

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**ÖĞRENME VE BOZULMA ETKİLERİ ALTINDA ESNEK
AKIŞ TİPİ ÇİZELGELEME PROBLEMİ**

Şeyma AYDIN

**Danışman
Dr.Öğr.Üyesi Rahime SANCAR EDİS**

MANİSA-2025

ŞEYMA
AYDIN

ÖĞRENME VE BOZULMA ETKİLERİ ALTINDA ESNEK AKIŞ TİPİ ÇİZELGELEME
PROBLEMİ

2025

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Endüstri Mühendisliği AnaBilim Dalında akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, tezin yazımında akademik ve etik kurallara aykırı herhangi bir yapay zeka ve program kullanmadığımı beyan ederim.

Şeyma AYDIN



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Öğrenme ve Bozulma Etkileri Altında Esnek Akış Tipi Çizelgeleme Problemi

Şeyma AYDIN

Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman:

Dr.Öğr.Üyesi Rahime SANCAR EDİS

Günümüz üretim sistemlerinde verimlilik yalnızca makinelerin etkin kullanımıyla sınırlı kalmamakta insan faktörlerinin dinamik yapısı da üretim performansını doğrudan etkilemektedir. Çalışanların zamanla kazandıkları deneyimler (öğrenme etkisi) ve beceri kaybı (bozulma etkisi) gibi davranışsal unsurları dikkate almak çizelgeleme çalışmalarının doğruluğunu artırmaktadır.

Bu çalışmada öğrenme ve bozulma etkisinin birlikte var olduğu esnek akış tipi bir sistemdeki gerçek bir çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Öncelikle çalışmanın uygulamasının yapıldığı işletmede ortaya çıkan problem tanımlanarak, literatür araştırması gerçekleştirilmiştir. Öğrenme ile bozulma etkilerini birlikte içeren hazırlık sürelerinin çalışan ve sıra bağımlı olduğu bu esnek akış tipi çizelgeleme problemi için karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. İşlerin toplam ağırlıklı gecikme zamanını en iyileyecek şekilde hem makinelere, hem de çalışanlara atanması sağlanmıştır. Model, esnek akış tipi sistem iki farklı aşama sayısı, öğrenme ve bozulma etkilerinin dört farklı versiyonu ve bunların değişen oranları, değişen iki iş sayısı gibi farklılaşan veri setleri üzerinde test edilmiştir. Daha az aşama, sadece öğrenme etkisinin olduğu ve daha az iş sayısının bulunduğu veri setlerinde çözüme kısa sürede ulaşmak mümkünken, daha fazla aşama ve işin olduğu ve öğrenme ile bozulma etkilerinin birlikte yer aldığı veri setlerinde optimum sonuca ulaşmak bazen mümkün olmazken, bazen de uzun süre almaktadır.

Çalışmada ele alınan gerçek hayat problemi gibi büyük ölçekli ve karmaşık problemlere pratik çözümler üretmek amacıyla ağırlıklı en erken teslim tarihi kuralına dayalı bir sezgisel yöntem geliştirilmiş ve probleme uygulanmıştır. Geliştirilen sezgisel yöntem ile işlerin önceliklerini ve teslim zamanlarını dikkate alarak iş sıralaması ve çalışan atamaları etkin bir şekilde belirlenmiş ve bu sayede toplam ağırlıklı gecikme süresi makul değerleri kabul edilebilir hesaplama sürelerinde elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çizelgeleme, Esnek Akış Tipi, Öğrenme Etkisi, Bozulma Etkisi, Sıra Bağımlı Hazırlık Zamanları, Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama Modeli

2025, 140 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Flexible Flow Shop Scheduling Problem Under The Effects of Learning and Deterioration

Şeyma AYDIN

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of
Department of Industrial Engineering**

**Supervisor:
Assist. Prof. Dr. Rahime SANCAR EDİS**

In modern production systems efficiency is not only limited to the effective use of machines, but also the dynamic nature of human factors directly impacts production performance. Behavioral elements such as experience gained by employees over time (learning effect) and skill loss (deterioration effect) are taken into account to enhance the accuracy of scheduling studies.

This study addresses a flexible flow shop scheduling problem that jointly considers learning effect and deterioration effect, an area with limited real life applications in the literature. Firstly a literature review was conducted based on the needs of the company where the study implemented. A mixed integer linear programming based mathematical model was developed incorporating both learning and deterioration effects with worker based sequence dependent setup times. The mathematical model was designed in accordance with the company's requirements and demands aims to the produce outputs that include both machine and worker assignments for the jobs. The model was tested on different datasets that varied in complexity. The tests were conducted on a flexible flow shop system with varying number of stages, four different types and rates of learning and deterioration effects, and a changing number of jobs. The test results show that the model can find a solution very quickly for simpler problems which have fewer stages and jobs with only learning effects. However, for more complex problems, with more stages, more jobs and both learning and deterioration effects, finding the best solution takes a long time or is sometimes not even possible in a reasonable time limit. In order to generate practical solutions for

large scale and complex problems, such as the real life problem addressed in this study, a heuristic method based on the weighted earliest due date rule was proposed and applied to this problem. The proposed heuristic method effectively determines job sequences and worker assignments by taking job priorities and due dates into account. Thereby reasonable total weighted tardiness values can be achieved within reasonable computation times.

Keywords: Scheduling, Flexible Flow Shop, Learning Effect, Deterioration Effect, Worker and Sequence Dependent Setup Times

2025, 140 pages



TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasına bana destek olan, akademik rehberliği ve yapıcı yönlendirmeyle katkı sağlayan, her konuda yardımcı olan değerli danışman hocam Sayın Dr.Öğr.Üyesi Rahime SANCAR EDİS'e, ayrıca çalışmam süresince değerli fikirleriyle katkı sağlayan ve çalışmama yardımcı olan Sayın Doç. Dr. Emrah B. EDİS'e ve yüksek lisans sürecim boyunca eğitim aldığım değerli hocalarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi destek sağlayan, sabır ve anlayışla yanımda duran anne ve babama, her zaman motivasyon kaynağım olan ve desteklerini esirgemeyen sevgili kardeşlerime de en içten teşekkürlerimi iletmek isterim.

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ANN	Yapay Sinir Ağı
B.O	Bozulma Oranı
DE	Bozulma Etkisi
EAT	Esnek Akış Tipi
FIFO	İlk Giren İlk Çıkar
GA	Genetik Algoritma
LE	Öğrenme Etkisi
LP	Doğrusal Programlama
NP	Belirlenimsiz Polinomsal
Ö.O	Öğrenme Oranı
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyonu
SA	Tavlama Benzetimi
TCTD	Toplam Tamamlanma Süresi Sapması
TEC	Toplam Enerji Tüketimi
WEDD	Ağırlıklı En Erken Teslim Tarihi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1 Üretim Sürecinin Yapısı	35
Şekil 3.2 : Üç Aşamalı Sistem Üretim Süreci Yapısı	47
Şekil 3.3 : Beş Aşamalı Sistem Üretim Süreci Yapısı.....	48
Şekil 3.4 Biskup (2008)'in Pozisyon Bağımlı Öğrenme Oranlarına Göre Değişen İşlem Süreleri	50
Şekil 3.5 Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma Etkili İşlem Süreleri	55
Şekil 3.6 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma Etkili İşlem Süreleri	61
Şekil 3.7 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma Etkili İşlem Süreleri	66

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1 Çizelgeleme Problemlerinin Sınıflandırılması (Eren, 2004).....	5
Tablo 2.2 Öğrenme ve Bozulma Etkili Akış Tipi Çizelgeleme Problemleri Literatür Özeti	30
Tablo 3.1 Ürünler ve ürünlere ait rotalar ve önem dereceleri	37
Tablo 3.2 İşlerin aşamalarda işlem süreleri (saat)	38
Tablo 3.3 Aşama 4'te Çalışan Bağımlı İşlem Süreleri (saat)	38
Tablo 3.4 Aşama 5'te Çalışan Bağımlı İşlem Süreleri (saat)	39
Tablo 3.5 Aşama 6'da Çalışan Bağımlı İşlem Süreleri (saat)	39
Tablo 3.6 Aşama 2'de Çalışan 2 İçin Hazırlık Süreleri (dakika)	40
Tablo 3.7 Biskup (2008)'in Pozisyon Bağımlı Öğrenme Etkili İşlem Süreleri	50
Tablo 3.8 Üç Aşamalı Pozisyon Bağımlı Öğrenme Etkisi İçin Elde Edilen Sonuçlar	51
Tablo 3.9 Beş Aşamalı Pozisyon Bağımlı Öğrenme Etkisi İçin Elde Edilen Sonuçlar	53
Tablo 3.10 Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma Etkili İşlem Süreleri.....	55
Tablo 3.11 Üç Aşamalı Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma Etkili EAT Test Problemi için Elde Edilen Sonuçlar	56
Tablo 3.12 Beş Aşamalı Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma Etkili EAT Test Problemi için Elde Edilen Sonuçlar	58
Tablo 3.13 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma Etkili İşlem Süreleri	60
Tablo 3.14 Üç Aşamalı Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma EAT Test Problemi için Elde Edilen Sonuçlar	62
Tablo 3.15 Beş Aşamalı Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma EAT Test Problemi için Elde Edilen Sonuçları.....	64
Tablo 3.16 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma Etkili İşlem Süreleri	65
Tablo 3.17 Üç Aşamalı Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma EAT Test Problemi için Elde Edilen Sonuçlar	67
Tablo 3.18 Beş Aşamalı Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma EAT Test Problemi için Elde Edilen Sonuçlar	69

Tablo 3.19 Üç Aşamalı Farklı İş Sayıları İçin Pozisyon Bağımlı Öğrenme Etkili EAT Test Problemi için Elde Edilen Sonuçlar	72
Tablo 3.20 Beş Aşamalı Farklı İş Sayıları İçin Pozisyon Bağımlı Öğrenme Etkili EAT Test Problemi için Elde Edilen Sonuçlar	73
Tablo 3.21 Üç Aşamalı Farklı İş Sayıları İçin Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma Etkili EAT Test Problemi için Elde Edilen Sonuçlar	75
Tablo 3.22 Beş Aşamalı Farklı İş Sayıları İçin Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma Etkili EAT Test Problemi için Elde Edilen Sonuçlar	76
Tablo 3.23 Üç Aşamalı Farklı İş Sayıları İçin Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma Etkili EAT Test Problemi için Elde Edilen.....	78
Sonuçlar.....	78
Tablo 3.24 Beş Aşamalı Farklı İş Sayıları İçin Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma Etkili EAT Test Problemi için Elde Edilen Sonuçları	79
Tablo 3.25 Üç Aşamalı Farklı İş Sayıları İçin Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma Etkili EAT Test Problemi için Elde Edilen Sonuçları	81
Tablo 3.26 Beş Aşamalı Farklı İş Sayıları İçin Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma Etkili EAT Test Problemi için Elde Edilen Sonuçlar ...	82
Tablo 3.27 Üretilen Ürünlerin Parti Büyüklükleri	84
Tablo 3.28 Üretilen Ürünlerin Parti Büyüklüklerine Göre Ayrımı	84
Tablo 3.29 Üretilen Ürünlerin Dört Haftalık Üretim Planı	85
Tablo 3.30 Ürün Bazlı Gecikme Zamanları (saat)	85
Tablo 3.31 Hafta 1 ve Aşama 4 için Çalışan Bağımlı İşlem Süreleri (saat).....	90
Tablo 3.32 Hafta 1 ve Aşama 5 için Çalışan Bağımlı İşlem Süreleri (saat).....	90
Tablo 3.33 Hafta 1 ve Aşama 6 için Çalışan Bağımlı İşlem Süreleri (saat).....	90
Tablo 3.34 Gerçek Hayat Problemi Aşama 4, Aşama 5 ve Aşama 6 için Çalışan Atamaları.....	91
Tablo 3.35 Hafta 1 için Temel İşlem Süreleri (saat)	92
Tablo 3.36 Hafta 1 için Aşama 2, Aşama 3 ve Aşama 7 için Çalışan Bağımlı İlk Hazırlık Süreleri (saat)	92
Tablo 3.37 Pozisyon Öğrenme Etkisi Altında WEDD Sezgiseli Sonuçları	93
Tablo 3.38 Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma Etkisi Altında Ağırlıklı Erken Teslim Tarihi (WEDD) Sezgiseli Sonuçları	94

Tablo 3.39 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma Etkisi Altında WEDD Sezgiseli Sonuçları	95
Tablo 3.40 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma Etkisi Altında WEDD Sezgiseli Sonuçları	96
Tablo 3.41 Gerçek Hayat Problemi Çözüm Sonuçları	97
EK 1 Aşama 2 ‘de Çalışan 3 İçin Hazırlık Süreleri (dakika)	108
EK 2 Aşama 2 ‘de Çalışan 4 İçin Hazırlık Süreleri (dakika)	108
EK 3 Aşama 3 ‘de Çalışan 5 İçin Hazırlık Süreleri(dakika)	109
EK 4 Aşama 3 ‘de Çalışan 6 İçin Hazırlık Süreleri (dakika)	109
EK 5 Aşama 3 ‘de Çalışan 7 İçin Hazırlık Süreleri (dakika)	110
EK 6 Aşama 7 ‘de Çalışan 14 İçin Hazırlık Süreleri (dakika)	110
EK 7 Aşama 7 ‘de Çalışan 15 İçin Hazırlık Süreleri (dakika)	111
EK 8 Aşama 7 ‘de Çalışan 16 İçin Hazırlık Süreleri (dakika)	111
EK 9 Hafta 2 için Temel İşlem Süreleri (saat)	112
EK 10 Hafta 2 ve Aşama 4 için Çalışan Bağımlı İşlem Süreleri (saat).....	112
EK 11 Hafta 2 ve Aşama 5 için Çalışan Bağımlı İşlem Süreleri (saat).....	112
EK 12 Hafta 2 ve Aşama 6 için Çalışan Bağımlı İşlem Süreleri (saat).....	113
EK 13 Hafta 2 için Çalışan Bağımlı İlk Hazırlık Süreleri (saat)	113
EK 14 Hafta 3 için Temel İşlem Süreleri (saat)	113
EK 15 Hafta 3 ve Aşama 4 için Çalışan Bağımlı İşlem Süreleri (saat).....	114
EK 16 Hafta 3 ve Aşama 5 için Çalışan Bağımlı İşlem Süreleri (saat).....	114
EK 17 Hafta 3 ve Aşama 6 için Çalışan Bağımlı İşlem Süreleri (saat).....	114
EK 18 Hafta 3 için Çalışan Bağımlı İlk Hazırlık Süreleri (saat)	115
EK 19 Hafta 4 için Temel İşlem Süreleri (saat)	115
EK 20 Hafta 4 ve Aşama 4 için Çalışan Bağımlı İşlem Süreleri (saat).....	115
EK 21 Hafta 4 ve Aşama 5 için Çalışan Bağımlı İşlem Süreleri (saat).....	116
EK 22 Hafta 4 ve Aşama 6 için Çalışan Bağımlı İşlem Süreleri (saat).....	116
EK 23 Hafta 4 için Çalışan Bağımlı İlk Hazırlık Süreleri (saat)	116
EK 24 Pozisyon Bağımlı Öğrenme Etkili WEDD Sezgiseli için Hafta 1 Sonuçları	117
EK 25 Pozisyon Bağımlı Öğrenme Etkili WEDD Sezgiseli için Hafta 2 Sonuçları	117
EK 26 Pozisyon Bağımlı Öğrenme Etkili WEDD Sezgiseli için Hafta 3 Sonuçları	117
EK 27 Pozisyon Bağımlı Öğrenme Etkili WEDD Sezgiseli için Hafta 4 Sonuçları	118
EK 28 Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma Etkili WEDD Sezgiseli için Hafta 1 Sonuçları.....	118

EK 29 Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma Etkili WEDD Sezgiseli için Hafta 2 Sonuçları.....	118
EK 30 Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma Etkili WEDD Sezgiseli için Hafta 3 Sonuçları.....	119
EK 31 Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma Etkili WEDD Sezgiseli için Hafta 4 Sonuçları.....	119
EK 32 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma Etkili WEDD Sezgiseli için Hafta 1 Sonuçları	119
EK 33 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma Etkili WEDD Sezgiseli için Hafta 2 Sonuçları	120
EK 34 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma Etkili WEDD Sezgiseli için Hafta 3 Sonuçları	120
EK 35 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma Etkili WEDD Sezgiseli için Hafta 4 Sonuçları	120
EK 36 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma Etkili WEDD Sezgiseli için Hafta 1 Sonuçları	121
EK 37 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma Etkili WEDD Sezgiseli için Hafta 2 Sonuçları	121
EK 38 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma Etkili WEDD Sezgiseli için Hafta 3 Sonuçları	121
EK 39 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma Etkili WEDD Sezgiseli için Hafta 4 Sonuçları	122

İÇİNDEKİLER

ÖZET	II
ABSTRACT	III
TEŞEKKÜR	IV
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	V
ŞEKİLLER DİZİNİ	VII
TABLolar DİZİNİ	XI
İÇİNDEKİLER	XII
1. GİRİŞ	1
2. ESNEK AKIŞ TİPİ SİSTEMLERDE ÇİZELGELEME	4
2.1. Çizelgeleme Kavramı	4
2.2 Çizelgeleme Problemleri	4
2.2.1 Çizelgeleme Problemlerinin Sınıflandırılması.....	5
2.2.1.1 Problemin Yapısı.....	5
2.2.1.2 Makine Biçimi.....	5
2.2.1.3 Performans Ölçütleri / Ölçüt Sayısı	7
2.2.1.4 İş Özellikleri.....	8
2.2.1.5 Çözüm Yöntemleri	11
2.2.2 Çizelgeleme Problemlerinin Notasyonu ve Gösterimi	14
2.3 Esnek Akış Tipi Çizelgeleme Problemleri	17
2.4 Öğrenme Etkisi.....	19
2.4.1 Çizelgeleme Problemlerinde Öğrenme Etkisi Türleri	19
2.5 Bozulma Etkisi	25
2.5.1 Çizelgeleme Problemlerinde Bozulma Etkisi Türleri.....	25
2.6 Akış Tipi Çizelgeleme Problemlerinde Öğrenme ve Bozulma Etkisinin Birlikte Kullanıldığı Çalışmalar	28
2.7 Esnek Akış Tipi Çizelgeleme Probleminde Öğrenme ve Bozulma Etkisinin Birlikte Kullanıldığı Çalışmalar	31

3. UYGULAMA.....	34
3.1 İşletmenin ve Üretim Sisteminin Tanıtımı	34
3.1.1 Çizelgeleme Çalışması Yapılan İşler	36
3.2 Veri Setlerinin Düzenlenmesi	37
3.2.1 İşlem Süreleri	37
3.2.2 Hazırlık Süreleri.....	39
3.3 Siparişlerin Çizelgelemede Değerlendirilmesi	40
3.3 Matematiksel Modelin Geliştirilmesi	41
3.3.1 Matematiksel Modelin Varsayımları	42
3.3.2 Uygulama Problemi İçin Geliştirilen Matematiksel Model.....	43
3.3.2.1 Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama Modeli:	44
3.4 Farklı Öğrenme ve Bozulma Parametre Kombinasyonları İçin Test Problemleri	47
3.4.1 Pozisyon Bağımlı Öğrenme Etkili EAT İçin Test Problemleri	49
3.4.2 Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma Etkili EAT İçin Test Problemleri.....	54
3.4.3 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma Etkili EAT İçin Test Problemleri.....	59
3.4.4 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma Etkili EAT İçin Test Problemleri.....	65
3.5 Farklı İş Sayıları İçin Test Problemleri	70
3.5.1 Farklı İş Sayıları İçin Pozisyon Bağımlı Öğrenme Etkili EAT İçin Test Problemleri.....	71
3.5.2 Farklı İş Sayıları İçin Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma Etkili EAT İçin Test Problemleri.....	74
3.5.3 Farklı İş Sayıları İçin Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma Etkili EAT İçin Test Problemleri.....	77
3.5.4 Farklı İş Sayıları İçin Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma Etkili EAT İçin Test Problemleri	80

3.6 Test Problemi Sonuçları	82
3.7 Gerçek Hayat Problemi	83
3.7.1 Problemin Tanımı ve Veri Seti	83
3.7.2 Çözüm Algoritması.....	86
3.7.2.1 Ağırlıklı Erken Teslim Tarihi (WEDD) Sezgiseli	86
3.7.3 WEDD Sezgiselinin Öğrenme ve Bozulma Etkisi Modellerinde Uygulanması	93
3.7.3.1 Pozisyon Öğrenme Etkisi Altında WEDD Sezgiseli	93
3.7.3.2 Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma Etkisi Altında WEDD Sezgiseli	94
3.7.3.3 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma Etkisi Altında WEDD Sezgiseli	95
3.7.3.4 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma Etkisi Altında WEDD Sezgiseli	96
3.7.4 Gerçek Hayat Problemi Çözüm Sonuçları.....	97
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	99
KAYNAKÇA	101
EKLER.....	108

1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin hızla ilerlemesi ve üretim süreçlerinin büyük ölçüde otomatikleşmesiyle işletmeler daha kısa sürede, daha düşük maliyetle ve daha yüksek kalitede üretim yaparak tüketici taleplerinde çeşitliliği kolaylıkla karşılayabilir hale gelmişlerdir. Bununla birlikte son yıllarda özelleştirilmiş ürün taleplerinin artması, pazar koşullarının belirsizliği işletmelerin üretim sistemlerinin çevik ve pazara uyum sağlama yeteneklerinin olmasını zorunlu kılmıştır. Ayrıca işletmelerin rekabet gücünün artması ve pazarda sürdürülebilir büyümeye sahip olabilmesi sadece üretim kapasitesini değil aynı zamanda üretim süreçlerini ne kadar etkin yönettiğine bağlı olmaktadır. Bu nedenle üretim süreçlerinin işletmedeki diğer organizasyonlar ile bütünleşik ve verimli şekilde yönetilmesini sağlayan çizelgeleme çalışmaları stratejik bir gereklilik olarak karşımıza çıkmaktadır.

