olarak çizelgenin oluşturulması ve gecikmelerin hesaplanması oldukça zor ve külfetli olmaktadır.

Problemin çözümü aşamasında, ilk olarak vardiya süresi içerisinde üretim kısıtı altında ele alınan esnek atölye tipi çizelgeleme probleminin karışık tamsayılı programlama yöntemi için matematiksel modeli oluşturulmuştur. Literatürde yer alan klasik esnek atölye tipi çizelgeleme problemi matematiksel modeli temel alınarak tanımlanan yeni problemin formülasyonu geliştirilmiştir.

Oluşturulan karışık tamsayılı programlama modeli literatürden alınan çeşitli boyutlardaki test problemleri ile çözülerek performans analizi yapılmıştır. Matematiksel modelin, küçük ve nispeten orta boyutlu problem örnekleri için optimal çözümleri kabul edilebilir sürelerde elde ettiği görülmüştür. Analiz sonuçları, NP-zor sınıfında yer alan problemin büyük boyutlu örneklerinin optimal çözümlerinin makul zamanda bulunamayacağını göstermiştir. Bu nedenle büyük boyutlu örneklerinin optime yakın sonuçlarının elde edilebilmesi için tavlama benzetimi temeline dayanan sezgisel bir algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen bir yerel arama metodu başlangıç çözümünün elde edilmesinde, komşu üretimdeki hareket mekanizmasında ve iterasyonlarda elde edilen eniyi çözümlerin iyileştirilmesinde kullanılmıştır. Üç adet test problemi kullanılarak parametre optimizasyonu yapılmış ve tavlama benzetimi algoritması için en etkin çözümleri sunan parametre değerlerine karar verilmiştir. Matematiksel modelin bulduğu eniyi çözüm değerleriyle karşılaştırılarak sezgisel algoritmanın performans analizi yapılmıştır. Karşılaştırma yapılan problemlerin çoğunda sezgiselin optimal çözümleri çok kısa sürelerde bulunabildiği görülmüştür.

Çalışmada ele alınan gerçek hayat probleminin çözümünde geliştirilen tavlama benzetimi algoritması kullanılmıştır. Firmada mevcut durumda ağırlıklı geç tamamlanma süreleri toplam değeri 400,32 ve çizelge periyodu boyunca geçen vardiya sayısı 12'dir. Sezgisel algoritma kullanılarak elde edilen sonuca göre ağırlıklı geç tamamlanma süreleri toplamı 239 ve toplam kullanılan vardiya sayısı 11 bulunmuştur. Sonuçlar karşılaştırıldığında %40,29 'luk bir iyileşme sağlandığı görülmüştür. Sağlanan bu iyileşmenin, firmanın müşteri memnuniyet seviyesini yükseltmede son derece önemli olacağı değerlendirilmektedir.

Literatürde esnek atölye tipi çizelgelemenin gerçek hayat problemleri üzerinde uygulama çalışmaları sınırlı sayıda bulunmaktadır. Bilindiği kadarıyla vardiya yapısını dikkate alan ilk çalışma da bu tez kapsamında yapılmıştır. Bu çalışmanın gerek literatüre katkı sağlaması gerekse de gerçek hayat problemine sahip firmaya faydalı olması beklenmektedir. Bundan sonraki çalışmalarda vardiya süresi içerisinde üretim yapılması kısıtı altında esnek atölye

tipi çizelgeleme problemi diğer meta-sezgisel algoritmalar ile çözümlerinin etkinlikleri karşılaştırılabilir.