Üretim çizelgeleme, işletmelerdeki sınırlı kaynakların (makine, iş gücü, zaman vb.) işlere optimal olarak dağıtılmasını sağlayarak verimliliği maksimize etmeyi amaçlayan temel bir planlama problemidir. Literatür incelendiğinde bu tür problemler genellikle tek makine, paralel makine, atölye tipi ve akış tipi sistemler olarak sınıflandırmakta ve her biri kendine özgü NP-zorluk derecelerine ve çözüm yöntemlerine sahiptir. Bu sistemler arasında özellikle akış tipi çizelgeleme problemleri, işlerin tüm aşamalarda aynı rotayı takip etmesi nedeniyle düzenli yapı sunmaktadır. Bu düzenli yapı, yüksek verimlilik sağlamasına rağmen; ürün çeşitliliği ve dinamik talep karşısında esnekliği kısıtlayarak sistemin bir dezavantajına dönüşmektedir. Bu nedenle klasik akış tipinin yetersiz kaldığı durumlarda daha esnek üretim sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda esnek akış tipi sistemler üretimde dikkat çekmeye başlamıştır.

Esnek akış tipi sistemler üretim sürecinin birden fazla ardışık aşamadan oluştuğu ve her bir aşamada birden fazla paralel makinelerin yer alabildiği gelişmiş bir üretim sistemidir. Bu üretim sisteminde işler belirli bir rotayı izlerken her aşamada uygun bir paralel makineye atanabilir ve bazı işler gerek duyulmuyorsa bazı aşamalarda işlem görmeyebilir. Bu sayede özellikle değişken talep, makine arızaları ve kaynak kısıtlılıkları gibi öngörülemez durumlar karşısında üretim hattına yüksek düzeyde esneklik ve uygulanabilirlik kazandırmaktadır. Esnek akış tipi üretim sistemlerin başarılı bir şekilde yönetimi sadece makine temelli kararlarla değil aynı

zamanda iş gücüne dayalı kısıtlar ve kaynakların optimal şekilde kullanımına da bağlı olması gerekmektedir. Çünkü gerçek üretim ortamlarında, çalışanlar aktif unsurlardır. Ve görev atama, iş yükü dengeleme ve makine-insan uyumu dikkate alınarak planlamaya dahil edilmesi çizelgeleme probleminin gerçekçi biçimde modellenmesine yardımcı olmaktadır.

Geleneksel çizelgeleme çalışmalarında sabit kabul edilen işlem sürelerinin gerçek üretim süreçlerinde değişkenlik gösterdiği ve bu durumun en önemli kaynaklarından birinin insan faktörü olduğu bilinmektedir. Üretim ortamında çalışanların zamanla kazandığı deneyim ve becerilerin üretim süreçlerine olumlu katkısı öğrenme etkisi olarak tanımlanır. Öğrenme etkisi çalışanların görevlerini daha hızlı/hatasız ve verimli gerçekleştirmesini sağlayarak işlem sürelerinin kısalmasına ve üretim kalitesinin artmasını sağlamaktadır. Buna karşılık çalışanlarda zamanla biriken yorgunluk, motivasyon kaybı ve dikkat eksikliği gibi olumsuz etkenlerin sonucu işlem sürelerinin artması ve performans düzeylerinin düşmesi bozulma etkisi olarak ifade edilir.

Çizelgeleme çalışmalarında öğrenme etkisi dikkate alınmadığında; çalışanların kazandıkları deneyimler sayesinde oluşan verimlilik hesaba katılmadığından işlem süreleri gereksiz uzun tahmin edilir ve kaynakların verimsiz kullanılmasına neden olur. Bozulma etkisi ihmal edilirse çalışanların yorgunluk ve performans düşüşü dikkate alınmadığı için gerçekçi olmayan iyimser tahminler yapılır bu durum teslimat gecikmelerine, işlerin aksamasına ve artan hata oranlarına yol açmaktadır. Bu nedenle her iki etkinin çizelgeleme modellerine dahil edilmesi iş gücü verimliliğinin daha gerçekçi tahmin edilmesini mümkün kılarak üretim planlamasında insan ve makine arasındaki denge ve sürdürülebilirliği sağlamaktadır.

Özellikle otomotiv yan sanayi, elektronik montaj ve beyaz eşya gibi yüksek hacimli üretimin yapıldığı sektörlerde insan ve makine etkileşiminin fazla olduğu ve bu iki etkinin birlikte gözlemlendiği belirtilmektedir. Dolayısıyla bu sektörlerde üretim planlama çalışmaları kapsamında çizelgeleme modellerinin gerçek zamanlı performans değişimlerini yansıtabilmesi için bu iki etkinin birlikte ele alınması gerekmektedir. Literatürde bu iki etkinin birlikte ele alındığı çalışmalar olsa bile bu çalışmalar sınırlı sayıdadır ve çoğunlukla basit üretim sistemlerinde uygulanmıştır. Bu çalışmada gerçek üretim ortamlarını daha iyi temsil eden ve günümüz üretim ihtiyaçlarını karşılayabilen esnek akış tipi üretim sisteminde öğrenme ve bozulma

etkileriyle birlikte içeren bir çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Gerçek üretim ortamında test senaryoları oluşturularak beyaz eşya yedek parça sektöründe uygulanabilir bir üretim çizelgesi oluşturulması hedeflenmiştir.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde çizelgeleme problemleri, problemlerin sınıflandırılmasına ve gösterimine dair temel bilgiler verilecektir. Daha sonrasında çalışmanın odak noktası olan esnek akış tipi sistemlerdeki çizelgeleme problemleri, öğrenme ve bozulma etkileri hakkında genel bilgiler sunulacaktır. Bu bölümün sonunda esnek akış tipi sistemlerde öğrenme etkisi ve bozulma etkisi kavramlarını birlikte içeren literatürdeki çalışmalar incelenecektir. Üçüncü bölümde öncelikle çalışmaya konu olan gerçek hayat probleminin tanımı, probleme ilişkin veri setleri ve öğrenme ve bozulma etkisini birlikte ele alan ve işlerin ağırlıklı gecikme sürelerinin en küçüklenmesini amaçlayan matematiksel model sunulacaktır. Geliştirilen matematiksel modelin performansını ve doğrulanabilirliğini değerlendirmek amacıyla, ilgili test problemleri ve elde edilen sonuçlar sunulacaktır. Bunu takiben, gerçek hayata uygun bir problem üzerinden ağırlıklı en erken teslim zamanı (WEDD) sezgisel yöntemi geliştirilecek ve öğrenme etkisi ile dört farklı öğrenme-bozulma kombinasyonu dikkate alınarak hesaplamalar gerçekleştirilecektir. Dördüncü ve son bölümde ise çalışmanın genel bir değerlendirmesi yapılacak ve elde edilen sonuçlar yorumlanacaktır. Ayrıca gelecekte yapılacak çalışmalar için öneriler sunulacaktır.

2. ESNEK AKIŞ TİPİ SİSTEMLERDE ÇİZELGELEME

2.1. Çizelgeleme Kavramı

Çizelgeleme kısıtlı kaynakların önceden belirlenen hedefleri en iyi şekilde gerçekleştirmek amacıyla işlere atanmasını içeren karar verme sürecidir. Bu süreç kısıtlı kaynakları en verimli şekilde kullanmak ve sistemin performansını iyileştirmek amacıyla kararların alınmasını gerektirmektedir (Pinedo, 2008).

Çizelgeleme hem imalat hem de hizmet sektörlerinde operasyonel kararların yönetiminde kritik bir unsur olarak yer almaktadır. İşletmelerin ürünlerini pazara sunma süresi, gereken üretim hacmine ulaşması ve müşteri memnuniyetinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar sayesinde çizelgeleme yönetim unsurlarının temelinde yer alan önemli bir bileşendir (Nahmias ve Olsen ,2015).

Çizelgeleme imalat ve hizmet sektöründe kısıtlı kaynakların verimli şekilde nasıl kullanılacağını planlayarak, işlerin ne zaman başlayıp ne zaman biteceğini belirleyen bu sayede işlerin önceliklerinin belirlenmesi, kaynakların tahsisi ve ihtiyacı ve çeşitli kısıtların dikkate alınmasında yararlanılacak temel unsurlar arasında yer almaktadır (Blazewicz vd., 2001).

2.2 Çizelgeleme Problemleri

Çizelgeleme problemi hem imalat hem hizmet sektörlerinde karşılaşılan temel bir optimizasyon problemidir. Baker ve Trietsch (2009) bu problemleri yapılması gereken bir dizi iş için belirlenen hedefleri gerçekleştirmek ve kaynak kullanımının verimliliğini optimize etmek amacıyla işletmelerdeki sınırlı kaynakların işlere atanma süreci olarak tanımlamaktadırlar.

Pinedo (2008) çizelgeleme problemlerinin üç temel bileşenden oluştuğunu belirtmiştir. Bu bileşenler sırasıyla:

- 1.İşler / Operasyonlar: Gerçekleştirilmesi gereken görevler,
- 2.Kaynaklar: Üretim ekipmanları, iş gücü ,finans, zaman,bilgi,
- 3.Performans Ölçütleri:Toplam tamamlanma süresi, gecikme maliyeti, müşteri memnuniyeti vb. optimizasyon kriterleridir.

Çizelgeleme problemleri genellikle ‘n adet işin m adet makinede’ gibi belirli kısıtlar altında planlaması şeklinde ifade edilmektedir (Graham vd., 1979). Bu tür problemler çoğunlukla kombinatoriyel optimizasyonda NP-zor sınıfında yer almakta ve problemin boyutu arttıkça optimal çözüme ulaşmanın mümkün olmayabileceği bilinmektedir. Literatürde çizelgeleme problemlerinin çözümünde matematiksel programlama, sezgisel ve meta-sezgisel yöntemler gibi yaklaşımlar kullanılmaktadır (Garey ve Johnson, 1979).

2.2.1 Çizelgeleme Problemlerinin Sınıflandırılması

Literatürde çizelgeleme problemlerinin genellikle problemin yapısı, makine ortamı, performans ölçütleri, iş özellikleri ve çözüm yöntemleri gibi temel kriterler dikkate alacak şekilde çalışmalar yapıldığı bilinmektedir. Çizelgeleme problemlerinin belirtilen kriterler dikkate alınarak yapılan sınıflandırması Tablo 2.1 ile gösterilmektedir.

2.2.1.1 Problemin Yapısı

Çizelgeleme problemlerinde kullanılan verilerin türü ve elde edilme biçimi modelin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Eğer tüm parametreler (işlem süreleri, öncelik ilişkileri vb.) tam olarak biliniyorsa bu tür problemler deterministik olarak modellenir. Ancak gerçek hayat süreçlerinde birçok faktör belirsizlik içerdiğinden bazı durumda parametreler kesin olarak tanımlanamaz. Bu durumda ise parametreler genellikle rasgele değişkenlerle ve bu değişkenlere ait bilinen olasılık dağılımları dikkate alınarak stokastik yapıya dönüştürülerek modellenmektedir (Pinedo, 2008).

2.2.1.2 Makine Biçimi

Çizelgeleme problemleri literatürde kullanılan makine yapısına bağlı olarak genelleştirilmiş şekilde tek makine, paralel makineli sistemler, akış tipi ve atölye tipi sistemler olmak üzere dört temel kategoriye ayrılmaktadır.

Tek Makineli Sistemler

En basit çizelgeleme ortamı olarak bilinen bu sistemler bir dizi işin tek bir makine üzerinde belirlenmiş bir sıraya göre işlenmesini içermektedir. Bu tür sistemler genellikle gerçek üretim ortamlarında sınırlı bir şekilde yer almasına rağmen bir çok karmaşık üretim sistemlerinde darboğaz oluşturan bir makine olarak çizelgelenmesi

ile tüm sistemin verimini etkileyen bir etken olabilmektedir. Dolayısıyla daha karmaşık üretim sistemleri belirli koşullar altında tek makine problemleri şeklinde modellenebilmektedir (Pinedo, 2008).

Tablo 2.1 Çizelgeleme Problemlerinin Sınıflandırılması (Eren, 2004)

Problemin Yapısı	Deterministik
	Stokastik
Makine Biçimi	Tek Makineli Sistemler
	Paralel Makineli Sistemler
	Atölye Tipi Sistemler
	Akış Tipi Sistemler
Performans Ölçütleri / Ölçüt Sayısı	Düzenli Ölçütler
	Düzenli Olmayan Ölçütler
	Tek Ölçüt
	Çok Ölçüt
İş Özellikleri	Öncelik Kısıtları
	Rotalama Kısıtları
	Malzeme Taşıma Kısıtları
	Hazırlık Zamanları ve Maliyetleri
	Öncüllükler
	Depolama Alanı ve Bekleme Zamanı Kısıtları
	Stoğa-Üretim ve Sipariş-Üretim
	Takım Kısıtları ve Kaynak Kısıtları
	Öğrenme Etkisi
Çözüm Yöntemleri	Geleneksel Optimizasyon
	Doğrusal Programlama
	Dinamik Programlama
	Tam Sayılı Programlama
	Dal Sınır Yöntemi
	Yeni Yaklaşımlar (Meta-Sezgiseller)
	Tavlama Benzetimi
	Tabu Arama
	Genetik Algoritma
	Karınca Kolonisi

Paralel Makineli Sistemler

Paralel makineli sistemler, tek makineli sistemlerin genelleştirilmiş halidir ve benzer işlemleri yapabilen birden fazla makinenin bulunduğu ortamlar olarak ifade edilmektedir. Bu makine türleri birbiri ile özdeş, benzer ve tamamen farklı

olabilmektedir. Ayrıca paralel makineli sistemlerin üretim sistemlerinin çoğunda yer aldığı ve bu modellerin üretim ortamında dar boğaz analizinde önemli rol oynadığı, aynı zamanda makine türüne bağlı olarak iş atama problemlerinin çözümlerinin farklılaştığı belirtilmektedir (Brucker, 2007).

Atölye Tipi Sistemler

Atölye tipi sistemlerde akış tipi sistemlerinden farklı olarak her işin üretim ortamındaki makinelerde izlediği işlem sırası birbirinden farklıdır. Aynı zamanda bu sistemde bir iş aynı makineyi birden fazla kullanabilir (Nahmias ve Olsen, 2015). Atölye tipi sistemler, özellikle az adetli ve çok çeşitli üretim yapılan ortamlarda karşılaşılan yaygın sistemler olduğu belirlenmiştir (Pinedo, 2008).

Akış Tipi Sistemler

Akış tipi üretim ortamlarında işler makineleri önceden belirlenmiş sabit sıraya göre takip etmektedirler. Tüm işler aynı rotayı izlediği için makineler bu seri düzene göre kurulmaktadır. Her iş önceki operasyonu tamamlandıktan sonra işlem görmek üzere bir sonraki makineye geçmektedir. Ayrıca bu üretim ortamlarında işler aynı rotayı izledikleri ve rotalar karmaşık yapıda olmadığı için seri ve yüksek hacimde üretim yapan otomotiv, elektronik, ilaç endüstrisi gibi sektörlerde sıklıkla karşılaşılan üretim yapıları olarak bilinmektedir (Allahverdi vd., 2008).

2.2.1.3 Performans Ölçütleri / Ölçüt Sayısı

❖ Düzenli ve Düzensiz Performans Ölçütleri

Performans ölçütleri işlerin sıralanması dikkate alınarak düzenli ve düzensiz olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.

Düzenli ölçütler, iş çizelgesindeki işlerin sırası değiştirildiğinde performans değerinin monoton şekilde artması veya azalması olarak tanımlanmaktadır. Toplam tamamlanma süresinin azaltılması veya toplam gecikme süresinin düşürülmesi düzenli ölçütlere örnek olarak verilebilmektedir. Bu ölçütler çizelgeleme problemlerinde optimal çözümlere ulaştırmayı kolaylaştırdığı, çünkü matematiksel modellerde konveks yapı sağladığı belirtilmektedir (Pinedo, 2008).

Düzensiz ölçütlerde ise işlerin sıralaması ile performans ölçütü arasında monoton bir ilişkinin olmadığı ve çoğu zaman bu ilişkinin karmaşık olduğu bilinmektedir. Makine bakımı, işçi yorgunluğu veya kalite düzeyinde oluşan

değişiklikler gibi faktörler düzensiz ölçütlerin kapsamına girmektedir. Bu tür ölçütlerin matematiksel modellere dahil edilmesi çizelgeleme probleminin karmaşıklığını artırır ve çözüm için meta-sezgisel yöntemler kullanılması gerekmektedir (Allahverdi vd., 2008).

❖ Tek Ölçütlü Çizelgeleme Problemleri

Tek ölçütlü çizelgeleme problemleri üretim sürecinde tek bir performans kriteri optimize etmeye odaklanan temel çizelgeleme yaklaşımlarıdır. Literatürde kullanılan en yaygın hedefler genellikle işlerin tamamlanma sürelerinin kısaltılması, toplam geciken iş sayısının azaltılması ve işlerin teslim tarihlerine uyum oranının maksimize edilmesi yer almaktadır. Tek ölçütlü çizelgeleme problemlerinin çözümü genellikle hızlıdır ve uygulanabilirliği yüksektir. Ancak gerçek dünyadaki üretim ortamlarında çoğu zaman birden fazla hedef bulunmakta ve tek ölçütlü çizelgeleme modelleri yetersiz kalabilmektedir (Baker, 1974).

❖ Çok Ölçütlü Çizelgeleme Problemleri

Çok ölçütlü çizelgeleme problemleri üretim sistemlerinde birden fazla performans kriterin eş zamanlı olarak optimize edilmesini gerektiren karmaşık problemlerdir. Bu problemlerde literatürde toplam üretim süresi ve toplam gecikme, ortalama akış süresi ve makine kullanım oranı, üretim maliyeti ve enerji verimliliği gibi yaygın performans kombinasyonları olarak ele alınmaktadır. Ancak bu tür problemlerde genellikle birbiriyle çelişen hedefler söz konusudur ve optimal çözüm genellikle bu hedefler arasında denge kullanılarak bulunmaktadır (Baker, 1974).

2.2.1.4 İş Özellikleri

❖ Öncelik Kısıtları

Çizelgeleme problemlerinde öncelik kısıtları işler arasında işlem görme sırasını belirleyen temel unsurlardan biridir. Pinedo (2008) bu kısıtları ‘bir işin başlayabilmesi için ön koşul olan diğer işlerin tamamlanmasını gerektiren zorunlu ilişkiler’ olarak tanımlamaktadır. Öncelik kısıtları çizelgeleme problemlerinin karmaşıklık düzeyini önemli düzeyde artırmaktadır. Bu tür kısıtlar çizelgeleme modeline dahil edildiğinde problemin çözüm uzayının daraldığını, kabul edilebilir çözümlerin sayısının azaldığını ve çözüm algoritmalarının daha karmaşık hale geldiği belirtilmektedir (Baker ve Trietsch, 2009).

❖ Rotalama Kısıtları

Rotalama kısıtlarını Allahverdi vd. (2008) üretim sürecinde işlerin makine rotalarının önceden belirlenmiş olması ve bu rotadan sapma olmaksızın işlenmesi gerekliliği olarak tanımlamaktadır. Bu kısıtlar genellikle karmaşık üretim hatlarında sıklıkla karşılaşılr ve çizelgeleme modellerinde kullanıldığında problemin çözüm uzayını önemli ölçüde daralttığı, çizelgeleme probleminin ise NP-zor problem sınıfına dahil edildiği belirtilmektedir (Pinedo, 2008).

❖ Malzeme Taşıma Kısıtları

Malzeme taşıma kısıtları üretim süreçlerinde hammaddelerin, yarı mamüllerin ve üretimi bitmiş olan ürünlerin iş istasyonları arasında hareketini düzenleyen ve sınırlayan operasyonel şartlar olarak tanımlanmaktadır. Heragu ve Ekren (2009)'e göre bu kısıtları 'malzeme taşıma sistemlerinin tasarımı ve kapasitesi, fiziksel tesis düzeni ve taşıma sürelerinin üretim planlaması üzerinde belirleyici etkileri' olarak ifade etmektedir.

❖ Hazırlık Zamanları ve Maliyetleri

Üretim süreçlerinde makinelerde bir iş işlenmesinden sonra diğer işin işlenmesi için gerçekleştirilen hazırlık işlemleri toplam üretim süresini ve çizelgeleme verimliliğini doğrudan etkileyen kritik faktörlerdendir. Bu hazırlık süreleri işin türüne ve sıralamaya bağımlı olmak üzere iki temel şekilde sınıflandırılmaktadır. Özellikle sıralamaya bağımlı hazırlık süreleri çizelgeleme modellerine dahil edildiğinde problemin karmaşıklık düzeyini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu nedenle hazırlık süreleri ve bunlara ilişkin maliyetleri çizelgeleme modellerine doğru şekilde entegre edilmesi gerekmektedir (Allahverdi vd., 2008).

❖ Öncüllükler

Çizelgeleme problemlerinde öncüllük; bir işin işlenmesinin daha yüksek öncelikli başka bir iş nedeniyle kesintiye uğraması durumu olarak ifade edilmektedir. Çizelgeleme modellerinde süren öncüllük ve tekrarlı öncüllük olmak üzere iki şekilde gerçekleşmektedir. Süren öncüllükte işte yapılan kesinti sonrası işlem kaldığı yerden devam ederken (örneğin yazılım güncelleme süreçleri), tekrarlı öncüllükte ise işlemin baştan başlatılması gerekmektedir (Baker, 1974). Bu ayrım çizelgeleme modellerinde oldukça etkilidir. Çünkü süren öncüllüğün kaynak verimliliğini koruduğu, tekrarlı öncüllüğün ek maliyetler getirdiği bilinmektedir (Pinedo, 2008).

❖ Depolama Alanı ve Bekleme Zamanı Kısıtları

Üretim sistemlerinde depolama alanı kısıtları ve bu durum sonucu oluşan bekleme zamanları çizelgeleme modellerinin verimliliğini doğrudan etkileyen kritik faktörlerdendir. Pinedo (2008) sınırlı depo kapasitesinin üretim hatlarında iki temel soruna yol açtığını belirtmiştir; bir sonraki istasyondaki depolama alanı dolduğunda makinenin bloke olması ve işlerin beklemeye alınması sonucunda üretim sürelerinin uzamasıdır. Bununla birlikte depolama alanı kısıtı dikkate alınmadığında tampon bölgelerde oluşan tıkanıklıklar hem makine kullanımı verimliliğini düşürmekte hem de genel üretim süresini oldukça artırmaktadır. Etkili üretim planlaması için depolama kapasiteleri ve olası bekleme zamanlarının çizelgeleme modellerine dahil edilmesi büyük önem taşımaktadır (Pinedo, 2008).

❖ Stoğa Üretim ve Siparişe Göre Üretim

Stoğa üretim, tahminlenen talebe dayalı olarak ürünlerin önceden üretilip stoklanmasını olarak tanımlanmakta ve bu süreçte çizelgeleme modelleri, talebi karşılamak için optimum üretim parti büyüklüklerinin ve stok seviyelerinin belirlenmesi kritik öneme sahiptir. Siparişe göre üretim ise müşteri siparişlerine göre üretim yapılmasını içermektedir. Bu durumu konu alan çizelgeleme modelleri, kaynakların esnek tahsisi, teslim sürelerinin karşılanması ve üretim sıralamasının optimize edilmesinde belirleyici rol oynamaktadır. Her iki üretim stratejisinde çizelgeleme, üretimin verimliliğini, maliyet kontrolü ve müşteri memnuniyetini doğrudan etkileyen temel bir planlama aracı olarak değerlendirilmektedir (Jacobs vd., 2011).

❖ Takım ve Kaynak Kısıtları

Üretim çizelgeleme sürecinde makinelerin kapasiteleri, özel takımların mevcut olması ve nitelikli iş gücü gibi kaynak kısıtları kritik öneme sahiptir. Bu kısıtlar üretim operasyonlarının yalnızca belirlenen zaman aralıklarında ve üretime uygun ekipmanlarla gerçekleştirebilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle bu tür kaynak kısıtlarının çizelgeleme kararlarını doğrudan etkilediği bilinmektedir. Optimal üretim planlaması yapılması için bu faktörlerin dikkate alınması gerekmektedir (Pinedo, 2008).

❖ Öğrenme Etkisi

Öğrenme etkisi, Biskup (2008) tarafından ‘bir işin tekrarlanmasıyla iş gücü verimliliğinin artması ve dolayısıyla işlem sürelerinin azalması’ olarak tanımlanmaktadır. Bu etki üretim sürecinde çalışanların belirli görevlere yatkınlık kazanması sonucu işlerin yapılışını optimize etmesi ve hata oranlarının düşmesi olarak ortaya çıkmaktadır. Ancak çalışanların öğrenme oranlarının endüstride kullanılan değerlerle birebir örtüşmemesi ve kişisel faktörlerin etkisiyle öğrenme etkisinin modellenmesi karmaşık olabilmektedir (Jaber ve Guiffrida, 2004).

2.2.1.5 Çözüm Yöntemleri

Çizelgeleme problemlerinin çözümünde literatürde geleneksel optimizasyon yöntemleri ve sezgisel yöntemler olmak üzere iki ana yaklaşım benimsenmektedir. Ayrıca son yıllarda özellikle karmaşık ve büyük boyutlu problemlerin çözümünde meta-sezgisel yöntemler de sıklıkla kullanılmaktadır.

Geleneksel Optimizasyon Yöntemleri

Geleneksel optimizasyon yöntemleri doğrusal programlama, dinamik programlama, tam sayılı programlama ve dal sınır yöntemi gibi matematiksel analize dayalı deterministik teknikleri kapsamaktadır (Nocedal ve Wright, 2006).

❖ Doğrusal Programlama

Doğrusal Programlama, Dantzig (1963) tarafından geliştirilen ve çizelgeleme problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılan matematiksel optimizasyon yöntemidir. Bu yöntemde bir amaç fonksiyonunun (örneğin gecikmeleri minimize etme ve üretim çıktısını maksimize etme), doğrusal kısıtlar (makine kapasiteleri, teslim tarihleri, iş sıralama kısıtları) altında optimize edilmesine dayanmaktadır. Doğrusal programlamanın en önemli avantajı standart formdaki problemlerde kesin optimal çözüm garantisi sunması ve simpleks yöntemi sayesinde büyük ölçekli problemlerde bile etkin sonuçlar üretebilmesidir (Baker ve Trietsch, 2009).

❖ Dinamik Programlama

Dinamik programlama, büyük ve karmaşık çizelgeleme problemlerini daha küçük ve yönetilebilir problemlere bölerek çözen bir yöntemdir. Bu yöntem problemi aşamalar halinde ele alır ve her aşamanın optimal çözümü sonraki aşamalar için temel oluşturmaktadır. Ancak problemin boyutu büyüdükçe alt problemlerin sayısı hızla

artmakta dolayısıyla problemin çözüm süresinin ciddi şekilde artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle dinamik programlama yöntemi küçük ve orta boyuttaki problemlerin çözümü için uygundur (Pinedo, 2008).

❖ Tam Sayılı Programlama

Tamsayılı programlama, üretim çizelgeleme problemlerinin matematiksel olarak modellenmesinde literatürde sıklıkla başvuru alan optimizasyon yöntemidir. Bu yöntemin temel özelliği karar değişkenlerinin (örneğin makine atamaları, işlerin makinelerde başlama zamanları vb.) kesinlikle tam sayı değerlerini alması gerektiğidir (Wolsey ve Nemhauser, 1998). Bu tür modeller, genellikle kesin çözüm sağlayan Dal-Sınır algoritması gibi yöntemlerle çözülür. Dal sınır yönteminin temel prensibini Lawler ve Wood (1966) ‘ çözüm uzayını ağaç yapısıyla temsil ederek, alt sınır hesaplamalarıyla gereksiz dalların elenmesi’ olarak tanımlamaktadır. Bu yöntem çizelgeleme problemlerinde özellikle NP-zor problemler için kısmi çözümlerin değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Ancak problem boyutu arttıkça ağaçtaki düğüm sayısının katlanarak artması nedeniyle büyük ölçekli problemlerde pratik uygulanabilirliğinin sınırlı olduğu belirlenmiştir (Wolsey ve Nemhauser, 1998).

Sonuç olarak tam sayılı programlama ve dal sınır yöntemi, endüstriyel uygulamalarda özellikle değişken sayısının nispeten az olduğu küçük ve orta ölçekli çizelgeleme problemlerinde optimum çözüm elde edilebilmekte, fakat büyük ölçekli problemlerde alternatif çözüm yöntemlerine başvurulması gerekmektedir (Pinedo, 2008).

❖ Meta-Sezgisel Çözüm Yöntemleri

Meta-Sezgisel yöntemler, karmaşık ve büyük boyutlu optimizasyon problemlerinde optimum çözüm garantisi vermeden uygun sürelerde kabul edilebilir derecede çözümler üreten sistematik yaklaşımlardır (Pearl, 1984). Özellikle NP-zor sınıfında olan çizelgeleme problemlerinde matematiksel yönden kesinliği olmayan ancak pratikte uygulanabilirliği kanıtlanmış kestirme kurallar kullanarak çözüm üretmektedirler (Pinedo, 2008).

❖ Tavlama Benzetimi

Tavlama Benzetimi, metallerin doğal tavlama işlemlerinden esinlenen Metropolis vd. (1953) tarafından literatüre kazandırılmıştır. Daha sonra Kirkpatrick

vd. (1983) tarafından NP-zor sınıfındaki çizelgeleme problemlerine uygulanmıştır. Bu yöntem üretim çizelgelemede iş sıralama ve makine atama problemlerine uygulanırken mevcut bir çözümün komşu çözümlerle kontrollü bir şekilde değiştirilmesi prensibine dayanmaktadır (Pinedo, 2008).

❖ Tabu Arama

Tabu arama, Glover (1989) tarafından geliştirilen ve özellikle kombinatoriyal optimizasyon problemlerinin çözümünde etkili sonuçlar veren çözüm yöntemidir. Bu yöntemin temel işleyişi tabu listesi adı verilen bellek mekanizmasına dayanmaktadır. Bu liste daha önce denenmiş olan çözümleri geçici olarak yasaklayarak aynı çözüm noktalarına geri dönülmesini engeller ve böylece arama sürecinin çözüm uzayının farklı bölgelerine yayılmasını sağlar (Glover,1989).

Ayrıca önemli bir esneklik mekanizması olan aspirasyon kriteri bu yöntemin zeki davranışını ortaya koymaktadır. Bu kriter sayesinde normalde yasaklı olan bir hareketin mevcut çözümden daha iyi sonuç vermesi durumunda geçici olarak serbest bırakıldığı belirtilmektedir. Bu akıllı davranış sayesinde Tabu arama yönteminin katı kurallara bağlı kalmadan dinamik şekilde çalışmasını sağlanmaktadır. (Geyik, 2000).

❖ Genetik Algoritma

Genetik algoritma Holland (1975) tarafından doğal evrim süreçlerinden esinlenerek bu durumların modellenmesi ile şekillenen çözüm yöntemidir. Ayrıca bu yöntem karmaşık optimizasyon problemlerine hızlı ve kolay çözümler sunan güçlü arama teknikleri olarak tanımlanabilmektedir (Emel ve Taşkın, 2002).

Genetik algoritmaların temel çalışma prensibi doğal seçim ve genetik varyasyon işlemlerini taklit edilmesine dayanmaktadır. Bu yöntem geniş çözüm uzaylarında geleneksel yöntemlere göre daha kısa sürede kabul edilebilir sonuçlar üretebilme özelliğiyle dikkat çekmektedir (Mansfield, 1990).

❖ Karınca Kolonisi

Karınca Kolonisi, doğada karıncaların yiyecek kaynakları ile yuvaları arasında en kısa yolu bulma davranışlarından esinlenerek geliştirilen ve kombinatoriyal optimizasyon problemleri için etkili çözümler veren bir optimizasyon yöntemidir. Dorigo vd. (1996) bu yöntemi ‘karıncaların yiyecek kaynağı ile yuvaları arasındaki

en kısa yolu çevrelerine bıraktıkları ve zamanla buharlaşan feromon izleri sayesinde bulma yeteneklerini modelleyen olasılıksal teknik' olarak tanımlamışlardır.

Bu yöntemde yapay karıncalar problemin çözüm uzayında çeşitli yolları deneyerek feromon adı verilen izler bırakır. Bu izler zaman içinde buharlaşarak azalır ancak daha kısa ve daha iyi çözümlerde daha fazla feromon birikimi sağlanır. Bu sayede diğer karıncalar yüksek feromon yoğunluğuna sahip çözüm yollarını takip eder ve çözüm uzayında daha kaliteli çözümlere ulaşılabilir.

2.2.2 Çizelgeleme Problemlerinin Notasyonu ve Gösterimi

Çizelgeleme problemlerinin modellenmesinde yaygın olarak kullanılan ve literatürde standart hale gelmiş bir gösterim biçimi bulunmaktadır. Bu gösterimde problemin temel yapısı üç ana parametre üzerinden ifade edilmekte ve genellikle $\alpha / \beta / \gamma$ formatında gösterilmektedir (Graham vd., 1979). Kullanılan gösterimde α parametresi çizelgeleme problemine konu olan makine ortamını belirtmekte ve tek bir girdiden oluşmaktadır. β parametresi problemdeki işlem karakteristikleri ve kısıtlar hakkında ayrıntılı bilgi vermektedir. Ayrıca bu parametre problemin tipine göre değişkenlik gösterebilir. Bazı durumlarda hiçbir veri içermezken bazı durumlar da ise bir veya birden fazla değer içerebilmektedir. Son olarak γ parametresi çizelgeleme probleminin amaç fonksiyonunu veya optimize edilmek istenen performans ölçütünden oluşur. Bu parametre genellikle tek bir girdiden oluşmakta ancak problem türüne göre birden fazla girdi de olabilmektedir (Pinedo, 2008).

α parametresinin alabileceği değerler şu şekildedir (Pinedo, 2008):

Tek Makine (1): Sistemde sadece tek bir makine bulunmakta ve tüm işler bu makinede ardışık olarak gerçekleştirilmektedir.

Özdeş paralel Makineler (Pm): Birbirleriyle aynı özelliklere ve performansa sahip birden fazla makine vardır. İşler bu paralel makinelerden herhangi birinde işlenebilmektedir.

Farklı hızlara sahip paralel makineler (Qm): Aynı iş için kullanılacak makinelerin çalışma hızları birbirlerinden farklıdır ve bir işin bir makinedeki işlem süresi o makinenin hızına göre değişkenlik göstermektedir.

İlişkısız paralel makineler (R_m): Her işin her makinedeki işlem süreleri birbirinden farklıdır ve makineler ile işler arasında süre yönünden ilişkiler birbirlerinden bağımsızdır.

Akış Tipi (F_m) : Üretim ortamında m adet aşamanın her birinde bir makine olmak üzere m adet makine belirli ve sabit bir sırayla dizilmekte ve işler bu makinelerde aynı işlem sırasını izleyerek hareket etmektedir.

Esnek Akış Tipi (FF_c): Sistemde birbirini takip eden ardışık aşamalar vardır fakat her aşamada aynı işi yapan paralel makineler bulunabilmektedir. Her iş her aşamadaki makinelerin sadece birinde işlem görebilmektedir.

Atölye Tipi (J_m): Her işin üretim ortamındaki makinelerde işlenme sırası kendine özgüdür ve işler bu makineler arasında farklı rotalar izleyebilmektedir.

Açık Atölye Tipi (O_m): İşler makineler üzerinde farklı rotaları takip edebilir ve işlem sırası sabit değildir. Fakat her işin mutlaka her aşamaya uğrama zorunluluğu vardır. Her iş farklı makinelerde farklı türde işlemler görebilmektedir.

β parametresinin alabileceği değerler şu şekildedir:

Geliş zamanı (r_j): Bir işin işlenmeye başlanabileceği en erken zaman dilimi olarak tanımlanmakta ve iş sisteme giriş zamanından önce makinelerde işlem görmeye başlayamamaktadır.

Sıra bağımlı hazırlık zamanları (S_{jk}): Eğer iş çizelgesinde iş j , başka bir iş olan iş k 'dan önce geliyorsa, k işine başlanmadan önce j işi ile k işi arasında hazırlık süresi (S_{jk}) tanımlanmalıdır. Hazırlık süresi aynı zamanda makineye de bağlı olması durumunda makine indeksi olan i de eklenerek (S_{ijk}) olarak gösterilmektedir.

Bölünebilme ($prmp$): İşlerin tamamlanmasına kadar aralıksız makinelerde kalmasının gerekmediği durumları ifade etmektedir. Bu durumda işler geçici olarak durdurulabilir ve daha sonra sadece kalan işlem süresi için makinelerde devam ettirilebilir.

Öncelik ($prec$): Bazı işlerin işlenmeye başlanmasından önce bu işlere bağlı olarak belirli işlerin tamamlanması gerektiği durumlar olarak ifade edilmektedir.

Arızalanma ($brkdwn$): Üretim ortamında makinelerde belirli zamanda arıza meydana gelebilmesi veya makinelerin işleme kapalı olabilmesi durumu olarak ifade edilmektedir.

Yeniden dolaşım (recrc): Atölye tipi sistemlerde bir işin aynı makineyi işlem görmek için birden fazla kez ziyaret etme durumu olarak bilinmektedir.

Permutasyon (prmu): Akış tipi sistemlerde işlerin bütün makinelerde aynı işlem sırasında olarak ifade edilmektedir.

Beklemesiz (nwt): Akış tipi sistemlerde işler arasında makinelere geçişte bekleme olmaması ve işlemlerin ardışık olarak kesintisiz devam etmesi durumu olarak bilinmektedir. Bu durumda FIFO kuralı geçerli olmaktadır.

Öğrenme etkisi (LE): İşlem sürelerinin zaman içinde çalışanların deneyimi veya tekrar eden işler nedeniyle azalma yönünde değişkenlik göstermesi olarak ifade edilmektedir.

Bozulma Etkisi (DE): İşlem sürelerinin zaman içinde meydana gelen makine aşınması, performans düşüklüğü veya çalışanlarda biriken yorgunluk ve motivasyon kaybı sonucu artma yönünde değişkenlik göstermesi olarak ifade edilmektedir.

Bloklanma (block): Üretim ortamında makineler arasındaki kuyruk kapasitesinin sınırlı olduğu ve bu kapasite dolduğunda, bir sonraki makinenin bloke olması nedeniyle önceki makinenin tamamladığı işi sonraki makineye aktaramama durumu olarak bilinmektedir.

γ parametresinin alabileceği değerler şu şekildedir:

Tamamlanma Zamanı (C_j): Bir işin tüm işlemleri tamamlandıktan sonra sistemden ayrıldığı zamanı göstermektedir.

Toplam Tamamlanma Zamanı ($\sum C_j$): Sistemde bulunan tüm işlerin tamamlanma zamanlarının toplamıdır ve işlerin genel bitiş performanlarını yansıtmaktadır.

Maksimum Tamamlanma Zamanı (C_{max}): Sistem üzerinde işlem gören son işin tamamlanma zamanının ifade etmektedir. En aza indirgenmesi durumunda üretim hattının hızlı ve verimli çalışması sağlanmaktadır.

Toplam Akış Zamanı ($\sum F_j$): İşlerin sistemde kaldığı toplam süredir ve üretim süreçlerinin hızının değerlendirilmesinde kullanılmaktadır.

Toplam Ağırlıklı Akış Zamanı ($\sum W_j C_j$): İşlerin ağırlıklandırılmış tamamlanma zamanlarının toplamı olarak ifade edilmekte ve stok maliyetleri gibi faktörlerin sisteme etkisini yansıtmaktadır.

Maksimum Gecikme (T_{max}): İşlerin teslim tarihinden ne kadar saptığını göstermekte ve en büyük gecikme süresi olarak ifade edilmektedir.

Toplam Geç Bitirme Süresi ($\sum T_j$): İşlerin teslim tarihinden sonra tamamlanmasının toplam süresi olarak bilinmektedir.

Toplam Ağırlıklı Geç Bitirme Süresi ($\sum W_j T_j$): İşlerin teslim tarihinden sonra tamamlanması sonucu oluşan gecikme sürelerinin, işlerin önceliklerine göre ağırlıklandırılmış toplamıdır.

Toplam Geciken İş Sayısı ($\sum U_j$): Sistemde teslim tarihinden sonra tamamlanarak geciken işlerin toplam sayısını belirtmektedir.

Toplam Ağırlıklı Geciken İş Sayısı ($\sum W_j U_j$): Sistemde geciken işlerin önem derecelerine göre ağırlıklandırılmış toplam sayısı olarak ifade edilmektedir.

Bu çalışmanın devamında $FF_c / LE, DE / W_j T_j$ [FF_c : Esnek Akış Tipi, LE : Öğrenme Etkili, DE : Bozulma Etkili, $W_j T_j$: Ağırlıklı Gecikme Süresi] gösterimli çizelgeleme problemi ele alınacak ve problemin çözümüne ilişkin matematiksel modelleme formülasyonu ve programlama yaklaşımları ortaya konulacaktır.

2.3 Esnek Akış Tipi Çizelgeleme Problemleri

Klasik akış tipi üretim sistemi tüm işlerin aynı sırada farklı makinelerde işlendiği ve her aşamada yalnızca bir makinenin bulunduğu üretim ortamı olarak ifade edilmektedir. Bu ortamı konu alan çizelgeme modelinde her iş birinci aşamadan başlayarak son aşamaya kadar sabit bir işlem sırasını takip etmektedir (Pinedo, 2008).

Ancak gerçek üretim ortamlarında her aşamada birden fazla makine ve her işin kendilerine özgü işlem rotalarının bulunması söz konusu olabilmektedir. Bu durum klasik akış tipi üretim sisteminin ötesine geçerek daha esnek ve gerçek üretim ortamlarını daha iyi yansıtan bir model olan esnek akış tipi üretim sistemlerinin tanımlanmasını gerekli kılmaktadır. Esnek akış tipi üretim sistemi seri olarak düzenlenmiş belirli sayıda aşamadan ve her aşamada yer alabilen paralel makinelerden oluşmaktadır. Literatürde bu üretim sistemi melez akış tipi, paralel makineli akış tipi,

çok işlemcili akış tipi ve esnek akış hattı gibi adlarla da kullanılmaktadır (Pinedo, 2008).

Esnek akış tipi çizelgeleme problemlerini klasik akış tipi çizelgeleme problemleri ile paralel makine çizelgeleme problemlerinin özelliklerinin birleştirilmesi olarak tanımlanabilmektedir. Esnek akış tipi problemleri, seri olarak bağlanmış çoklu üretim aşamalarından oluşan ve en az bir aşamada birden fazla paralel makinenin olmak zorunda olduğu çizelgeleme modelinin temel özelliğini oluşturmaktadır. Böylece klasik akış tipinde görülen sabit ürün rotası yerine üretim sürecinde işlere rota esnekliği de kazandırılarak sistemin gerçek üretim ortamına esneklik kazandırılmaktadır (Gupta, 1988).

Paralel makine çizelgeleme problemleri işlerin hangi makinelere atanacağı ile ilgilenirken akış tipi çizelgeleme problemlerinde işler farklı aşamalarda sıralamaya tabi tutulmaktadır. Esnek akış tipi çizelgeleme problemlerinde ise temel amaç belirli performans ölçütlerini altında her aşamada işlerin makinelere atanması ve sıralanmasını birlikte gerçekleştirmektir (Ribas vd., 2010).

Literatürde, esnek akış tipi çizelgeleme problemleri için yaygın olarak kabul gören temel varsayımlar şu şekildedir (Ruiz ve Vázquez-Rodríguez, 2010):

- Üretim sistemi, birbirini takip eden en az iki aşamadan oluşmaktadır ve her iş bu aşamaları kendilerine belirlenen sıraya göre geçmek zorundadır.
- Her aşamada bir veya daha fazla makine bulunmakta ancak en az bir aşamada birden fazla paralel makine yer alması zorunlu olmaktadır.
- Her iş, her aşamada yalnızca bir makine tarafından işlenmektedir. İşlerin aynı anda birden fazla makinede işlenmesi mümkün değildir.
- Makinelerde aynı anda yalnızca bir iş işlem görebilmektedir ve eş zamanlı olarak birden fazla iş üzerinde işlem yapma kapasitesine sahip değildir.
- İşlem gören işler kesintiye uğramaz; bir iş bir makinede işlem görmeye başladıktan sonra tamamlanana kadar o makinede kalması zorunludur.
- İşlerin akışı belirli ve tek yönlüdür; bir işin sonraki aşamaya geçebilmesi için önceki aşamanın tamamlanması zorunludur.
- Çizelgeleme sürecinin başlangıcında tüm işler hazır olmak zorundadır ve ayrıca süreç boyunca sisteme yeni iş eklenmemelidir.

- Problemin çözümünde genellikle bir performans kriterlerinin minimize edilmesi amaçlanmaktadır.

2.4 Öğrenme Etkisi

Öğrenme etkisinin üretim süreçlerinde kullanılmasını ilk kez Wright (1936) tarafından bilimsel olarak ele alınmıştır. Wright uçak üretimi üzerinde yaptığı çalışmasında üretim miktarı arttıkça doğrudan işçilik maliyetlerindeki azalmanın meydana geldiğini tespit etmiş ve bu durumu “öğrenme eğrisi” kavramı ile açıklamıştır. Özellikle “üretim çıktısı iki katına çıktığında işlem süresinin %20 oranında azaldığını” ifade ederek bu durumu %80 öğrenme eğrisi hipoteziyle modellemiştir (Wright, 1936).