KAYNAKLAR

1. Pinedo, M. (2008). Scheduling Theory, Algorithms and Systems (Üçüncü Baskı). Newyork: Prentice-Hall, 13-389.
2. Hopf, M., Thielen, C., Wendt, O. (2017). Competitive algorithms for multistage online scheduling. *European Journal of Operational Research*, 260 (2), 468-481.
3. Imanipour, N. (2006). Modeling and solving flexible job shop problem with sequence dependent setup times. *Proceedings of the Int Conference on Service Systems and Service Management*, 2, 1205-1210.
4. Chaudry, I.A., Kahn, A.A. (2016). A research survey: review of flexible job shop scheduling techniques. *International Transactions In Operational Research*, 23 (3), 551-591.
5. Croce. F.D., Tadei. R., Volta. G. (1995). A Genetic algorithm for the job shop problem. *Computers And Operations Research*, 22 (1), 15-24.
6. Zeren, B., Özkol, İ. (2016). A novel column generation strategy for large scale airline crew pairing problems, *Expert Systems with Applications*, 55 (15), 133-144.
7. Baker, K. R., Trietsch, D. (2018). Principles of Sequencing and Scheduling (İkinci Baskı). New Jersey: John Wiley & Sons, 1-8.
8. Ruiza, R., Stützleb, T. (2007), A simple and effective iterated greedy algorithm for the permutation flowshop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 177(3), 2033-2049.
9. Peyro, L. F., Perea, F., Ruiz, R. (2017). Models and matheuristics for the unrelated parallel machine scheduling problem with additional resources. *European Journal of Operational Research*, 260 (2), 482-493.
10. Sharma, P., Jain, A. (2015). Effect of routing flexibility and sequencing rules on performance of stochastic flexible job shop manufacturing system with setup times: simulation approach. *Proceedings Of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 231 (2), 329–345.
11. Williams, H.P. (1999), Model Building in Mathematical Programming (Dördüncü Baskı). New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 155-164.
12. Talbi, E. G. (2009). Metaheuristics: From design to implementation (İkinci Baskı). New Jersey: John Wiley & Sons, 1-624.
13. Potts, C. N., Strusevich V. (2009). Fifty years of scheduling: a survey of milestones. *Journal of the Operational Research Society*, 60 (1), 41-68.
14. Sharma S., Jain, K. K., Shar, A. (2015). Solar cells: in research and applications- a review. *Materials Sciences and Applications*, 6 (12), 1145-1155.

15. Gu, M., Song, X. (2009). A deadlock free scheduling with sequence dependent setup times. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 45 (5-6), 593-602.
16. Jones, D.F., Mirrazavi, S.K., Tamiz, M. (2002). Multi-objective meta-heuristics: an overview of the current state-of-the-art. *European Journal of Operational Research*, 137 (1), 1-9.
17. Kellegöz, T. (2011). Paralel çok işçili montaj hattı dengeleme problemleri için yeni çözüm yaklaşımları, Doktora Tezi, Endüstri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi, Ankara, 98.
18. Gen, M., Cheng, R. (1997). *Genetic Algorithms and Engineering Design*, New Jersey: John Wiley & Sons, 190-233.
19. Park, B.J., Choi, H.R., Kim, H.S. (2003). A hybrid genetic algorithm for the job shop scheduling problems. *Computers & Industrial Engineering*, 45 (4), 597-613.
20. Dao, S.D., Abhary, K., Marian, R. (2017). A bibliometric analysis of genetic algorithms throughout the history. *Computers & Industrial Engineering*, 110, 395-403.
21. Glover, F. (1986). Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence, *Computers and Operations Research*, 13, 533-549.
22. Lee, K. Y., Sharkawi, M. A. (2008). *Modern heuristic optimization techniques. Theory and Applications to Power Systems*, New Jersey: John Wiley & Sons, 101-122.
23. Blum, C., Roli, A., Alba, E. (2005). *Parallel Metaheuristics: A New Class of Algorithms*, New Jersey: John Wiley & Sons, 1-42.
24. Scrich, C. R., Armentano, V. A. (2004). Tardiness minimization in a flexible job shop: a tabu search approach. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 15 (1), 103-115.
25. Rossi, A., Dini, G. (2007). Flexible job-shop scheduling with routing flexibility and separable setup times using ant colony optimisation method. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 23 (5), 503-516.
26. Brucker, P., Schile, R. (1990). Job-shop scheduling with multi-purpose machines. *Journal on Computing*, 45 (4), 369-375.
27. Wagner, H. M. (1959). An integer linear-programming model for machine scheduling. *Naval Research Logistics Quarterly*, 6 (2), 131-140.
28. Manne, A. S. (1960). On the job-shop scheduling problem. *Operations Research*, 8 (2), 219-223.
29. Thörnblad, K., Strömberg, A.N., Patricksson M. and Almgren T. (2013). Mathematical optimization in flexible job shop scheduling modelling, analysis and case studies,