Yelle (1979) öğrenme etkisini “işlemlerin tekrarlanması sonucu tek bir birimi üretmek için gereken sürenin sürekli azalması ve buna bağlı olarak birim maliyetlerin düşmesi” olarak tanımlamıştır. Bu durum üretimde hem zaman hem de kaynak kullanımında verimliliği artırmaktadır.

Öğrenme etkisi yalnızca üretim süreçleriyle sınırlı kalmayıp işletmelerin tüm fonksiyonlarında önemli rol oynamaktadır. Bu etki işletmede operasyonel verimlilik analizlerinden stratejik karar alma süreçlerine kadar geniş bir uygulama alanı bulunmaktadır. Özellikle iş gücü planlaması, maliyet tahminleri, tedarikçi performanslarının değerlendirilmesi ve kurumsal performans yönetimi gibi temel yönetim süreçlerinde öğrenme eğrilerinin etkin şekilde kullanılabileceği belirtilmektedir (Heizer ve Render, 2011).

2.4.1 Çizelgeleme Problemlerinde Öğrenme Etkisi Türleri

Çizelgeleme problemlerinde öğrenme etkisinin ele alındığı ilk önemli çalışmalar Biskup (1999) tarafından gerçekleştirilmiştir. Biskup işlem sürelerinin zamanla ve edinilen deneyimlerle azaldığını dikkate alan modeller geliştirerek geleneksel çizelgeleme yaklaşımlarında sabit kabul edilen işlem süresi varsayımına alternatif bir yaklaşım getirmiştir. Öğrenme etkisini çizelgeleme problemlerinde kullanıma ilişkin teorik yapının gelişiminde Mosheiov (2003) yaptığı çalışmalar belirleyici olmuştur. Mosheiov çalışmalarında öğrenme etkisinin hem tek makine hem de paralel makineli sistemlerde çeşitli performans kriterleri üzerindeki etkisini kapsamlı şekilde analiz ederek bu alanda teorik altyapı oluşturmuştur. Biskup (1999)

ve Mosheiov (2003) çalışmaları öğrenme etkisinin çizelgeleme problemlerinde kullanılması konusunda temel bir referans noktası oluşturarak sonraki çalışmalar için yol gösterici olmuştur.

Literatürde öğrenme etkisinin çizelgeleme problemlerinde kullanılması konusunda işlemlerin ayrı ayrı veya bir bütün halinde değerlendirilmesine bağlı olarak iki farklı temel yaklaşım bulunmaktadır. Bu yaklaşımlardan ilki gerçeğe daha yakın olan ve oldukça sık kullanılan işleri ayrı ayrı değerlendiren ‘Pozisyon Tabanlı’ öğrenme etkisi olarak tanımlanmaktadır. Diğer temel yaklaşım ise üretim sürecindeki işleri bir bütün olarak ele alan ‘İşlem Süreleri Toplamı Esaslı’ öğrenme etkisidir (Biskup, 2008). Her iki türde literatürde geçerlidir ve bu etkileri temel alarak başka öğrenme etkisi türleri geliştirilmiştir.

Pozisyon Bağımlı Öğrenme Etkisi

Pozisyon bağımlı öğrenme etkisi kavramı literatürde ilk kez Biskup (1999) tarafından kullanılmıştır. Biskup ‘üretim sürecinde bir işin tekrar sayısına bağlı olarak işlem süresinde meydana gelen azalmayı öğrenme süreci’ olarak tanımlamıştır. Bu bağlamda, öğrenme etkisinin işlem süresine yansımaları pozisyon bazında modellenmiştir. Pozisyon bağımlı öğrenme etkisi matematiksel olarak şu şekilde ifade edilmektedir (Biskup, 2008):

$$P_{ir} = P_i . r^a$$

Burada P_{ir} ifadesi i işinin tek bir makinede r.pozisyonunda işlendiğinde öğrenme etkisiyle azalan işlem süresini, P_i ifadesi öğrenme etkisi olmadan i işinin sabit işlem süresini, r ifadesi tek bir makinede işlerin sıralandığı pozisyon sayısını ve a ise öğrenme oranına bağlı olan öğrenme indisi olarak gösterilmektedir. Öğrenme indisi a genellikle $a = \log_2(LR)$ formülü ile hesaplanmaktadır. Formüldeki LR ifadesi öğrenme oranı olarak ifade edilmektedir.

İşe Bağımlı Pozisyon Tabanlı Öğrenme Etkisi

İşe bağlı pozisyon tabanlı öğrenme etkisi kavramı literatürde ilk kez Mosheiov ve Sidney (2003) tarafından ele alınmıştır. Mosheiov ve Sidney (2003) yaptıkları çalışmada her işin doğasının farklı olduğunu ve bu nedenle işçilerin öğrenme düzeylerinin de işten işe farklılaşabileceğini ifade etmişlerdir. Bu yaklaşıma göre bir işçi belirli bir iş üzerinde deneyim kazandıkça o işe özel bir öğrenme süreci

gelişmektedir. Ayrıca işlerin üretim sırasındaki pozisyonlarına bağlı olarak işlem sürelerinde değişim olabileceği yani öğrenme etkisinin pozisyona da duyarlı olabileceği belirtmişlerdir.

Bu durumda öğrenme etkisinin sadece genel bir üretim süreci için değil aynı zamanda her bir iş ve onun üretim sırasındaki konumu için ayrı ayrı değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu tür öğrenme etkisi matematiksel olarak şu şekilde ifade edilmektedir (Mosheio ve Sidney, 2003).

$$P_{ir} = P_i . r^{a_i} \quad a_i \leq 0 \quad (i=1..n)$$

Burada a_i ifadesi pozisyon bağımlı öğrenme etkisinden farklı olarak i ifadesi işleri göstermek üzere her iş için farklı öğrenme oranını temsil etmektedir.

Makine Bağımlı Pozisyon Tabanlı Öğrenme Etkisi

Bu öğrenme etkisi türünde öğrenme sürecinin her bir makine üzerinde bağımsız olarak gerçekleştiği durum ele alınmıştır (Lee ve Wu, 2004). Bu öğrenme etkisi çok makineli çizelgeleme problemlerinde oldukça yaygın kabul gören yaklaşımdır. Pozisyon tabanlı öğrenme etkisinden farklı olarak bu modelde işlem süresi işin hem pozisyonuna hem de makineye bağımlı olarak değişmektedir. Bu tür öğrenme etkisi matematiksel olarak şu şekilde ifade edilmektedir.

$$P_{ijr} = P_{ij} . r^a \quad (i, r=1..n)$$

Bu gösterimde P_{ijr} ifadesi üretim sürecinde olan j makinesinde i işinin öğrenme etkisi altındaki işlem süresini ve P_{ij} ifadesi ise j makinesinde i işinin sabit işlem süresini temsil etmektedir.

Hazırlık Süresi Temelli Öğrenme Etkisi

Otomasyonun yoğun olduğu üretim ortamlarında üretim sürecinin büyük ölçüde makineler tarafından gerçekleştiği durumlarda öğrenme etkisinin işlem sürelerinden ziyade hazırlık süreleri üzerinden ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Bu tür üretim sistemlerinde özellikle çalışanların ürün üretimine katkısının sınırlı olması nedeniyle öğrenme etkisi hazırlık zamanlarında zamanla oluşan verimlilik artışı sonucu hazırlık sürelerinin daha kısa sürede tamamlanması olarak ortaya çıkmaktadır.

Bu durum literatürde Koulamas ve Kyparisis (2007) tarafından önerilmiştir. Yaptıkları çalışmada toplam işlem süresi sabit işlem süresi ve öğrenme etkisine bağlı

olarak azalan hazırlık süresi olmak üzere iki ayrı bileşene ayrılmıştır. Bu öğrenme etkisi türü matematiksel olarak şu şekilde ifade edilmektedir.

$$P_{ir} = P_i + s_{ir} \text{ ve } s_{ir} = s_i \cdot r^a$$

Bu gösterimde s_{ir} ifadesi i işinin r pozisyonunda öğrenme etkili hazırlık süresini ve s_i ifadesi ise i işinin sabit hazırlık süresini göstermektedir. Bu modele göre üretim süresi sabit kalırken sadece hazırlık süresi işin pozisyonuna bağlı olarak azalmaktadır. Bu öğrenme etkisinin sadece hazırlık sürelerinde uygulanması tamamen makine odaklı üretim sistemleri için gerçekçi bir yaklaşım sunmaktadır.

Kısıtlı Pozisyona Bağlı Öğrenme Etkisi

Öğrenme etkisi işlerin makinelerde sıralanmasına bağlı olarak işlem sürelerinin azalması olarak adlandırılmaktadır. Ancak gerçek üretim ortamlarında bu azalma sürekli olarak devam etmez. Çeşitli fiziksel ve insani faktörler nedeniyle işlem süreleri belirli bir minimum sınırın altına inmemektedir. Bu durum literatürde kısıtlı pozisyona bağlı öğrenme etkisi olarak modellenmiştir (Cheng ve Wang, 2000).

Cheng ve Wang (2000) önerdikleri bu öğrenme etkisi türü matematiksel olarak şu şekilde ifade edilmektedir:

$$P_{ir} = P_i \max(r^a, \beta)$$

Bu modelde diğer pozisyon tabanlı öğrenme etkisi türlerinden farklı olarak $\beta \in (0,1)$ ifadesi işlem süresinin azalabileceği en düşük sınırı belirleyen kontrol parametresi olarak ifade edilmektedir. Bu öğrenme türü, pozisyon arttıkça işlem süresinin azalmasını sağlar ancak β parametresi sayesinde işlem süresinin gerçekçi ve uygulanabilir bir alt sınırdan kalması garanti edilir.

Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme Etkisi

Pozisyona dayalı üstel öğrenme etkisi modeli, işlem sürelerinin işlerin üretim sırasındaki pozisyonuna bağlı olarak üstel bir şekilde azalmasını ifade etmektedir (Cheng, 2013). Bu öğrenme etkisi türü matematiksel olarak şu şekilde ifade edilmektedir:

$$P_{ijr} = P_{ij} \cdot a^{r-1}$$

Bu modelde a ifadesi $0 < a < 1$ aralığında bir parametre olup öğrenme etkisinin şiddetini belirlemektedir. Pozisyon arttıkça yani r değeri büyüdükçe a^{r-1} ifadesi küçülür ve bu sayede gerçek işlem süresinde azalma meydana gelmektedir. Bu öğrenme etkisi türü işlem sürelerinde mantıklı ve aşamalı bir azalma sağlayarak gerçek üretim ortamlarına daha uyumludur.

İşlem Zamanlarının Toplamı Esaslı Öğrenme Etkisi (Zaman Bağımlı)

Pozisyon bazlı öğrenme etkisi türleri her işin sistemdeki sıralamasına bağlı olarak işlem süresinin azaldığını varsaymaktadır. Ancak bu tür öğrenme etkisi yaklaşımında özellikle her işin işlem adımlarının farklı olduğu veya işlemlerin insan etkileşimi ile yürütüldüğü durumlarda yetersiz kalabilmektedir. Oluşan bu durumu gidermek amacıyla Kuo ve Yang (2006), öğrenme sürecini işin pozisyonuna bağlı olarak değil önceki işler boyunca kazanılan toplam deneyime bağlı olarak tanımlanan alternatif bir model önermişlerdir.

Bu öğrenme türüne göre üretim süreci boyunca çalışan ya da sistem tarafından harcanan toplam işlem süresi arttıkça kazanılan deneyim de artmakta ve bu durum sonraki işlerin daha kısa sürede tamamlanmasına katkı sağlamaktadır. Bu öğrenme etkisinin matematiksel gösterimi şu şekildedir:

$$P_{ir} = \left(1 + \sum_{k=1}^{r-1} P_k \right)^a$$

Bu modelde P_{ir} ifadesi r . pozisyonda i işinin öğrenme etkili işlem süresini, P_i ifadesi i işinin sabit işlem süresini, $\sum_{k=1}^{r-1} P_k$ ifadesi $(r-1)$. pozisyona kadar yer alan bütün işlerin işlem süreleri toplamını ve a ifadesi öğrenme katsayısını temsil etmektedir.

Logaritmik Öğrenme Etkisi

Pozisyon tabanlı ve işlem zamanlarının toplamı esaslı öğrenme etkisi modelleri üretim sistemlerini açıklamada önemli katkılar sağlamış olmasına rağmen bu modeller bazı gerçekdışı sonuçlar da üretebilmektedir. Cheng vd. (2009) bu durumu ilk kez ele alarak mevcut öğrenme modellerinin bir sorununa işaret etmişlerdir. Modellere göre, iş sayısı arttıkça veya daha önce işlenen işlerin toplam süresi büyüdükçe, öğrenme etkisi sınırsız varsayılmakta ve işlem sürelerinin gerçekçi olmayan bir şekilde sıfıra yakınsamasına neden olmaktadır. Ancak gerçek üretim ortamlarında öğrenmenin

sonsuz bir şekilde sürmesi mümkün değildir. Öğrenme zamanla etkisi azalan ve belirli bir sınırdan duran bir yapıya sahiptir. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda öğrenme etkisinin azalan marjinal fayda kuralına göre modellenmesi gerekmektedir (Cheng vd. 2009).

Bu amaçla Kuo ve Yang (2006) tarafından önerilen toplam işlem süresi esaslı öğrenme modeline alternatif olarak bir işin işlem süresini daha önce işlenen işlerin işlem sürelerinin logaritmalarının toplamına bağlı olarak tanımlayan yeni bir fonksiyon önerilmiştir (Liang vd., 2019). Bu öğrenme modelinin matematiksel formülü şu şekildedir:

$$P_{ir} = \left(1 + \sum_{k=1}^{r-1} \ln (P_k) \right)^a \cdot P_i$$

Bu denklemde $\sum_{k=1}^{r-1} \ln (P_k)$ ifadesi r pozisyonu öncesinde tamamlanan işlerin işlem sürelerinin logaritmik olarak toplamını ifade etmektedir. Bu öğrenme modelinde öğrenmenin bir noktadan sonra azalan bir hızla ilerlediğini ve işlem sürelerinin gerçek dışı sıfırlanmasının önüne geçilmesi gerektiği belirtilmektedir (Cheng vd., 2009).

Kısıtlı İşlem Zamanlarının Toplamı Esaslı Öğrenme Etkisi

Wu vd. (2012) tarafından ortaya konan kısıtlı işlem zamanlarının toplamı esaslı öğrenme etkisi, bir işin işlem süresinin o işten önceki işlerin toplam işlem süresi ve belirli bir kontrol parametresi dikkate alınarak değişmesi olarak ifade edilmektedir. Bu öğrenme modelinin matematiksel gösterimi şu şekildedir:

$$P_{ir} = P_i \cdot \max \left\{ \left(1 + \sum_{k=1}^{r-1} P_k \right)^a, \beta \right\}$$

Bu modelde β ifadesi işlem süresinin ulaşabileceği minimum sınırı belirleyen kontrol parametresidir. ($0 < \beta < 1$). Bu öğrenme modeli, öğrenme etkisinin pratikte sınırlı olduğunu dikkate alarak işlem sürelerinin aşırı düşük değerlere düşmesini engeller ve üretim planlamada daha gerçekçi süre tahminlerinin yapılmasını sağlamaktadır.

İşlem Sürelerinin Toplamı Esaslı Üstel Öğrenme Etkisi

Wang vd. (2009) tarafından geliştirilen öğrenme etkisinin bu türünde her bir işin işlem süresinin daha önce tamamlanan işlerin toplam süresinin üstel bir fonksiyonu olarak azalması olarak ifade edilmektedir. Bu öğrenme türünün matematiksel gösterimi şu şekildedir:

$$P_{ir} = \left(\delta \alpha \sum_{k=1}^{r-1} P_k + \gamma \right) P_i$$

Bu modelde δ ifadesi öğrenme etkisinin şiddetini kontrol eden ana parametredir. Parametre değeri ne kadar büyük olursa önceki işlerin toplam süresinin mevcut işlem süresini azaltma etkisi o kadar güçlü olmaktadır. Formüldeki γ ifadesi ise temel işlem süresini koruma faktörü olarak ifade edilmekte ve genellikle $0 < \gamma < 1$ aralığında yer almaktadır. Bu ifadenin 1 olması durumunda işlem süresinin temel süreden daha fazla düşmesini engelleyerek öğrenme etkisini sınırlandırmaktadır. Bu iki parametre, modelde $\delta + \gamma = 1$ koşulunu sağlamakta ve genelde değerleri sıfır veya pozitif değerler almaktadır.

2.5 Bozulma Etkisi

Üretim çizelgeleme problemlerinde bozulma etkisi (deterioration effect) kavramı ilk olarak Gupta ve Gupta (1988) tarafından ortaya atılmış olup bu kavram işlem sürelerinin zamanla sabit kalmayarak çalışan yorgunluğu, motivasyon kaybı, makine performansındaki düşüşler, çevresel faktörler ve makine bakım ihtiyaçları gibi gerçek üretim ortamlarında sıklıkla karşılaşılan durumlara bağlı olarak artabileceğini ifade etmektedir. Bu tür dinamiklerin çizelgeleme modellerine dahil edilmesi geleneksel modellerin aksine zamanla değişen işlem sürelerini dikkate alarak daha gerçekçi ve uygulanabilir çizelgeleme çözümleri üretilmesine olanak tanımakta ve Gupta ve Gupta (1988)'in bu öncü çalışması sonraki araştırmacılar için önemli bir temel oluşturmaktadır.

2.5.1 Çizelgeleme Problemlerinde Bozulma Etkisi Türleri

Doğrusal Bozulma Etkisi

Bozulma etkisinin en temel ve literatürde en sık kullanılan türüdür. Bu modelde bir işin işlem süresi, işin başlama zamanıyla doğru orantılı olacak şekilde artmaktadır.

Diğer bir ifadeyle bir iş işlenmeye ne kadar geç başlarsa tamamlanma o kadar uzun sürmektedir. Doğrusal bozulma etkisi zaman geçtikçe oluşan üretim zorluklarını basit fakat etkili bir şekilde temsil etmektedir (Gupta ve Gupta, 1988). Bu etkinin matematiksel gösterimi şu şekildedir:

$$P_i(t) = b_i \cdot t_i$$

Bu modelde $P_i(t)$ ifadesi i işinin bozulma etkisi altındaki işlem süresini, b_i ifadesi i işine özgü bozulma katsayısını ($b_i \geq 0$) ve t_i ifadesi i işinin çizelgelenmeye başlandığı zamanı temsil edilmektedir. Bozulma etkisinin bu türü işlem süresinin doğrudan başlama zamanına bağlı olduğu durumlar için uygun olmaktadır. Gupta ve Gupta (1988)'nın önerdiği bu yaklaşım üretim çizelgelemede işlem sürelerinin zamanla değişebileceğini dikkate alan ilk modellerden biri olarak kabul edilmektedir.

Doğrusal Olmayan Bozulma Etkisi

Bozulma etkisinin bu türünde işlem sürelerinin sadece doğrusal değil, doğrusal olmayan bir biçimde zamanla arttığı model ele alınmıştır. Bu modele göre işin işlem süresi, işin başlama zamanına bağlı olarak artmakla kalmaz. Artış hızı, zamanın karesi veya başka kuvvet fonksiyonları gibi doğrusal olmayan fonksiyonları dikkate alarak artmaktadır.

Ceylan (2014) çalışmasında doğrusal olmayan bozulma etkisini, bir işin gerçek işlem süresinin başlama zamanına bağlı olarak üstsel bir şekilde artması olarak ele almış ve şu şekilde modellemiştir:

$$P_i(t) = P_i + a \cdot t^{b_i}$$

Bu modelde a ifadesi bozulmanın şiddetini kontrol eden katsayıyı ($a > 0$), b_i ifadesi doğrusal olmayan bozulma katsayısını ve t ifadesi işin başlama zamanını ifade etmektedir.

Oransal Doğrusal Bozulma Etkisi

Bozulma etkisinin bu türü Miao (2017) ve Lv vd. (2024) gibi araştırmacılar tarafından benimsenmiştir. Oransal doğrusal bozulma etkisi, bir işin gerçek işlem süresinin işin başlama zamanıyla doğru orantılı olarak artması şeklinde tanımlanmaktadır. Yani bir iş işlenmeye ne kadar geç başlarsa işlem süresi de oransal olarak o kadar artmaktadır (Miao, 2017).

Matematiksel olarak oransal doğrusal bozulma etkisi şu şekilde ifade edilmektedir.

$$P_i(t) = b_i \cdot t_i$$

Bu model doğrusal bozulma etkisi modelinden farklı olarak b_i ifadesi katsayı olarak değil i işinin bozulma oranı olarak temsil edilmektedir.

Makine Bağımlı Bozulma Etkisi

Üretim ortamında makinelerin performansının zamanla bozulması önemli faktördür. Bu kapsamda Eren (2012) yaptığı çalışmada her bir makinenin bozulma oranlarının farklı olabileceği ve bu durumun işlem sürelerini doğrudan etkilediğini belirtmektedir.

$$P_{ijr} = P_{ij} \cdot r^{a_j}$$

Bu modelde P_{ijr} ifadesi i işinin j makinesinde bozulma etkili işlem zamanını, P_{ij} ifadesi i işinin j makinesindeki işlem zamanı, a_j ifadesi j .makinenin bozulma katsayısını ve r ifadesi ise işlerin makinede atandığı pozisyonu temsil etmektedir.

Pozisyona Bağlı Bozulma Etkisi

Pozisyona bağlı bozulma etkisinde işin işlem süresinin üretim sırasında atandıkları pozisyonlara bağlı olarak arttığı durumları ifade etmektedir. Bu modelde bozulma etkisi doğrudan zamana değil, işin sıralamadaki yerine bağlı olarak tanımlanmaktadır. İşlerin karmaşıklıklarının artması, çalışanların yorgunluk veya kaynak sınırlılığı gibi birbirleriyle ardışık olarak üretim sürecinde ortaya çıkan durumları çizelgeleme problemlerine yansıtmada kullanılmaktadır.

$$P_{ijr} = P_{ij} \cdot r^{a_{ij}}$$

Modelde a_{ij} ifadesi değeri pozitif olan ($a_{ij} > 0$) bozulma etkisi katsayısı olarak temsil edilmektedir (Lee vd., 2013).

İşe Bağımlı Pozisyon Tabanlı Bozulma Etkisi

Li vd. (2019) yaptıkları çalışmada her bir işin bozulma katsayısının birbirinden farklı olduğu ve işlem süresinin pozisyona bağlı olarak arttığı durum için bu bozulma etkisini tanımlamışlardır. Bu modelin matematiksel gösterimi şu şekildedir:

$$P_{ijr} = P_{ij} . r^{a_i}$$

Denklemde P_{ijr} ifadesi i işinin j makinesinde bozulma etkili işlem süresini, P_{ij} ifadesi i işinin j makinesinde temel işlem süresini, a_i ifadesi işlere bağlı olarak değişen bozulma katsayılarını ve r ifadesi işlerin makinelerde atandıkları pozisyonları temsil etmektedir.

Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma Etkisi

Li vd. (2018) tarafından geliştirilen üstel pozisyon bağımlı bozulma etkisi, bir işin işlem süresinin pozisyona bağlı olarak üstel olarak arttığı durum olarak ifade edilmiştir. Pozisyon ilerledikçe bozulma etkisine bağlı olarak işlem süresi artmakta ve bu artış üstel bir fonksiyon ile tanımlanmaktadır. Bu modelin matematiksel gösterimi şu şekildedir:

$$P_{ijr} = P_{ij} . (\beta r + 1)e^{-\beta r}$$

Denklemde P_{ijr} , i işinin j makinesinde bozulma etkili işlem süresini, P_{ij} , i işinin j makinesindeki işlem süresini, β ,bozulma katsayısını r ifadesi pozisyonu ve $e^{-\beta r}$ ise üstel terim olarak işlem süresinin üstel olarak artışı temsil etmektedir.

2.6 Akış Tipi Çizelgeleme Problemlerinde Öğrenme ve Bozulma Etkisinin Birlikte Kullanıldığı Çalışmalar

Literatür çalışması için öncelikle “Akış Tipi Çizelgeleme”, “Flow Shop Scheduling”, “Öğrenme Etkisi”, “Learning Effect”, “Bozulma Etkisi”, “Deterioration Effect”, “Unutma Etkisi”, “Forgetting Effect”, “Bozulan İşler”, “Deterioration Jobs”, “Öğrenme ve Bozulma Etkili “, “Learning and Deterioration Effect” anahtar kelimelerini içeren çalışmalar dikkate alınmıştır.

Literatür taraması için ‘Google Scholar, IEEE Xplore, Science Direct, Springer Link, Taylor & Francis Online, Research Gate, Dergi Park ve TR Dizin’ gibi akademik veri tabanları kullanılmış ve anahtar kelimelere ilişkin makaleler ve çalışmalar ele alınmıştır.

Çalışmaları değerlendirmek için altı farklı kategori belirlenmiştir. Akış Tipi Türü kategorisinde klasik, iki makineli, permütasyon ve esnek akış gibi akış türlerini içeren alt kategoriler vardır. Öğrenme Etkisi ve Bozulma Etkisi Türü kategorisinde

literatürde kullanılan öğrenme ve bozulma türlerini içeren alt kategoriler bulunmaktadır. Çalışmanın amacı kategorilerinde, literatürde yer alan çalışmalardaki amaç fonksiyonlarına yer verilecektir. Çalışmanın türü kategorisinde yeni bilgi ve yöntem üretme amaçlı analitik çalışma, model ve yöntemin doğruluğunu belirlemek için test çalışması ve gerçek bir işletme veya sistemin ihtiyacını çözmek için uygulama çalışması alt kategorileri bulunmaktadır. Çözüm yöntemleri kategorisinde geleneksel optimizasyon yöntemlerinin kullanıldığı analitik yöntemler, problemleri hızlıca çözmek için geliştiren çözüm uzayında hızlı arama yapabilen sezgisel yöntemler ve büyük boyutlu problemlerin çözümünde genel arama stratejileri kullanarak iyi çözümler bulabilen meta-sezgisel yöntemleri içeren alt kategoriler bulunmaktadır. Bu doğrultuda literatürde akış tipi çizelgeleme problemlerinde öğrenme ve bozulma etkilerinin birlikte kullanıldığı çalışmaların özeti Tablo 2.2’ de gösterilmektedir.

Akış tipi sistemlerde öğrenme ve bozulma etkilerinin birlikte ele alındığı çalışmalar incelendiğinde akış tipi kategorisinde Klasik Akış Tipi sistemlere odaklanan çalışmaların sayıca baskın olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum araştırmacıların ilk olarak problemi basit ve standart sistemleri üzerinden tanımlama eğiliminden kaynaklanmaktadır. Diğer yandan Esnek Akış Tipi ve Permütasyon Akış Tipi gibi daha karmaşık sistemlere yönelik çalışmaların son on yılda literatürde sayılarının arttığı belirlenmiştir. Bu yönelim akademik ilginin giderek gerçek üretim koşullarını daha iyi yansıtan modellere olan ilginin arttığını göstermektedir.

Yapılan çalışmalar öğrenme etkisi açısından incelendiğinde büyük bir çoğunluğu pozisyon bağımlı öğrenme etkisini benimsemiştir. Bunun temel nedeni bu öğrenme türünün hesaplama kolaylığı sağlaması hem analitik çalışmalara hem de sezgisel algoritmaların geliştirilmesine daha elverişli yapıda olmasıdır. Ancak zaman bağımlı ve iş bağımlı öğrenme türleri gerçek üretim ortamlarını daha iyi yansıtmalarına rağmen problemin yapısını önemli ölçüde karmaşıktırdığı için daha az tercih edilmiştir.

Bozulma etkisi için de benzer bir eğilim gözlemlenmektedir. Çalışmaların çoğu modelleme ve çözüm açısından nispeten daha yönetilebilir olan doğrusal bozulma türünü kullanmıştır. İş bağımlı ve üstel bozulma gibi daha karmaşık bozulma etkisi türlerinde sınırlı sayıda çalışma ele alınmıştır. Öğrenme ve bozulma etkisi türlerinde bu tercihler araştırmacıların genellikle analiz edilebilir ve çözülebilir basit öğrenme ve bozulma etkisi türlerine öncelik vermesiyle açıklanabilmektedir.

Tablo 2.2 Öğrenme ve Bozulma Etkili Akış Tipi Çizelgeleme Problemleri Literatür Özeti

Çalışma	Akış Tipi Türü	Öğrenme Etkisi Türü	Bozulma Etkisi Türü	Amacı	Çalışmanın Türü	Çözüm Yöntemi
Wang (2007)	Klasik	Pozisyon Bağımlı	Doğrusal	$C_{max}, \sum w_j C_j, T_{max}$	Araştırma, Test	Analitik, Sezgisel
Wang vd. (2008)	Klasik	Pozisyon Bağımlı	Doğrusal, İş Bağımlı	$C_{max}, \sum C_j$	Araştırma, Test	Analitik, Sezgisel
Wang ve Liu (2009)	İki Makineli	Pozisyon Bağımlı	Doğrusal	$\sum C_j$	Test	Analitik, Sezgisel
Yang ve Kuo (2009)	Klasik	Pozisyon Bağımlı İş Bağımlı	Doğrusal	$C_{max}, \sum C_j, TCTD$	Araştırma, Test	Analitik
Wang vd. (2012)	İki Makineli	Pozisyon Bağımlı	Doğrusal	C_{max}	Test	Analitik, Sezgisel
Low ve Lin (2013)	Klasik	Zaman Bağımlı	Oransal Doğrusal	$C_{max}, \sum C_j, \sum w_j C_j$	Araştırma	Analitik
Tyagi vd. (2014)	Esnek	Pozisyon Bağımlı	Doğrusal	C_{max}, T_{max}	Araştırma	Analitik
Seidgar vd. (2015)	Esnek	Pozisyon Bağımlı	Doğrusal	C_{max}, T_{max}	Araştırma, Test	Analitik
Fu vd. (2018)	Klasik	Pozisyon Bağımlı	Oransal Doğrusal	C_{max}	Test	Analitik, Sezgisel
Li vd. (2018)	Beklemesiz	Pozisyon Dayalı Üstel	Pozisyon Dayalı Üstel	$\sum F_j$	Araştırma, Test	Analitik, Meta-Sezgisel
Azadeh vd. (2019)	Esnek	Pozisyon Bağımlı	Oransal Doğrusal	$\sum T_j$	Test, Uygulama	Analitik, Meta-Sezgisel
Fu vd. (2019)	Klasik Akış	Pozisyon Bağımlı	Doğrusal	C_{max}	Test Uygulama	Analitik, Meta-Sezgisel
Kurniawan vd. (2021)	Klasik Akış	Pozisyon Bağımlı	Doğrusal	$\sum C_j$	Araştırma	Analitik
Touafek vd. (2022)	Permütasyon	Zaman Bağımlı	Doğrusal	C_{max}	Test	Analitik, Meta-Sezgisel
Touafek vd. (2023)	Permütasyon	Pozisyon Bağımlı	Doğrusal	C_{max}	Test Uygulama	Analitik, Sezgisel, Meta-Sezgisel
Hatami vd. (2024)	Esnek	Pozisyon Bağımlı	Doğrusal	$C_{max}, \sum T_j, TEC$	Test	Analitik, Meta-Sezgisel
Touafek vd. (2025)	Permütasyon	Zaman Bağımlı	Doğrusal	C_{max}	Test	Meta-Sezgisel

Çalışmanın amacı kategorisinde ise C_{max} ve $\sum C_j$ gibi verimlilik odaklı kriterler sıklıkla tercih edilmiştir. Müşteri odaklı kriterlerden T_{max} ve $\sum T_j$ de bir çok çalışmada ele alınmıştır. Buna karşılık TEC gibi sürdürülebilirlik temelli kriterlerin henüz yeterince incelenmediği anlaşılmaktadır. Bu durum mevcut literatürün ağırlıklı olarak geleneksel verimlilik ve teslim performansı üzerinde şekillendiği çevresel sürdürülebilirliğin gelecek çalışmalar için önemli bir araştırma boşluğuna dikkat çekmektedir.

Yapılan araştırmaların büyük çoğunluğunun “Araştırma” ve “Test” odaklı olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum alandaki çalışmaların ağırlıklı olarak yeni modeller, matematiksel formülasyonlar ve algoritmik çözümler geliştirmeye yönelik teorik nitelikte olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte sınırlı sayıda “Uygulama” kategorisinde de çalışmalar bulunmaktadır. Bu da geliştirilen teorik modellerin gerçek hayat verileri ile sınındığı ve pratik geçerliliklerinin araştırıldığını göstermektedir. Genel olarak literatürdeki çalışmalarının teorik geliştirme aşamasında güçlü olduğu ancak bu modellerin endüstriyel pratiğe aktarımı ve uygulanabilirliğini doğrulayan çalışmaların nispeten daha az olduğu sonucuna varılabilmektedir.

Çalışmalarda en yaygın kullanılan yaklaşımın temel matematiksel modellemeyi ifade eden “Analitik” yöntemler olduğu ve neredeyse tüm çalışmalar bu yöntemi temel olarak problemi yapılandırmıştır. Bununla birlikte problemin NP–zor yapısı gereği özellikle son 10 yılda “Meta-sezgisel” algoritmaların temel çözüm aracı olarak ortaya çıktığı gözlemlenmektedir. “Sezgisel” yöntemler çalışmalarda daha çok hızlı çözüm üreten destekleyici yöntem olarak kullanılmıştır. Sonuç olarak literatürdeki ana yaklaşım problemi önce analitik olarak modelleyip ardından etkin bir şekilde çözmek için sezgisel ve meta-sezgisel yöntemlere başvurmak olarak özetlenebilmektedir.

2.7 Esnek Akış Tipi Çizelgeleme Probleminde Öğrenme ve Bozulma Etkisinin Birlikte Kullanıldığı Çalışmalar

Tyagi vd. (2014)’ün yaptıkları çalışma, esnek akış tipi çizelgeleme problemlerinde öğrenme ve bozulma (unutma) etkisinin birlikte modellendiği öncü çalışma olarak bilinmektedir. Çalışma esnek akış tipinde öğrenme etkisi, bozulma etkisi ve hem sıra bağımlı hem de çalışan bağımlı hazırlık süreleri birlikte dikkate alınarak karma tam sayılı doğrusal programla modeli oluşturulmuş ve C_{max} ve T_{max}

zamanlarının en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Problemden çalışanlara göre farklılaşan ve işlem süreleri üzerinde etkili olan pozisyon tabanlı öğrenme etkisi ve doğrusal bozulma etkisi ele alınmıştır.

Seidgar vd. (2015) esnek akış tipi çizelgelemede öğrenme ve bozulma (unutma) etkileri ve çalışan-sıra bağımlı hazırlık sürelerini içeren karma tam sayılı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir. Model işlerin makinelerle atanması ile birlikte makinelerde hazırlık işlemleri yapan çalışanlara atanan iş sıralarını ve görev rotalarını da optimize etmektedir. Problemin amaç fonksiyonu olarak C_{max} ve T_{max} ağırlıklı toplamının en küçüklenmesidir. Çalışmada geliştirilen matematiksel modelin doğrulanması için iki aşamalı, altı işli ve üç çalışanlı üretim ortamını içeren test problemi oluşturulmuştur. LINGO programında elde edilen çözümlere göre bazı işlerin gecikmesiz bazılarının ise iki birim gecikmeli tamamlandığı görülmüştür. Ayrıca en iyi çözüme ulaşmak için çalışanların aşamalarda sabit olarak atanması yerine iki aşama arasında hareket ederek farklı makinelerde görev alması gerektiği belirtilmiştir.

Azadeh vd. (2019) esnek akış tipi çizelgeleme probleminde öğrenme etkisi, bozulma etkisi ve sıralamaya bağımlı hazırlık sürelerini aynı anda ele alan çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada işlerin işlem sürelerinin pozisyon bağımlı öğrenme etkisi ve doğrusal bozulma etkisi altında değiştiğini ele alan model geliştirmişlerdir. Amaç fonksiyonu olarak $\sum T_j$ minimizasyonu hedeflenmiştir. Ele alınan problemin yapısının stokastik ve karmaşık yapıda olduğunu ve bu nedenle matematiksel model geliştirmenin mümkün olmadığını belirtmişlerdir. Problemin çözümü için bilgisayar simülasyonu, yapay sinir ağı (ANN) ve genetik algoritma (GA) yöntemlerini birleştiren hibrit bir yaklaşım önermişlerdir. Simülasyon modeli sayesinde farklı dağılımlara (normal, üniform, üstsel) sahip işlem ve hazırlık sürelerini dikkate alınarak çözüm uzayı taranması, ANN ile simülasyon modelinden elde edilen çıktılar analiz edilerek optimal çözüme yakın tahminler üretilmesi ve GA yöntemi ile bu tahminleri kullanarak optimal iş sıralaması belirlenmesi hedeflenmiştir. Çalışmada önerilen bu hibrit yöntemin doğruluğunu ve literatürdeki diğer çalışmalar karşısında etkinliğini ölçmek amacıyla sayısal deney çalışmaları yapılmıştır. Deney çalışmalarında her aşamada bozulma oranlarının birbirinden farklı olduğu yirmi işli üç aşamalı esnek akış tipi sistemde işlem ve hazırlık sürelerinin farklı dağılımlardan (normal, üniform, üstsel) olduğu dokuz farklı senaryo oluşturulmuştur. Yapılan deneysel çalışmalar sonucu

önerilen hibrit yöntemin farklı işlem dağılımlarında tutarlı bir performans sergilediği gösterilmiştir. Özellikle işlem sürelerinin normal dağılım olarak kullanıldığı senaryolarda elde edilen sonuçlar çalışmanın amaç fonksiyon değerinde en yüksek iyileşmeyi sağlamış ve sırasıyla üniform ve üstel dağılım sonuçları bu durumu izlemiştir. Bu durum çalışmada kullanılan hibrit yöntemin pratikte uygulanabilirliğini göstermektedir

Hatami vd. (2024) yaptıkları çalışmada öğrenme ve bozulma etkileri altında belirsizlik altında esnek akış tipi çizelgeleme problemini ele almışlardır. Bunun için çok amaçlı bir matematiksel model geliştirmiş ve bu modelde C_{max} , $\sum T_j$ ve TEC minimize edilmeye çalışılmıştır. Problemden işlem süreleri için pozisyon bağımlı öğrenme etkisi ve doğrusal bozulma etkisi türleri kullanılmıştır. Ayrıca problemdeki belirsizliği yönetmek için Bulanık Dayanıklı Optimizasyon (FRO), Mevsimsel Otoregresif Bütünleşik Hareketli Ortalama (SARIMA) ve Destek Vektör Regresyonu (SVR) gibi veri odaklı yöntemler kullanmışlardır. Problemin çözümü için doğrusal programlama (LP) yöntemi ile problemdeki çok amaçlı amaç fonksiyonu tek bir amaç fonksiyonuna dönüştürülmesi ve GA ve tavlama benzetimi (SA) algoritmalarının birlikte kullanımıyla geliştirilen hibrit yaklaşım ile çözüm uzayında çözüm çeşitliliği artırılarak ve yerel optimumlardan kaçınılması, parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ve SA birlikte kullanılması ile geliştirilen hibrit yaklaşım sayesinde ise problemin global arama yeteneğinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Oluşturulan hibrit yöntemlerin doğruluğu ve performanslarını belirlemek amacıyla küçük ve büyük boyutlu problemde test edilmiş ve test sonuçları performans oranı sapması (PRD) ve merkezi işlem birimi (CPU) olmak üzere iki kritere göre değerlendirilmiştir. Küçük ölçekli problemlerde GA-SA hibrit yaklaşımı en iyi çözüm kalitesini sunarken, LP-SA yaklaşımı ise en hızlı algoritma olarak öne çıkmıştır. Büyük ölçekli problemlerde LP-GA-SA hibrit yaklaşımı diğer hibrit yöntemlere göre daha iyi performans göstermiş ve LP-PSO-SA hibritin ise dengeli bir performans gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca çalışmada Öğrenme ve Bozulma etkileri üzerinde Duyarlılık Analizleri çalışması yapılmış ve öğrenme etkisi katsayısının mutlak değeri arttıkça tüm amaç fonksiyon değerlerindeki iyileşme olduğu görülmüştür. Bozulma etkisi katsayısı değerinin artmasıyla tüm amaç fonksiyonlarının olumsuz etkilendiği belirlenmiştir.

3. UYGULAMA

3.1 İşletmenin ve Üretim Sisteminin Tanıtımı

Bu çalışmanın uygulaması beyaz eşya yedek parçaları üreten bir imalat işletmesinde gerçekleştirilmiştir. 1987 yılında kurulan işletme, ülkemizde beyaz eşya sektöründe önde gelen ve uluslararası alanlarda hizmet verebilen üç farklı firmaya beyaz eşya yedek parça tedarik etmektedir. Üretim ortamında 23'ü mavi yaka 2'si ise beyaz yaka toplam 25 personelin çalıştığı firma müşteri memnuniyetini merkeze alan bir anlayışla müşterilerine hizmet vermektedir.

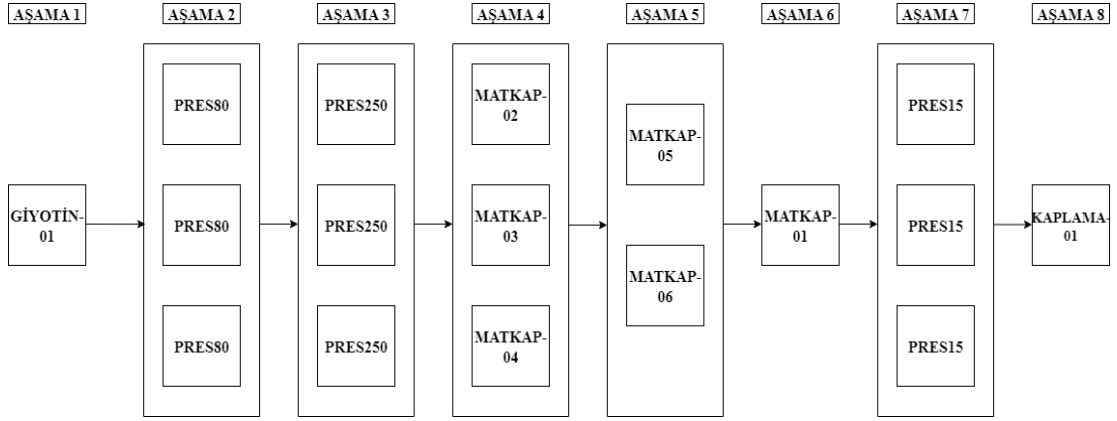
İşletme müşteri ihtiyaçlarına göre buzdolabı metal aksamları (buzdolabı ayağı menteşeleri, destek sacları, panel destek sacları) ve fırın / ocak metal aksamları (ocak bekaşları, pano koruma sacları, çekmece sacları, fırın kapağı menteşeleri) gibi yedek parçalarını müşterilerine özel teknik gereksinimler ve tasarım detayları dikkate alarak üretmektedir.

İşletmede müşteri ihtiyaçlarının dikkate alındığı ürün çeşidi fazla olduğundan üretim sisteminde aynı anda birden fazla ürünün üretimi devam etmektedir. Siparişe göre üretim modeli benimsendiğinden her işin belirli teslim tarihi bulunmakta ve işlerin zamanında tamamlanması kritik önem taşımaktadır. Mevcut durumda çizelgeleme çalışmaları daha önceden yapılan zaman etüdü çalışması ve ustabaşı deneyimleri dikkate alınarak oluşturulmaktadır.

Genel olarak her ürün sac depolama alanından biten ürün stok alanına doğru bir akış izlemektedir. Ürünler üretim sistemimde giyotin kesme, dövme, bükme, çevre kesme, delme, pim sıkma, ayak ezme, kaplama işlemleri görmektedir. Ayrıca ürün özelliklerine göre bazı işler bu aşamaların tamamında işlem görebilmekte fakat bazı ürünlerin üretimi için birkaç aşamaya gereksinim duyulmamaktadır.

Üretim sürecinin aşamaları ve aşamalarda yer alan makinelere ait bilgiler Şekil 3.1'de verilmiştir. Aşama 1'den başlayan süreç, Aşama 8'de sonlanmaktadır.

Aşama 1, Giyotin kesme aşamasıdır ve üretim sürecinde sac metal levhaların ürünlerin teknik özelliklerine uygun olacak şekilde düz ve hassas kesilmesi işlemi sistemde 1 adet giyotin makinesi (GİYOTİN-01) ve 1 adet çalışan tarafından gerçekleştirilmektedir. Çalışanın işlem süresi, işlere göre değişiklik gösterirken, sürelerde öğrenme ya da bozulma etkisi söz konusu değildir.