- Thesis, Department of Mathematical Sciences Division of Mathematics Chalmers University of Technology and University of Gothenburg, Sweden, 18-27.
30. Lee, Y. H., Jeong, C. S., Moon, C. (2002). Advanced planning and scheduling with outsourcing in manufacturing supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 43, 351-374.
 31. Zhu, Z., Heady, R. B. (2000). Minimizing the sum of earliness/tardiness in multimachine scheduling: a mixed integer programming approach. *Computers & Industrial Engineering*, 38, 297-305.
 32. Jiyyin, L., MacCarthy B. L. (1997). A global MILP model for FMS scheduling. *European Journal of Operational Research*, 100 (3), 441-453.
 33. Tamaki, H., Ono, T., Murao, H., Kitamura, S. (2001). Modeling and genetic solution of a class of flexible job shop scheduling problems. *8th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Proceedings*, 2, 343-350.
 34. Fattahi, P., Mehrabad, M. S., Jolai, F.(2007), Mathematical modeling and heuristic approaches to flexible job shop scheduling problems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 18 (3), 331-342.
 35. Fattahi, P., Jolai, F., Arkat, J. (2009). Flexible job shop scheduling with overlapping in operations. *Applied Mathematical Modelling*, 33 (7), 3076-3087.
 36. Defersha, F. M., Chen, M. (2010). A parallel genetic algorithm for a flexible job-shop scheduling problem with sequence dependent setups. *Int J of Advanced Manufacturing Technology*. 49 (1-4), 263-279.
 37. Özgüven, C., Yavuz, Y., Özbakır, L. (2012). Mixed integer goal programming models for the flexible job-shop scheduling problems with separable and non-separable sequence dependent setup times. *Applied Mathematical Modelling*, 36 (2), 846-858.
 38. Nourali, S., Imanipour, N., Shahriari, M.R. (2012). A mathematical model for integrated process planning and scheduling in flexible assembly job shop environment with sequence dependent setup times. *Int. Journal of Mathematical Analysis*, 6 (41-44), 2117-2132.
 39. Meng, L., Zhang, C., Shao, X. (2018). MILP models for energy-aware flexible job shop scheduling problem. *Journal of Cleaner Production*, 210, 710-723.
 40. Brandimarte, P. (1993). Routing and scheduling in flexible job shops by tabu search, *Annals. Operations Research*, 41, 157-183.
 41. Mastrolilli, M. and Gambardella, LM. (1996). Effective neighbourhood functions for the flexible job shop problem. *Journal of Scheduling*, 3, 3-20.
 42. Jensen, M.T., (2003). Generating robust and flexible job shop schedules using genetic algorithms. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 7, 275- 288.