Şekil 3.1 Üretim Sürecinin Yapısı

Bükme, dövme, çevre kesme, ayak ezme işlemleri yarı otomatik yüksek tonajlı pres makinelerinde yapılmaktadır. Bu makineler Aşama 2, Aşama 3 ve Aşama 7’de yer almaktadır. Genel olarak sac levhaların şekillendirilmesi olarak bilinen bükme ve dövme işlemleri Aşama 2’de yeralan 80 tonluk pres makinelerinde (PRES80) yapılmaktadır. Saç malzemeleri istenilen forma getirme ve parçaların dış konturlarını hassas bir şekilde kesme işlemi olan çevre kesme, Aşama 3’deki 250 tonluk pres makinelerinde (PRES250) ve sac metal levhaların düzleştirilmesi veya şekillendirilmesi olarak bilinen ayak ezme işlemi ise Aşama 7’de yer alan 15 tonluk pres makinelerinde (PRES15) gerçekleştirilmektedir. İşletmede 3 adet 15 tonluk, 3 adet 80 tonluk ve 3 adet 250 tonluk pres makineleri olmak üzere toplam 9 adet pres makinesi ve bu makinelerde çalışan 9 adet çalışan bulunmaktadır. Bu aşamalarda pres makinelerinde hangi işten sonra hangi işin yapılacağına göre değişen hazırlık süreleri vardır. Bu hazırlık süreleri aynı zamanda çalışanlara göre değişirken, bir taraftan da öğrenme etkisi göstermekte yani deneyim kazandıkça bu sürelerde azalma görülmektedir. Preslerde işlem süreleri ise sadece işlere göre değişiklik göstermekte, çalışana ya da öğrenme etkisine bağlı olarak değişmemektedir.

Aşama 4, Aşama 5 ve Aşama 6’da matkap makineleri yer almaktadır. Metal parçalardaki deliklere bağlantı elemanlarının sabitleme işlemi olan pim sıkma işlemi, çalışanlar tarafından gerçekleştiren işlem olup üretim sürecinde Aşama 6’da yer alan sadece 1 çalışan ve 1 matkap makinesi (MATKAP-01) tarafından gerçekleştirilmektedir. Delme, sac metal parçalar üzerinde ürünün teknik özelliklerine

göre delik açma işlemleri işletmede çalışanlar tarafından matkap makinelerinde gerçekleştirilmekte ve sistemde bu işlem için Aşama 4 ve Aşama 5' te yer alan 5 matkap makinesi (MATKAP-02, MATKAP-03, MATKAP-04, MATKAP-05, MATKAP-06) ve 5 adet çalışan bulunmaktadır. Matkap makinelerinin tamamında 6 çalışan yer almakta olup, çalışanlar her aşamada (Aşama 4, Aşama 5 ve Aşama 6) çalışabilme kabiliyetine sahiptir. Fakat çalışanların performansları hangi aşamada çalıştıklarına göre değişkenlik göstermektedir. Bu yüzden bu çalışanların hangi işlerde ve aşamada çalıştıklarına bağlı olarak işin işlem süresi ortaya çıkmaktadır. Ayrıca işlerin işlem süreleri hem çalışanın öğrenmesi hem de yorulma kaynaklı bozulma etkileri ile etkilenmektedir.

Ürünlerin korozyon direncini ve estetik görünümünü iyileştirmek amacıyla kullanılan kaplama işlemi (Aşama 8) işletmede 1 çalışan ve 1 kaplama havuzunda gerçekleştirilmektedir. Bu aşamada işlem süreleri sadece işlere göre değişmektedir ve öğrenme yada bozulma etkisi söz konusu değildir.

Görüldüğü üzere, incelenen problem 8 aşamadan oluşan ve bazı aşamalarda alternatif makinelerin yer aldığı esnek akış tipi üretim sisteminde yer almaktadır. İşlem ve hazırlık süreleri açısından bazı aşamalarda öğrenme ve bozulma etkileri bulunmaktadır. İşlerin makinelere ve işçilere atanması aşamasında, bazı aşamalarda çalışanların performansları farklılaşmaktadır. Bu da problemde ele alınması gereken önemli bir unsurdur.

3.1.1 Çizelgeleme Çalışması Yapılan İşler

İşletmede ürünlerin teknik özelliklerine dikkate alındığında ürün çeşitliliğinin fazla olduğu ve müşteri gruplarının önem dereceleri dikkate alınarak çizelgeleme problemi için 14 adet ürün dikkate alınmıştır. Çizelgeleme problemi için ele alınan ürünler ve ürünlere ait rotalar Tablo 3.1 ile gösterilmektedir. Ürünlerin müşteri sipariş adetleri dikkate alınarak üretimdeki parti büyüklükleri belirlenmektedir. Siparişler, partiler halinde üretilmekte ve bir partideki ürünlerin hepsi o aşamada tamamen tamamlanmadan sonraki aşamaya geçilmemektedir.

Tablo 3.1 Ürünler ve ürünlere ait rotalar ve önem dereceleri

Ürün	Ürünün İzlediği Rota	Ürünün Önem Derecesi
Ürün 1	A1 – A2 – A3 – A4 – A5- A6 – A7	3
Ürün 2	A1 – A2 – A3 – A4 – A5- A6 – A7	3
Ürün 3	A1 – A2 – A3 – A4 – A5- A6 – A7	7
Ürün 4	A1 – A2 – A3 – A4 – A5- A6 – A7	7
Ürün 5	A1 – A2 – A3 – A4 – A5- A6 – A7	7
Ürün 6	A1 – A2 – A3 – A4 – A5- A6 – A7	5
Ürün 7	A1 – A2 – A3 – A4 – A5- A7 – A8	9
Ürün 8	A1 – A2 – A3 – A4 – A5- A7 – A8	6
Ürün 9	A1 – A2 – A3 – A8	9
Ürün 10	A1 – A2 – A3 – A8	10
Ürün 11	A1 – A2 – A3 – A8	9
Ürün 12	A1 – A2 – A3 – A8	9
Ürün 13	A1 – A2 – A3 – A4 – A5- A7 – A8	6
Ürün 14	A1 – A2 – A3 – A4 - A6 – A7	6

3.2 Veri Setlerinin Düzenlenmesi

Çizelgeleme problemine konu olan işlere ait temel işlem süreleri, çalışan ve sıra bağımlı hazırlık süreleri, çalışan bağımlı işlem süreleri, işletmede çalışanlarla yapılan görüşmeler ve işletmede daha önceden yapılmış olan zaman etütleri yardımıyla elde edilmiştir.

3.2.1 İşlem Süreleri

Her bir işin üretim sistemindeki aşamalardaki işlem süreleri, işin karmaşıklığı ve teknik özelliklerine göre farklılık göstermektedir. Çalışmada kullanılacak işlem süreleri; giyotin makinesinde (GİYOTİN-01), pres makinelerinde (PRES15 – PRES80 – PRES250) ve kaplama havuzunda (KAPLAMA-01) işlere göre değişirken işlerin bu aşamalardaki işlem süreleri Tablo 3.2’ de verilmiştir .

Tablo 3.2 İşlerin aşamalarda işlem süreleri (saat)

	A1	A2	A3	A7	A8
Ürün 1	2,09	5,615	3,74	5,67	0
Ürün 2	2,26	6,30	4,39	6,21	0
Ürün 3	7,92	17,72	12,06	10,58	0
Ürün 4	12,47	31,22	26,97	9,67	0
Ürün 5	8	19,58	11,98	10,97	0
Ürün 6	7,62	16,47	14,62	10,37	0
Ürün 7	8,67	17,35	21,92	10,12	1,15
Ürün 8	10,2	17,9	18,57	9,87	1,22
Ürün 9	4,11	17,78	11,36	0	4,35
Ürün 10	5,13	21,87	14,33	0	6,03
Ürün 11	4,19	18,6	12,5	0	4,46
Ürün 12	4,37	18,26	11,82	0	5,60
Ürün 13	8,02	18,52	17,35	8,47	1,15
Ürün 14	1,71	12,28	2,84	5,10	0

Ürünlerin işlem süreleri, matkap makinelerinde hem işe hem de çalışana bağlı (6 çalışan) olarak değişmektedir. Ürünlerin matkap makinelerinin bulunduğu Aşama 4, Aşama 5 ve Aşama 6 için çalışan bağımlı işlem süreleri Tablo 3.3, Tablo 3.4 ve Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.3 Aşama 4'te Çalışan Bağımlı İşlem Süreleri (saat)

	Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü5	Ü6	Ü7	Ü8	Ü13	Ü14
Çalışan 1	4,32	4,40	12,30	12,50	12,40	16,00	10,70	11,10	10,85	12,40
Çalışan 2	4,41	4,65	12,90	15,60	16,00	12,04	15,00	11,80	11,05	9,82
Çalışan 3	3,76	4,05	9,70	12,80	9,80	13,50	9,20	11,40	10,18	9,09
Çalışan 4	3,45	3,97	8,07	11,54	8,80	12,10	9,00	10,00	17,36	8,31
Çalışan 5	3,81	4,02	8,80	9,10	13,23	13,80	9,30	11,20	10,84	9,12
Çalışan 6	3,22	3,79	8,00	9,56	8,10	10,00	9,12	9,00	8,02	7,37

Tablo 3.4 Aşama 5'te Çalışan Bağımlı İşlem Süreleri (saat)

	Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü5	Ü6	Ü7	Ü8	Ü13	Ü14
Çalışan 1	9,60	10,40	32,89	12,30	24,05	26,80	12,40	33,90	35,50	0
Çalışan 2	9,80	10,80	31,75	12,20	23,00	24,80	12,45	30,80	34,00	0
Çalışan 3	9,40	10,70	25,36	10,20	18,70	22,40	10,40	28,80	32,15	0
Çalışan 4	9,40	10,50	23,32	9,39	16,80	19,80	9,20	27,80	29,70	0
Çalışan 5	9,45	10,40	25,42	10,20	19,20	22,20	10,10	29,40	30,80	0
Çalışan 6	9,20	10,70	20,86	7,90	14,90	17,10	8,00	24,80	26,80	0

Tablo 3.5 Aşama 6'da Çalışan Bağımlı İşlem Süreleri (saat)

	Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü5	Ü6	Ü7	Ü8	Ü13	Ü14
Çalışan 1	7,30	6,30	15,30	9,20	14,30	21,40	0	0	0	18,90
Çalışan 2	7,60	6,70	14,50	9,00	14,40	20,70	0	0	0	17,30
Çalışan 3	7,70	6,70	13,80	7,70	11,00	17,60	0	0	0	17,00
Çalışan 4	7,50	6,50	13,30	6,50	9,70	15,40	0	0	0	16,30
Çalışan 5	7,60	6,60	13,10	7,20	11,10	17,20	0	0	0	14,30
Çalışan 6	7,30	6,30	7,70	5,30	9,00	13,30	0	0	0	9,00

3.2.2 Hazırlık Süreleri

İşletmede hazırlık süreleri işlerin pres makineleri tarafından işlem gördüğü yarı otomatik pres makinelerinin bulunduğu Aşama-2 (PRES80), Aşama-3 (PRES250) ve Aşama-7 (PRES15)'de gerçekleşmektedir. Pres makinelerinde hazırlık işlemleri genel olarak makinelerde ürünlere ait kalıpların değişimi, kalıp değişim işlemi öncesi ve sonrası makine bakımı ve temizliği olarak çalışanlar tarafından gerçekleşmektedir. Ayrıca hazırlık süreleri hem önceki ve sonraki işe hem de çalışanlara göre farklılık göstermektedir.

Üretim sisteminde Aşama 2'de özdeş 3 adet PRES80 makinesi ve 3 adet çalışan, Aşama 3'de özdeş 3 adet PRES250 makinesi ve 3 adet çalışan ve Aşama 7'de özdeş 3 adet PRES15 makinesi ve 3 adet çalışan bulunmaktadır. Aşamalardaki makinelerde hız yönünden belirgin farklılık bulunmamaktadır. Hazırlık süreleri saat cinsinden olup çalışan ve sıra bağımlı olarak değişkenlik göstermektedir. Aşama 2'deki Çalışan-2 için sıra bağımlı hazırlık zamanları Tablo 3.6 ile gösterilmektedir.

Üretim sürecinde pres makinelerinin bulunduğu aşamalarda çalışan ve sıra bağımlı hazırlık zamanları EK-1, EK-2, EK-3, EK-4, EK-5, EK-6, EK-7, EK-8'deki tablolarda gösterilmiştir.

Tablo 3.6 Aşama 2'de Çalışan 2 İçin Hazırlık Süreleri (dakika)

	Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü5	Ü6	Ü7	Ü8	Ü9	Ü10	Ü11	Ü12	Ü13	Ü14
Ü1	0	28	40	43	40	44	43	41	40	44	98	106	105	108
Ü2	30	0	43	45	43	41	45	39	43	41	104	109	107	104
Ü3	59	60	0	63	64	60	61	72	74	75	69	72	71	74
Ü4	75	76	75	0	45	48	47	66	69	65	68	70	70	73
Ü5	74	77	77	46	0	49	51	70	69	73	74	71	68	72
Ü6	74	72	78	47	50	0	48	74	72	75	67	66	70	71
Ü7	75	73	80	45	46	49	0	67	71	69	66	68	66	67
Ü8	51	52	48	48	51	47	53	0	39	38	66	67	69	71
Ü9	48	47	49	55	52	51	54	37	0	35	74	69	75	68
Ü10	50	49	51	49	47	48	50	40	39	0	69	72	66	69
Ü11	70	69	58	73	71	72	70	90	90	93	0	42	43	43
Ü12	71	73	55	72	74	70	71	91	91	93	45	0	41	42
Ü13	69	72	59	69	71	74	69	89	89	89	40	43	0	41
Ü14	70	71	56	73	76	75	76	90	90	89	44	42	41	0

3.3 Siparişlerin Çizelgelemede Değerlendirilmesi

İşletme, üretim kaynaklarını verimli kullanmak ve iş yükünü dengelemek amacıyla aldığı ürün siparişlerini tek seferde üretmek yerine uygun parti büyüklüklerine bölmektedir. Bu parti bölme işlemi, her bir ürünün üretim özellikleri, makine kapasitesi ve iş gücü verimliliği dikkate alınarak yapılmaktadır. Partilere ayrılan üretim süreci işletmenin çizelgeleme kararlarının temelini oluşturmaktadır. Ürünlerin teslim tarihleri ise sipariş alındıktan sonra ürünün tüm partilerinin üretimi için gereken toplam işlem süresini esas alınarak belirlenmektedir. Bu nedenle bir siparişe ait tüm partiler aynı anda teslim edilmek zorundadır. Bu durumda tek bir partide yaşanan gecikme, o ürünün tamamının gecikmesi anlamına gelmekte bu da çizelgeleme kararlarında partiler arası senkronizasyon ve zaman yönetiminin kritik önem taşıdığını göstermektedir.

Bunun yanı sıra siparişlerin önem dereceleri birbirinden farklıdır. Bu nedenle işletmenin çizelgeleme sürecinden temel beklentisi siparişlerin teslim tarihlerine mümkün olduğunca uyumlu bir şekilde tamamlanması ve gecikmelerin özellikle önem dereceleri yüksek siparişler açısından minimize edilmesidir. Bu kapsamda çizelgeleme kararları siparişlerin önem derecelerini yansıtan ağırlıkları dikkate alınarak verilmektedir. İşletmenin amacı tüm siparişler için gecikmeleri eşit biçimde azaltmak yerine işletme açısından daha kritik olan siparişlerde oluşabilecek gecikmeleri daha etkin biçimde kontrol altına almaktır. Bu amaca uygun olacak sınırlı üretim kaynaklarının kullanımında zamanının etkin yönetilmesini sağlayan müşteri memnuniyetini ve teslimat performansını artırmayı hedefleyen bir çizelgeleme yaklaşımına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yaklaşım pratikte her bir siparişin önem derecelerini ifade eden ağırlıkları ve gecikmelerini çarparak ağırlıklı toplam gecikmeyi minimize etmeye odaklanan amaç fonksiyonu olarak ifade edilmektedir.

3.3 Matematiksel Modelin Geliştirilmesi

Bu çalışma gerçek bir üretim ortamındaki durumları içeren karmaşık bir çizelgeleme problemini ele almaktadır. Problem, sekiz aşamalı bir esnek akış tipi üretim hattında hem işlerin hem de çalışanların birlikte çizelgelenmesini gerektirmektedir. Üretim sisteminin karmaşıklığı çalışanların farklı iş istasyonlarında görev alabilmesinden ve her istasyon için doğru çalışanın seçilmesi zorunluluğundan kaynaklanmaktadır. Ayrıca ele alınan problemde çalışanların tecrübe kazandıkça verimliliklerinin artması olarak ifade edilen öğrenme etkisi ve zaman geçtikçe oluşan yorgunluk, unutma gibi etkenler nedeniyle verimliliğin düştüğü bozulma etkisi gibi iki gerçek hayat unsuru da dikkate alınmaktadır. Tüm bu karmaşık kısıtlar ve değişken koşullar altında problemin temel performans ölçütü olarak siparişlerin önem derecelerini dikkate alan ağırlıklı toplam gecikmenin en aza indirilmesi esas alınmaktadır.

Literatürde öğrenme veya bozulma etkileri dikkate alınmaksızın esnek akış tipi üretim sistemlerinde ağırlıklı toplam gecikmenin en aza indirilmesi problemi NP- zor problem olarak bilinmektedir. Yang vd. (2000), esnek akış tipi üretim ortamlarında ağırlıklı toplam gecikmenin, hesaplama açısından zor bir yapıda olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu çalışmada ele alınan problem söz konusu bu yapıya ek olarak çalışan atamaları, çok aşamalı üretim yapısı ile öğrenme ve bozulma etkilerini birlikte

içermesi nedeniyle daha da karmaşık hale gelmekte ve bu nedenle NP- zor problem sınıfında yer almaktadır.

Uygulama problemi için geliştirilen matematiksel model, esnek akış tipi çizelgeleme problemi için sıra ve çalışan bağımlı hazırlık zamanları, öğrenme etkisi, bozulma etkisi ile ilgili kısıtlar eklenerek elde edilmiştir. Oluşturulan çizelgeleme problemi $FFc / s_{ijk}, LE, DE / W_j T_j$ olarak ifade edilmektedir. Matematiksel modelin kısıtları işlerin makinelere ve çalışanlara ataması, işlerin sıralanması ve çizelgelenmesini düzenlemektedir. Ele alınan uygulama problemi için toplam ağırlıklı gecikme zamanını $(\sum W_j T_j)$ minimize etmeyi amaçlayan 0-1 karma tamsayılı doğrusal programlama modeli oluşturulmuştur.

3.3.1 Matematiksel Modelin Varsayımları

İşletmenin mevcut durumu ve literatürde esnek akış tipi çizelgeleme problemleri için geliştirilen varsayımlar dikkate alınarak oluşturulan matematiksel model için varsayımlar aşağıda verilmiştir.

- Üretim sisteminde makineler çizelgeleme süreci boyunca her zaman hazırdır ve makine bozulmasının olmadığı kabul edilir.
- İşler çizelgeleme süreci başında hazırdır ve belirlidir. Çizelgeleme sürecinde başka bir iş çizelgelemeye dahil edilmemektedir.
- Her makine aynı anda yalnızca bir işi işleyebilir.
- Her iş aynı anda yalnızca bir makinede işlem görebilir.
- Her çalışan aynı anda bir işi işleyebilir ve yalnızca bir makineye atanabilir.
- İşler kesintiye uğrayamaz. Bir makinede bir işin işlenmesi bitmeden başka bir işi o makinede işlem göremez.
- İşlem süreleri, hazırlık süreleri, teslim süreleri ve rotaları daha önceden bilinmektedir.
- Çalışanların makinelerde hazırlık ve üretim becerileri uzmanlık, yaş, eğitim gibi faktörlere bağlı olarak birbirinden farklı olabilir.
- Üretim sürecinde bulunan işler, makineler ve çalışanların sayısı ve matematiksel modelde kullanılması gereken tüm diğer değerler sabittir ve önceden bilinmektedir.
- Öğrenme ve bozulma etkilerinin var olduğu aşamalarda işlem/hazırlık süreleri bu etkilerden dolayı azalıp, artabilir.

3.3.2 Uygulama Problemi İçin Geliştirilen Matematiksel Model

Matematik modelde kullanılan indisler, setler, parametreler ve karar değişkenleri şu şekildedir:

İndisler:

i, j : İş indisleri

t : Aşama indisi

r : Pozisyon indisi

w : Çalışan indisi

Setler:

J : İş seti $j=1,...,N$

T : Aşama seti $t=1,...,g$

R : Her makinedeki pozisyon seti $r=1,...,N$

L : Çalışan seti $w=1...B$

L_t : t. Aşamadaki çalışan seti

Parametreler:

N : Çizelgelenecek iş sayısı

g : Aşamaların sayısı

B : Çalışanların sayısı

$P_{j,t}$: j işinin t aşamasındaki temel işlem süresi

$PW_{j,t,w}$: j işinin t aşamasında w çalışanı tarafından yapıldığındaki temel işlem süresi

$ST_{i,j,t,w}$: t aşamasında w çalışanın i işinden j işine geçişte makinedeki hazırlık süresi

$STF_{j,w}$: j işinin ilk pozisyona atandığı durumdaki w çalışanın makinedeki hazırlık süresi

d_j : j işinin teslim tarihi

U : Büyük bir pozitif sayı

α : öğrenme katsayısı

β : bozulma (unutma) katsayısı

μ : maksimum öğrenme katsayısı

γ : unutma kontrol katsayısı

W_j : j işinin önem derecesi

A_t : 1, t aşamasında işin süresi çalışana bağlıysa, 0 aksi halde

H_t : 1, t aşamasında makine hazırlık süresi etkiliyse, 0 aksi halde

$AL_{t,w}$: 1, t aşamasında w çalışanı çalışabilirse, 0 aksi halde

Karar Değişkenleri:

$PR_{j,t}$: j işinin t aşamasındaki gerçek işlem süresi

$STR_{i,j,t,w,r}$: t aşamasında w çalışanın r. pozisyonunda i işinden j işine geçişte öğrenme etkili makine hazırlık süresi

T_j : j işinin gecikme süresi

$C_{j,t}$: j işinin t aşamasındaki tamamlanma zamanı

$X_{j,t,w,r}$: 1, Eğer j işi t aşamasında w çalışanın r. pozisyonunda çizelgelenirse, 0 aksi halde

$Y_{t,w}$: 1, Eğer t aşamasında w çalışanı atanırsa, 0 aksi halde

3.3.2.1 Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama Modeli:

Amaç Fonksiyonu

$$1 \quad \text{Min } \sum_{j=1}^N \sum W_j T_j$$

Kısıtlar:

$$2 \quad \sum_{w=1}^B \sum_{r=1}^N X_{j,t,w,r} = 1 \quad \forall t \in T, j \in J: AL_{t,w} = 1$$

$$3 \quad \sum_{j=1}^N X_{j,t,w,r} = 0 \quad \forall t \in T, w \in L, r \in R: AL_{t,w} = 0$$

$$4 \quad \sum_{j=1}^N X_{j,t,w,r} \leq 1 \quad \forall t \in T, w \in L, r \in R$$

$$5 \quad \sum_{j=1}^N X_{j,t,w,r} \leq \sum_{i=1}^N X_{i,t,w,r-1} \quad \forall t \in T, w \in L: AL_{t,w} = 1, r \in R: r > 1$$

$$6 \quad STR_{i,j,t,w,r} = ST_{i,j,t,w} * r^a * U * (2 - X_{i,t,w,r-1} - X_{j,t,w,r})$$

$$\forall i, j \in J: i \neq j, t \in T, w \in L, r \in R: r > 1$$

$$7.1 \quad PR_{j,t} = A_t * \sum_{w=1}^B \sum_{r=1}^N (PW_{j,t,w} * r^a * X_{j,t,w,r}) + (1 - A_t) * (P_{j,t} + H_t \\ * \sum_{w=1}^B \sum_{r=1:r>1}^N \sum_{i=1:i \neq j}^N STR_{i,j,t,w,r} + \sum_{w=1}^B (STF_{j,w} * r^a * X_{j,t,w,1})) \\ \forall j \in J, t \in T$$

7.2

$$\begin{aligned}
PR_{j,t} = A_t * \sum_{w=1}^B \sum_{r=1}^N (PW_{j,t,w} - PW_{j,t,w} * \{1 - (r+1)^a\}^\mu \\
+ \{\gamma * (1 - \beta r + 1) * e^{-\beta r}\} * PW_{j,t,w} * \{1 - (r+1)^a\}^\mu) \\
* X_{j,t,w,r} + (1 - A_t) * (P_{j,t} + H_t \\
* \sum_{w=1}^B \sum_{r=1:r>1}^N \sum_{i=1:i \neq j}^N STR_{i,j,t,w,r} + \sum_{w=1}^B (STF_{j,w} * r^a * X_{j,t,w,1})) \\
\forall j \in J, t \in T
\end{aligned}$$

7.3

$$\begin{aligned}
PR_{j,t} = A_t * \sum_{w=1}^B \sum_{r=1}^N (PW_{j,t,w} - PW_{j,t,w} * (1 - r^a) + \{e^{-\beta r} - 1\} * PW_{j,t,w} * (1 \\
- r^a) * X_{j,t,w,r} + (1 - A_t) * (P_{j,t} + H_t \\
* \sum_{w=1}^B \sum_{r=1:r>1}^N \sum_{i=1:i \neq j}^N STR_{i,j,t,w,r} + \sum_{w=1}^B (STF_{j,w} * r^a * X_{j,t,w,1})) \\
\forall j \in J, t \in T
\end{aligned}$$

7.4

$$\begin{aligned}
PR_{j,t} = A_t * \sum_{w=1}^B \sum_{r=1}^N (PW_{j,t,w} * ((r^a + r^\beta)/2) * X_{j,t,w,r} + (1 - A_t) * (P_{j,t} + H_t \\
* \sum_{w=1}^B \sum_{r=1:r>1}^N \sum_{i=1:i \neq j}^N STR_{i,j,t,w,r} + \sum_{w=1}^B (STF_{j,w} * r^a * X_{j,t,w,1})) \\
\forall j \in J, t \in T
\end{aligned}$$

8

$$C_{j,t} + U (2 - X_{i,t,w,r} - X_{j,t,w,r+1}) \geq C_{i,t} + PR_{j,t}$$

$$\forall i, j \in J, i \neq j, t \in T, w \in L: AL_{t,w} = 1, r \in R: r \leq N - 1,$$

9

$$C_{j,t} \geq PR_{j,t} - U * (1 - X_{j,t,w,1}) \quad \forall j \in J, t \in T, w \in L, AL_{t,w} = 1$$

10

$$C_{j,t} \geq C_{j,t-1} + PR_{j,t} \quad \forall j \in J, t \in T: t > 1$$

11

$$C_{j,1} \geq PR_{j,1} \quad \forall j \in J$$

12

$$\sum_{j=1}^N \sum_{r=1}^N X_{j,t,w,r} \leq n * Y_{t,w} \quad \forall t \in T: t \in \{4, 5, 6\}, w \in L_t$$

13

$$\sum_{j=1}^N \sum_{r=1}^N X_{j,t,w,r} \geq Y_{t,w} \quad \forall t \in T: t \in \{4, 5, 6\}, w \in L_t$$

14

$$\sum_{t=4}^{t=6} Y_{t,w} \leq 1 \quad w \in L: w \geq 8 \& w \leq 13$$

15

$$\sum_{w=8}^{w=13} Y_{4,w} = 3$$

16

$$\sum_{w=8}^{w=13} Y_{5,w} = 2$$

17

$$\sum_{w=8}^{w=13} Y_{6,w} = 1$$

18

$$T_j \geq C_{j,T} - d_j \quad \forall j \in J$$

19

$$C_{j,t} \geq 0 \quad \forall j \in J, t \in T$$

20

$$T_j \geq 0 \quad \forall j \in J$$

21

$$X_{j,t,w,r} \in \{0,1\} \quad \forall j \in J, t \in T, w \in L, r \in R$$

Modelde amaç fonksiyonu (1) işlerin toplam ağırlıklı gecikmesinin en küçüklenmesidir. Kısıt (2) her işin her aşamada sadece bir kez atanmasını, Kısıt (3) çalışan kullanılabilirliği kısıtı olarak uygun olmayan çalışanlara, o aşamalarda atama yapılmamasını sağlamaktadır. Kısıt (4) her aşamadaki her çalışanın her bir pozisyonuna yalnızca bir iş atanmasını ve Kısıt (5) pozisyonların ardışık olarak doldurulmasını sağlayan atama kısıtlarıdır. Kısıt (6)'da öğrenme etkili gerçek hazırlık süreleri ve Kısıt (7)'de öğrenme ve bozulma etkilerinin de dahil olabildiği gerçek işlem süreleri hesaplanmaktadır. Kısıt (8) aynı aşama ve aynı çalışana atanan işler için tamamlanma zamanını, Kısıt (9) her çalışanın ilk pozisyonuna atanan işlerin tamamlanma zamanı ve Kısıt (10) ise her işin ardışık aşamalarda tamamlanma zamanları ile ilgili hesaplama kısıtlarıdır. Kısıt (11) her işin ilk aşamada tamamlanma zamanının, o işin ilk aşamadaki işlem zamanından büyük veya eşit olmasını sağlayan kısıtlardır. Kısıt (12) bir çalışanın Aşama 4, 5 veya 6'ya atanması durumunda o çalışana atanabilecek iş sayısı için bir üst limit oluşturma kısıtı iken Kısıt (13) ise çalışanın Aşama 4, 5 veya 6'ya atanması durumunda o çalışana mutlaka en az bir iş atanması kısıtlarıdır. Kısıt (14) Aşama 4, 5 ve 6'da, 8'den 13'e kadar numaralı çalışanların bu aşamalardan sadece bir tanesinde çalışabilmesini, Kısıt (15) Aşama 4'te sadece 3 çalışanın atanmasını, Kısıt (16) Aşama 5'te sadece 2 çalışanın atanmasını, Kısıt (17) Aşama 6'da sadece 1 çalışanın atanmasını sağlayan probleme özgü kısıtlardır. Kısıt (18) işlerin teslim zamanlarından gecikme miktarlarının hesaplanmasını içeren kısıttır. Kısıt (19) ve Kısıt (20) gecikme zamanı ve tamamlanma zamanının pozitif olmasını ve Kısıt (22) ve Kısıt (23) X ve Y değişkenlerinin 0-1 tam sayı olmasını sağlayan kısıtlardır.

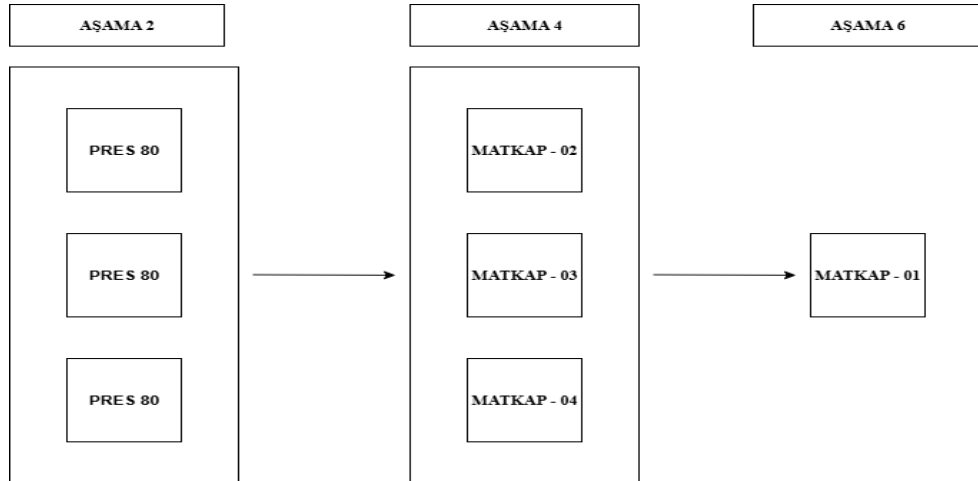
Oluşturulan matematiksel modelde, sadece öğrenme ve öğrenme ile bozulma etkisi altında esnek akış tipi çizelgeleme probleminin, öğrenme ve bozulma etkilerinin farklı parametre değerleri ile gerçek işlem sürelerinin hesaplanmasını sağlayan kısıtlar Kısıt (7.1-7.4) olarak belirtilmiştir. Hangi öğrenme ve bozulma etkisi tipi söz konusu ise, işin gerçek işlem zamanını hesaplanırken o tipe ait eşitlik kullanılacaktır.

Matematiksel modelde sadece öğrenme etkisinin çalışan bağımlı işlem süreleri ve hazırlık sürelerinde etkili olduğu Kısıt (7.1)'de, Biskup (2008) tarafından oluşturulan pozisyon bağımlı öğrenme etkisi, Kısıt (7.2)'de öğrenme ve bozulma

etkilerinin birlikte etkili olduğu Li vd. (2018)'in önerdiği pozisyona dayalı üstel öğrenme ve bozulma etkisi formülasyonu kullanılmıştır. Kısıt (7.3), Li vd. (2018)'in önerdiği modelin problemin yapısına uyarlanarak geliştirilen pozisyon bağımlı öğrenme ve pozisyona dayalı üstel bozulma, öğrenme ile öğrenmenin unutulmasını içeren çalışan bağımlı işlem sürelerini ve öğrenme etkili hazırlık sürelerinin hesaplanmasını içermektedir. Kısıt (7.4)'de, Biskup (2008) tarafından oluşturulan pozisyon bağımlı öğrenme etkisi ve Mosheiov (2005) tarafından geliştirilen pozisyon bağımlı bozulma etkisinin birlikte çalışanların işlem sürelerinde etkili olduğu pozisyon bağımlı öğrenme ve bozulma etkisi kullanılmıştır.

3.4 Farklı Öğrenme ve Bozulma Parametre Kombinasyonları İçin Test Problemleri

Geliştirilen matematiksel modelin doğruluğunu sağlamak ve öğrenme ile bozulma etkisinin problemin yapısına uygunluğunu gerçekçi bir şekilde belirleyebilmek amacıyla sekiz aşamalı ana sisteme ait veri setinden sistemin temel dinamikleri ve kısıtlarını da dikkate alacak şekilde üç aşamalı ve beş aşamalı daha küçük test problemleri türetilmiştir. Bu sayede modelin farklı öğrenme ve bozulma etkileri ve ve oranlarındaki davranışının gözlemlenmesine olanak sağlamıştır.

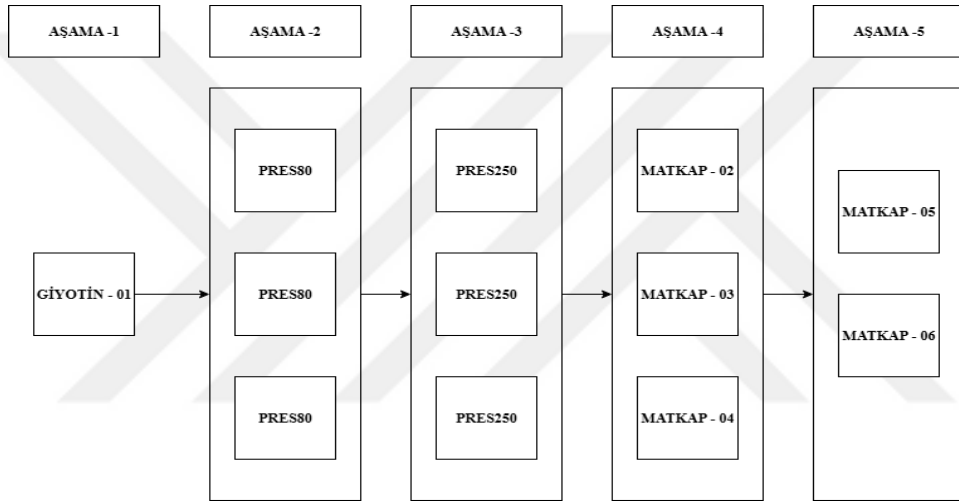


Şekil 3.2 : Üç Aşamalı Sistem Üretim Süreci Yapısı

Üç aşamanın yer aldığı veri setinde ana modelin basitleştirilmiş hali olarak üretim sisteminde aynı işi yapan makineler tek bir grup olarak birleştirecek şekilde tasarlanmıştır. Tasarlanan 3 aşamalı sistem Şekil 3.2'de verilmiştir. Sekiz aşamalı ana

problemde pres makinelerini içeren Aşama 2 bu veri setinde Aşama 1, matkap makinelerinde aynı işi yapan aşamalardan Aşama 4 bu veri setinde Aşama 2 ve matkap makinelerinden farklı türde işleri gerçekleştiren Aşama 6 burda Aşama 3 olarak yer almıştır.

Beş aşamalı model ise sistemde dar boğaz oluşturabilecek ve işlem süreleri diğer aşamalara göre daha fazla olan Aşama 6 ve yine pres makinelerinin bulunduğu aşamalardan Aşama 7'nin yer almadığı üç aşamalı modele göre ana modele daha yakın orta ölçekli sistem olarak oluşturulmuştur. Bu veri setinde aşamalar, 8 aşamalı ana problemin ilk 5 aşamasından oluşmaktadır. Tasarlanan 5 aşamalı sistem Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3 : Beş Aşamalı Sistem Üretim Süreci Yapısı

Çalışmada 14 ürün içeren ana sistemden temsili bir örneklem seçilmiştir. Örneklem seçiminde, birbirinden farklı ürün rotalarına sahip 5 iş içeren 3 farklı test problemi oluşturulmuştur. Oluşturulan test problemleri şu şekilde tanımlanmıştır:

Test Problemi 1 (TP1), farklı rotaları olan ve büyük ölçüde düşük öncelikli Ürün 1, Ürün 5, Ürün 8, Ürün 11, Ürün 13 'ü içermektedir.

Test Problemi 2 (TP2), benzer rotalara sahip ancak farklı önem derecelerindeki Ürün 2, Ürün 6, Ürün 7, Ürün 10, Ürün 12'i kapsamaktadır.

Test Problemi 3 (TP3), yüksek öncelikli ve farklı rotalardaki Ürün 3, Ürün 4 , Ürün 7, Ürün 9, Ürün 12'den oluşmaktadır.

Çalışmada geliştirilen çizelgeleme modeli, öğrenme ve bozulma etkilerinin matematiksel hesaplamaları için literatürdeki çalışmalardan yararlanılarak oluşturulmuştur.

Test problemlerinin çözümü için geliştirilen karmaşık matematiksel modelin optimizasyonu amacıyla IBM ILOG Cplex Studio IDE 22.1.1 programı kullanılmış ve üç farklı test problemi üzerinde kapsamlı analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sayısal analizlerinde model performansının değerlendirilmesi amaç fonksiyonu değeri, matematiksel modelin çözüm süresi ve çözüm kalitesi olmak üzere üç temel kriter üzerinden yapılmıştır. Amaç fonksiyonu değeri, önerilen modelin asıl optimizasyon hedefi olan ağırlıklı toplam gecikme zamanını temsil etmekte olup farklı öğrenme ve bozulma parametre değerlerinin matematiksel modelin sonuç değeri üzerindeki etkisini doğrudan karşılaştırılmasını sağlamaktadır. Çözüm süresi, karmaşık yapıdaki karma tamsayılı doğrusal programlama modelinin, CPLEX çözücüsü kullanılarak optimal çözüme ulaşma süresini ifade etmekte; bu da modelin hesaplanabilirlik ve pratik uygulanabilirlik açısından performansını yansıtmaktadır. Çözüm kalitesi, bulunan en iyi uygulanabilir çözümün değeri (Üst Sınır) ile problemin teorik alt sınırı (Alt Sınır) arasındaki göreceli farkın yüzde olarak ifadesidir ve aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$Alt\ Sınırdan\ \% Sapma = \frac{Üst\ Sınır - Alt\ Sınır}{Alt\ Sınır} \times 100$$

Düşük bir fark yüzdesi, elde edilen çözümün global optimuma yakınlığını göstermektedir. Bu üç kriter bir arada değerlendirilerek, öğrenme ve bozulma etkilerinin hem çizelgeleme performansına hem de modelin çözüm zorluğuna olan etkisi bütüncül bir şekilde analiz edilmiştir.

3.4.1 Pozisyon Bağımlı Öğrenme Etkili EAT İçin Test Problemleri

Bu bölümde Biskup (2008)'un geliştirmiş olduğu işlem sürelerinin pozisyon ilerledikçe azalmasını ifade eden pozisyon bağımlı öğrenme etkisi ve bu öğrenme etkisinin test problemleri üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla farklı öğrenme oranlarına sahip test problemleri oluşturulmuştur.

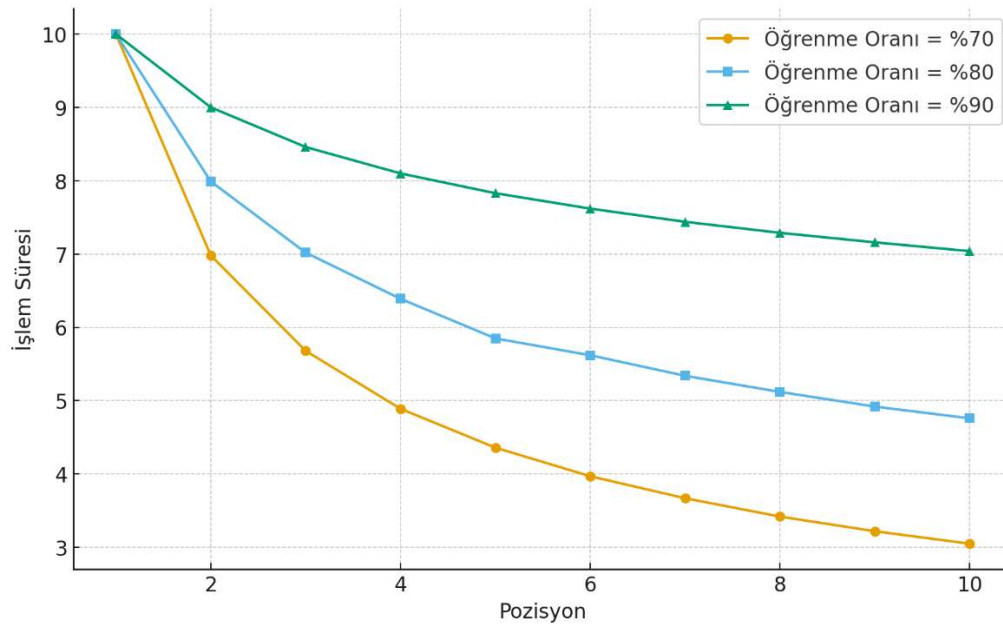
Biskup (2008) pozisyon bağımlı öğrenme etkisini $P_{jr} = P_j . r^a$ olarak ifade ettiği belirtilmiştir. Ayrıca pozisyon bağımlı öğrenme etkisinde işlem sürelerinde azalma üzerinde en kritik faktörlerden biri de öğrenme oranıdır. Bir işin çizelgede daha

geç pozisyonda çizelgelenmesi ve daha yüksek bir öğrenme oranı işlem sürelerinde daha hızlı ve belirgin bir azalma sağlamaktadır.

Örneğin işlem süresi (P_j) 10 dakika olan bir işin üç farklı öğrenme oranı (%70, %80, %90) altında işlem süresinin azalması Tablo 3.7’de ve Şekil 3.4’de gösterilmektedir.

Tablo 3.7 Biskup (2008)’in Pozisyon Bağımlı Öğrenme Etkili İşlem Süreleri

Pozisyon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ö.O = %70	10	6,98	5,68	4,89	4,36	3,97	3,67	3,42	3,22	3,05
Ö.O = %80	10	7,99	7,02	6,39	5,85	5,62	5,34	5,12	4,92	4,76
Ö.O = %90	10	9,001	8,46	8,1	7,83	7,62	7,44	7,29	7,16	7,04



Şekil 3.4 Biskup (2008)’in Pozisyon Bağımlı Öğrenme Oranlarına Göre Değişen İşlem Süreleri

Oluşturulan grafik ve tablo incelendiğinde farklı öğrenme oranlarının işlem süresinin azalması üzerindeki etkisi birbirinden farklıdır. Öğrenme oranı %70 olduğunda işlem süresi pozisyona bağlı olarak hızlı bir şekilde düşmekte ve onuncu pozisyonda 3,05 dakikaya düşmektedir. Bu durum öğrenme etkisinin diğer öğrenme oranlarına göre daha güçlü olduğunu göstermektedir. %80 öğrenme oranında işlem sürelerindeki azalma daha yavaş gerçekleşmiş ve onuncu pozisyonda 4,76 dakikaya düşmüştür. %90 öğrenme oranında öğrenme etkisi en zayıf şekilde görülmektedir. Son pozisyonda sadece 7.04 dakikaya kadar düşmektedir. Dolayısıyla daha düşük

öğrenme oranları daha yüksek öğrenme hızını ve daha fazla verimlilik artışını ifade etmektedir.

3 aşamalı Pozisyon Bağımlı Öğrenme Etkili EAT test problemleri için matematiksel model sonuçları

3 aşamalı sistem için geliştirilen test senaryolarında, öğrenme etkisinin olmadığı durum ve farklı öğrenme oranları için matematiksel model çalıştırılmıştır.

Tablo 3.8’de sunulan test problemleri sonuçları, geliştirilen matematiksel modelin oluşturulan test problemlerinde etkin bir şekilde çalıştığını ve optimal çözümler ürettiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar pozisyon bağımlı öğrenme etkisinin üretim sistemi üzerindeki olumlu etkisini ortaya koymaktadır.