43. Tay, J.C., Wibowo, D. (2004). An effective chromosome representation for evolving flexible job shop schedules. *GECCO 2004, In: Lecture notes in computer science*, Berlin, Springer, 3103, 210–221.
44. Ong, Z.X., Tay, J.C., Kwoh, C.K. (2005). Applying the clonal selection principle to find flexible job shop schedules. *Lecture Notes in Computer Sciences*, 3627, 442- 455.
45. Gao, J., Gen, M., Sun, L. (2006). Scheduling jobs and maintenances in flexible job shop with a hybrid genetic algorithm. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 17 (4), 493-507.
46. Gholami, M., Zandieh, M. (2009). Integrating simulation and genetic algorithm to schedule a dynamic flexible job shop. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 20 (4), 481-498.
47. Yazdani, M., Amiri, M., Zandieh, M. (2010). Flexible job-shop scheduling with parallel variable neighborhood search algorithm. *Expert Systems with Applications: An International Journal*, 37 (1), 678-687.
48. Bagheri, A., Zandieh, M., Mahdavi, I., Yazdani, M. (2010). An artificial immune algorithm for the flexible job-shop scheduling problem. *Future Generation Computer Systems*, 26, 533–541.
49. Saidi, M., Fattahi, P. (2007). Flexible job shop scheduling with tabu search algorithms. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32 (5-6), 563- 570.
50. Rabiee, M., Zandieh, M. and Ramezani, P. (2012). Bi-objective partial flexible job shop scheduling problem: NSGA-II, NREGA, MOGA and PAES approaches. *International Journal of Production Research*, 50, 7327-7342.
51. Tang, J., Zhang, G., Lin, B., Zhang, B. (2011). A hybrid algorithm for flexible job-shop scheduling problem. *Procedia Engineering*, 15, 3678-3683.
52. Gutierrez, C., Magarino I. G. (2011). Modular design of a hybrid genetic algorithm for a flexible job-shop scheduling problem. *Knowledge-Based Systems*, 24 (1), 102-112.
53. Teekeng, W., Thammano, A. (2012). Modified genetic algorithm for flexible job-shop scheduling problems. *Procedia Computer Science*, 12, 122-128.
54. Zhang, Q., Manier, H., Manier, M.A. (2012). A genetic algorithm with tabu search procedure for flexible job shop scheduling with transportation constraints and bounded processing times. *Computers & Operations Research*, 39 (7), 1713-1723.
55. Sadrzadeh, A. (2013). Development of both the AIS and PSO for solving the flexible job shop scheduling problem. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38 (12), 3593-3604.
56. Thammano, A., Phu-ang, A. (2013). A hybrid artificial bee colony algorithm with local search for flexible job-shop scheduling problem. *Procedia Computer Science*, 20, 96-101.

57. González, M. A., Vela, C. R., Varela R. (2015). Scatter search with path relinking for the flexible job shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 245 (1), 35-45.
58. Roshanaei, V., Azab, A., ElMaraghy, H. (2013). Mathematical modelling and a meta-heuristic for flexible job shop scheduling. *International Journal of Production Research*, 51 (20), 6247-6274.
59. Palacios, J.J., González, M.A., Vela, C.R., Rodríguez, I.G., Puente, J. (2015). Genetic tabu search for the fuzzy flexible job shop problem. *Computers & Operations Research*, 54, 74-89.
60. Lei, D., Li, M., Wang, L. (2018). A two-phase meta-heuristic for multiobjective, *IEEE Transactions on Cybernetics*, 49 (3), 1097–1109.
61. Shen, L., Peres, D., Neufeld, J. S. (2016). Solving the flexible job shop scheduling problem with sequence-dependent setup times. *European Journal of Operational Research*, 265, 503-516.
62. Driss, I., Mouss, K.N., Laggoun, A. (2015). A new genetic algorithm for flexible job-shop scheduling problems. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29 (3), 1273-1281.
63. Xia, W., Wu, Z. (2005). An effective hybrid optimization approach for multi-objective flexible jobshop scheduling problems. *Computers & Industrial Engineering*, 48 (2), 409–425.
64. 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.
65. Abramson, D., Krishnamoorthy, M., Dang, H. (1996). Simulated annealing cooling schedules for the school timetabling problem. *Enterprise Information Systems*, 171–178.
66. Blackstone, J. H., Phillips, D. T., Hogg, G.L. (1982). A state-of-the-art survey of dispatching rules for manufacturing job shop operations. *International Journal of Production Research*, 20 (1), 27–45.
67. Binchao, C., Timothy, I. (2013). A flexible dispatching rule for minimizing tardiness in job shop scheduling. *International Journal of Production Economics*, 141 (1), 360-365.
68. Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning* (Dördüncü Baskı). Massachusetts: Addison Wesley, 150-183.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KARABUDAK, Rüveyda
Uyruğu : T.C.
e-mail :

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Yönetim Bilişim Sistemleri	Devam ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi / Endüstri Mühendisliği	2018
Lise	Hacı Ömer Tarman Anadolu Lisesi	2014

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2018-Halen	Türk Havacılık Uzay Sanayi	İş Analisti

Yabancı Dil

İngilizce

Tezden Üretilen Yayın

Karabudak, R., Kellegöz, T. (2022). Examining shift constraints in scheduling problems. *International Ankara Congress On Scientific Research VI*, Ankara, 249-250.

Hobiler

Yüzme



GAZİLİ OLMAK AYRICALIKTIR...