Tablo 3.8 Üç Aşamalı Pozisyon Bağımlı Öğrenme Etkisi İçin Elde Edilen Sonuçlar

Test Problemi	Öğrenme Oranı	Alt Sınır	Amaç Fonksiyon Değeri	Alt Sınırdan Sapma (%)	Model Durumu	Çözüm Süresi (sn)
TP1	Öğrenme Yok	84,19	84,19	0,00	Optimal	4,25
TP1	%90	75,42	75,42	0,00	Optimal	5,16
TP1	%80	66,63	66,63	0,00	Optimal	10,20
TP1	%70	57,88	57,88	0,00	Optimal	3,25
TP2	Öğrenme Yok	419,73	419,73	0,00	Optimal	44,09
TP2	%90	382,45	382,45	0,00	Optimal	104,42
TP2	%80	342,32	342,32	0,00	Optimal	24,30
TP2	%70	307,20	307,20	0,00	Optimal	63,95
TP3	Öğrenme Yok	461,68	461,68	0,00	Optimal	2,33
TP3	%90	437,68	437,68	0,00	Optimal	2,23
TP3	%80	413,67	413,67	0,00	Optimal	2,44
TP3	%70	389,75	389,75	0,00	Optimal	2,05

Amaç fonksiyonu değeri dikkate alınarak oluşturulan performans analizinde, öğrenmenin olmadığı mevcut durumdaki amaç fonksiyon değerlerine göre öğrenme etkisinin tüm oranları tüm test problemlerinde amaç fonksiyon değerinden beklendiği gibi anlamlı düşüşler sağlamıştır. En iyi öğrenme oranı olan % 70'lik öğrenme TP1'de % 31,2'lik, TP2'de % 43,39'luk ve TP3'te % 15,6'lik iyileşme sağlamıştır.

Çözüm sürelerinin dikkate alındığı performans kriterine göre modelin tüm test problemlerinde en fazla 100 saniye civarındaki çözüm süresi nedeniyle kabul edilebilir sürelerde çözüm ürettiği görülmektedir. TP3'te ortalama 2,26 saniyelik çözüm süreleri yüksek öncelikli ve az aşamada işlem gören ürünlerin bulunduğu gerçek zamanlı çizelgeleme çalışmalarında hızlı yanıt alındığı için modelin kullanılabilirliğini desteklemektedir. Bu durum modelin dinamik üretim ortamlarındaki hızlı karar verme gereksinimlerini karşılayabilecek kapasitede olduğunu göstermektedir. TP2'de ürünlerin benzer rotalar izlemesi ve oluşturulan aşamaların tamamına yakını kapsayan işlem süreçlerine sahip olması, modelin bu problemde daha karmaşık kaynak tahsis kararları almasını gerektirmiş ve sonuç olarak test problemleri içinde daha uzun çözüm sürelerine sahip olmasına yol açmıştır. Ancak bu sürelerin üretim sisteminde hala kabul edilebilir aralıkta olduğu belirtilmektedir.

5 aşamalı Pozisyon Bağımlı Öğrenme Etkili EAT test problemleri için matematiksel model sonuçları

Ana sistem modeline göre orta ölçekli düzeyde hazırlanan ve ana sistemdeki problem oluşturan ve tamamlanma zamanlarının artmasına neden olan aşamaların olmadığı beş aşamalı sistemde sistemin mevcut durumu ve farklı öğrenme oranlarının dikkate alındığı test probleminin sonuçları Tablo 3.9'da gösterilmektedir.

Tablo 3.9'da sunulan test problemlerinden elde edilen sonuçlar, geliştirilen matematiksel modelin test problemlerinin büyük çoğunluğunda etkin bir şekilde çalıştığı ve optimal çözümler ürettiğini göstermektedir. Modelin çözüm süresi kısıtı olarak 3600 saniye limit koyulmuştur. Sadece bir problem için bu süre aşılmış ve optimum sonuç elde edilememiştir.

Amaç fonksiyon değerleri dikkate alınarak oluşturulan performans kriterine göre öğrenme etkisi test problemlerinde amaç fonksiyonu değerlerinde önemli düşüşler sağlamıştır. En iyi öğrenme oranı olarak kabul edilen %70'lik öğrenme etkisi, amaç fonksiyon değerlerinde TP1'de %29,15'lik, TP2'de % 35,75'lik ve TP3'de %

11,81'lik bir iyileşme gözlemlenmiştir. Bununla birlikte tüm öğrenme etkisi oranları mevcut durumun amaç fonksiyon değerleri üzerinde iyileştirme meydana getirmiştir.

Tablo 3.9 Beş Aşamalı Pozisyon Bağımlı Öğrenme Etkisi İçin Elde Edilen Sonuçlar

Test Problemi	Öğrenme Oranı	Alt Sınır	Amaç Fonksiyon Değeri	Alt Sınırdan Sapma (%)	Model Durumu	Çözüm Süresi (sn)
TP1	Öğrenme Yok	498,81	498,81	0,00	Optimal	88,39
TP1	%90	455,73	455,73	0,00	Optimal	179,41
TP1	%80	402,21	402,21	0,00	Optimal	112,52
TP1	%70	352,42	352,42	0,00	Optimal	531,98
TP2	Öğrenme Yok	590,88	590,88	0,00	Optimal	674,25
TP2	%90	314,09	518,29	65,01	Geçerli	3600
TP2	%80	449,37	449,37	0,00	Optimal	2440,62
TP2	%70	379,62	379,62	0,00	Optimal	1637,73
TP3	Öğrenme Yok	521,82	521,82	0,00	Optimal	299,78
TP3	%90	499,38	499,38	0,00	Optimal	120,14
TP3	%80	476,96	476,96	0,00	Optimal	133,55
TP3	%70	454,64	454,64	0,00	Optimal	572,33

Çözüm süresinin dikkate alındığı performans kriterinde matematiksel modelin test problemlerinin çoğunda kabul edilebilir sürelerde çözüm ürettiği görülmektedir. TP1 ve TP3'teki çözüm süreleri modelin orta düzey test problemlerinde uygulanabilirliğini göstermektedir. Ancak TP2'de gözlemlenen özellikle %90 öğrenme oranındaki 3600 saniyelik çözüm süresi ve %65,01'lik alt sınırdan sapma yüzdesi modelin bu parametreler altında tam optimal çözüm bulmakta zorlandığını ve problemin karmaşıklığının çözüm sürelerini önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymaktadır. 3 aşamalı sisteme göre, 5 aşamalı sistemin çözüm sürelerinde bariz bir artış görülmektedir. Bu durum problemde aşama sayısı artışından dolayı problemin zorluk derecesinin artmasından kaynaklanmaktadır. Matematiksel modelde aşama sayısı arttığında çözüm sürelerinde genel bir artış eğilimi olduğunu göstermektedir.

Matematiksel modelin çözüm kalitesi incelendiğinde ise sadece bir test problemi (TP-2, %90 öğrenme oranı) dışında tüm test problemlerinde optimum sonuçlar elde edilmiş olup, bu durum modelin yüksek çözüm kalitesi sağladığını kanıtlamaktadır.

3.4.2 Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma Etkili EAT İçin Test Problemleri

Oluşturulan matematiksel modelde öğrenme ve bozulma etkisinin birlikte etkili olduğu gerçek işlem sürelerinin hesaplanmasında kullanılacak ilk kısıt olan Kısıt (7.2) 'de Li vd. (2018) geliştirmiş olduğu öğrenme ve bozulma etkili işlem sürelerinin hesaplanmasına yardımcı olan formülasyon kullanılmıştır.

Li vd. (2018), öğrenmenin ve öğrenilen davranış sonrası elde edilen verimlilik üzerinden bozulmanın (unutma) gerçekleştiğini şu formülle ifade etmişlerdir;

$$PR_{j,t} = A_t * \sum_{w=1}^B \sum_{r=1}^N (PW_{j,t,w} - PW_{j,t,w} * \{1 - (r+1)^a\}^\mu + \{\gamma * (1 - \beta r + 1) * e^{-\beta r}\} * PW_{j,t,w} * \{1 - (r+1)^a\}^\mu * X_{j,t,w,r} + (1 - A_t) * (P_{j,t} + H_t * \sum_{w=1}^B \sum_{r=1:r>1}^N \sum_{i=1:i \neq j}^N STR_{i,j,t,w,r} + \sum_{w=1}^B (STF_{j,w} * r^a * X_{j,t,w,1})))$$

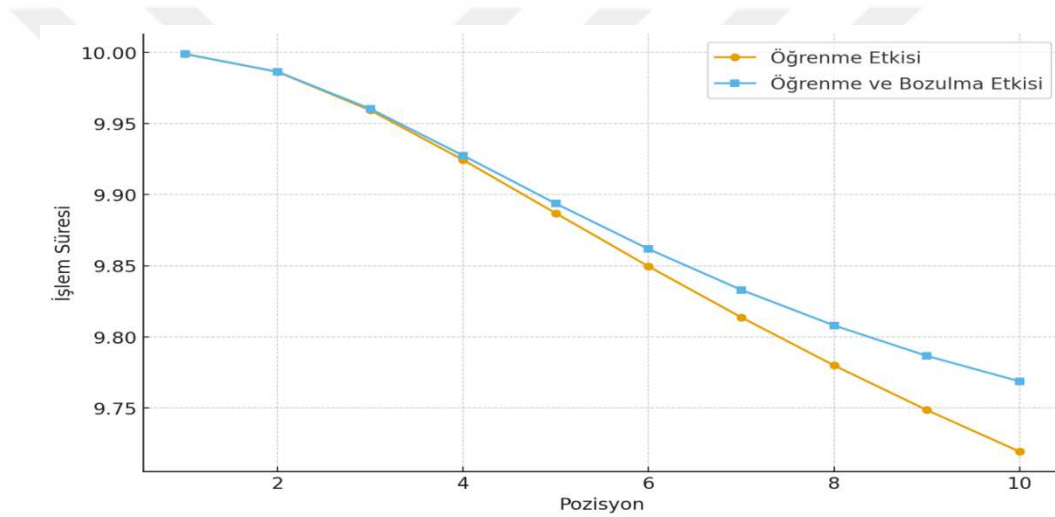
Formülde $PW_{j,t,w} * \{1 - (r+1)^a\}^\mu$ ifadesi Biskup (2008) geliştirmiş olduğu pozisyon bağımlı öğrenme formülünden uyarlanmıştır. Ayrıca öğrenmenin sürekli olmadığı ve belirli düzeyden sonra azalacağını ifade eden maksimum öğrenme katsayısı (μ) işlem sürelerini kontrollü bir şekilde azaltmaktadır. İşlem süresinde öğrenilen miktar kadar üzerinden azalmayı ifade eden bozulma (unutma) etkisi olarak ifade edilmektedir. $\gamma * (1 - \beta r + 1) * e^{-\beta r}$ gösterimi ile üstel bozulma etkisi ve bozulmayı sınırlayan kontrol katsayısı (γ) öğrenme miktarındaki azalma belirli düzeyde hesaplanmaktadır. Ayrıca bu modelde Biskup (2008)'un pozisyon bağımlı öğrenme etkisinde yer alan öğrenme oranının logaritmik olarak bir değer almasından farklı olarak, öğrenme oranı belirli bir hesaplama olmadan kendi değeri ile formülde yer almaktadır. Bu nedenle daha yüksek öğrenme oranları ve daha düşük bozulma oranları daha iyi sonuçlar verecektir.

Örneğin işlem süresi (P_j) 10 dakika ve öğrenme oranının %80 ve bozulma oranının %10 olduğu, maksimum öğrenme kontrol katsayısının 8 ve bozulma

katsayısının 0,677 olduğu bir işin Li vd. (2018) geliştirdiği formülle işlem süresi üzerindeki etkisi Tablo 3.10'da ve Şekil 3.5'te gösterilmektedir.

Tablo 3.10 Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma Etkili İşlem Süreleri

Pozisyon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Öğrenme Etkisi	9,998925	9,9863	9,9593	9,9244	9,8869	9,8495	9,8137	9,7799	9,7485	9,7193
Öğrenme Miktarı	0,00108	0,0136	0,0406	0,1075	0,1130	0,1504	0,1862	0,2200	0,2514	0,2806
Bozulma Miktarı	0,0000036	0,00016	0,001001	0,0031	0,0068	0,012	0,019	0,028	0,038	0,049
Öğrenme ve Bozulma Etkisi	9,998922	9,9864	9,9603	9,9275	9,8937	9,8617	9,8330	9,8080	9,7866	9,7687



Şekil 3.5 Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma Etkili İşlem Süreleri

Oluşturulan tablo ve grafik değerlendirildiğinde sadece öğrenme etkisinin olduğu işlem süreleri ilk pozisyonlarda pozisyon bağımlı öğrenme etkisine göre daha düşük oranda azalmakta ve ilerleyen aşamalarda işlem süresi azalmaya devam etmektedir. Öğrenme ve bozulmanın birlikte etkili olduğunda işlem sürelerinde bozulma miktarı ilk pozisyonlarda daha az olduğu için öğrenme miktarı işlem sürelerinde azalma oluşturmakta ancak ilerleyen pozisyonlarda bozulma miktarı arttığından dolayı azalan işlem sürelerinin artmasına neden olmaktadır.

3 aşamalı Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma etkili EAT test problemi için matematiksel model sonuçları

Tablo 3.11 Üç Aşamalı Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma Etkili EAT Test Problemi için Elde Edilen Sonuçlar

Test Problemi	Parametreler	Alt Sınır	Amaç Fonksiyon Değeri	Alt Sınırdan Sapma (%)	Model Durumu	Çözüm Süresi (sn)
TP1	Öğrenme Yok	84,19	84,19	0,00	Optimal	4,25
TP1	Ö.O =0,70 B.O =0,10	83,55	83,55	0,00	Optimal	107,29
TP1	Ö.O =0,70 B.O =0,20	83,57	83,57	0,00	Optimal	180,02
TP1	Ö.O =0,80 B.O =0,10	82,89	82,89	0,00	Optimal	173,74
TP1	Ö.O =0,80 B.O =0,20	82,93	82,93	0,00	Optimal	198,37
TP1	Ö.O =0,90 B.O =0,10	81,87	81,87	0,00	Optimal	190,06
TP1	Ö.O =0,90 B.O =0,20	81,93	81,93	0,00	Optimal	151,83
TP2	Öğrenme Yok	419,73	419,73	0,00	Optimal	44,09
TP2	Ö.O =0,70 B.O =0,10	415,45	415,45	0,00	Optimal	254,1
TP2	Ö.O =0,70 B.O =0,20	415,52	415,52	0,00	Optimal	983,00
TP2	Ö.O =0,80 B.O =0,10	413,64	413,64	0,00	Optimal	847,70
TP2	Ö.O =0,80 B.O =0,20	413,78	413,78	0,00	Optimal	223,40
TP2	Ö.O =0,90 B.O =0,10	410,31	410,31	0,00	Optimal	1070,20
TP2	Ö.O =0,90 B.O =0,20	410,57	410,57	0,00	Optimal	234,70
TP3	Öğrenme Yok	461,68	461,68	0,00	Optimal	2,33
TP3	Ö.O =0,70 B.O =0,10	455,85	455,85	0,00	Optimal	150,37
TP3	Ö.O =0,70 B.O =0,20	455,89	455,89	0,00	Optimal	212,84
TP3	Ö.O =0,80 B.O =0,10	453,06	453,06	0,00	Optimal	241,19
TP3	Ö.O =0,80 B.O =0,20	453,16	453,16	0,00	Optimal	138,56
TP3	Ö.O =0,90 B.O =0,10	450,02	450,02	0,00	Optimal	269,23
TP3	Ö.O =0,90 B.O =0,20	451,20	451,20	0,00	Optimal	255,68

Öğrenme ve bozulma etkisinin üstel olduğu ve ana sistemin basitleştirilmiş hali olarak oluşturulan 3 aşamalı sistem için farklı öğrenme ve bozulma oranlarının olduğu test problemleri oluşturularak modelin performansı değerlendirilmiştir.

Tablo 3.11, pozisyona dayalı üstel bağımlı öğrenme ve bozulma etkilerinin birlikte etkili olduğu matematiksel modelin üç farklı test problemi üzerindeki performansını kapsamlı şekilde ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar modelin tüm problemlerde optimal çözümler ürettiği ve öğrenme ve bozulma etkileşiminin model performansı üzerinde anlamlı etkileri olduğunu göstermektedir.

Amaç fonksiyon değeri üzerinden oluşturulan performans kriterine göre öğrenme ve bozulma kombinasyonu tüm test problemlerinde amaç fonksiyonu değerlerinde belirgin iyileştirmeler sağlamıştır. Test problemlerinde en iyi amaç fonksiyonu değeri veren parametreler öğrenme oranı için % 90 ve bozulma oranının % 10 olduğu kombinasyon olduğu belirlenmiştir. Bu parametre değerleri TP1’de % 2,77’lik , TP2’de % 2,18 ‘lük ve TP3’de ise 2,52’lik iyileştirmeler sağlamıştır.

Çözüm sürelerinin dikkate alındığı performans kriterine göre matematiksel modelin çözüm sürelerinin test problemlerine ve parametre değerlerine göre önemli farklılıklar gösterdiği gözlemlenmiştir. TP1 ve TP3’de TP2’ye göre düşük çözüm süreleri modelin bu problem yapısındaki ürün kombinasyonunda nispeten daha hızlı çözümler üretebildiğini göstermektedir. TP2’de ise daha yüksek çözüm süreleri problemin yapısal karmaşıklığı ve modelin bu durumda daha kapsamlı kaynak atama optimizasyonu yapmak zorunda kalmasından kaynaklanmaktadır.

Matematiksel modelin çözüm kalitesinin dikkate alındığı performans kriterinde tüm test problemlerinde optimum sonuçlar elde edilmiş olup bu durum modelin bu problem ve öğrenme ile bozulma tipinde yüksek kaliteli çözümler üretebildiğini kanıtlamaktadır.

5 aşamalı Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma etkili EAT test problemi için matematiksel model sonuçları

Ana sisteme daha yakın orta ölçekli (5 aşamalı) oluşturulan, üstel öğrenme ile bozulmanın birlikte etkili olduğu ve farklı öğrenme ve bozulma oranları kombinasyonlarının bulunduğu test problemlerinin sonucu Tablo 3.12’de gösterilmektedir.

Tablo 3.12 Beş Aşamalı Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma Etkili EAT Test Problemi için Elde Edilen Sonuçlar

Test Problemi	Parametreler	Alt Sınır	Amaç Fonksiyon Değeri	Alt Sınırdan Sapma (%)	Model Durumu	Çözüm Süresi (sn)
TP1	Öğrenme Yok	498,81	498,81	0,00	Optimal	88,39
TP1	Ö.O =0,70 B.O =0,10	489,60	489,60	0,00	Optimal	159,50
TP1	Ö.O =0,70 B.O =0,20	489,69	489,69	0,00	Optimal	242,34
TP1	Ö.O =0,80 B.O =0,10	482,32	482,32	0,00	Optimal	1864,12
TP1	Ö.O =0,80 B.O =0,20	489,01	489,01	0,00	Optimal	915,47
TP1	Ö.O =0,90 B.O =0,10	486,41	486,41	0,00	Optimal	363,66
TP1	Ö.O =0,90 B.O =0,20	486,71	486,71	0,00	Optimal	377,91
TP2	Öğrenme Yok	590,88	590,88	0,00	Optimal	674,25
TP2	Ö.O =0,70 B.O =0,10	509,14	580,17	13,95	Geçerli	3600
TP2	Ö.O =0,70 B.O =0,20	580,05	580,05	0,00	Optimal	1685,20
TP2	Ö.O =0,80 B.O =0,10	573,72	573,72	0,00	Optimal	2251,91
TP2	Ö.O =0,80 B.O =0,20	574,35	574,35	0,00	Optimal	942,09
TP2	Ö.O =0,90 B.O =0,10	357,963	564,35	57,66	Geçerli	3600
TP2	Ö.O =0,90 B.O =0,20	366,14	565,25	54,38	Geçerli	3600
TP3	Öğrenme Yok	521,82	521,82	0,00	Optimal	299,78
TP3	Ö.O =0,70 B.O =0,10	512,67	512,67	0,00	Optimal	1621,88
TP3	Ö.O =0,70 B.O =0,20	512,72	512,72	0,00	Optimal	598,80
TP3	Ö.O =0,80 B.O =0,10	513,07	513,07	0,00	Optimal	197,62
TP3	Ö.O =0,80 B.O =0,20	513,16	513,16	0,00	Optimal	345,27
TP3	Ö.O =0,90 B.O =0,10	507,30	507,30	0,00	Optimal	1025,06
TP3	Ö.O =0,90 B.O =0,20	512,40	512,40	0,00	Optimal	209,02

Tablo 3.12’den elde edilen sonuçlara göre üç test probleminde de öğrenme ve bozulma etkisinin olmadığı sonuçlar referans alındığında öğrenme ve bozulma etkisi parametrelerinin eklenmesi ile amaç fonksiyonu değerlerinde iyileşmeler sağlandığı gözlemlenmiştir.

Test problemleri sonuçlarına göre en iyi öğrenme ve bozulma etkisi kombinasyonunun öğrenme etkisinin %90 ve bozulma etkisinin %10 olduğu belirlenmiştir. Bu kombinasyonda TP1’de %3,3, TP2’de %4,5 ve TP3 ‘de ise %2,8 oranında iyileşme elde edilmiştir. Bu durum Li vd. (2018) tarafından oluşturulan pozisyona dayalı üstel öğrenme ve bozulma etkili formülasyonun yapısı gereği öğrenme ve bozulma etkisi üzerinde bulunan sınırlayıcı katsayılar nedeniyle iyileşme oranlarının Biskup (2008)’in önerdiği pozisyon bağımlı öğrenme etkisine göre daha sınırlı fakat tutarlı olduğunu belirtmektedir.

Çözüm kalitesi açısından tüm test problemleri sonuçları birlikte incelendiğinde matematiksel modelin çoğunlukla tutarlı ve güvenilir sonuçlar verdiğini göstermektedir. Parametre değerlerine bağlı olarak alt sınırdan sapma yüzdesinin bazı problemlerde yüksek düzeyde olduğu gözlemlense de modelin test problemlerinin büyük bir bölümünde optimal çözümler üretmesi çözüm uzayının etkin bir biçimde tarandığını ve modelin bu tür test problemlerinin çoğunda etkin sonuçlar verdiğini göstermektedir. Ancak 3600 saniye (1 saat) sınırına ulaşan Test Problemi 2 için ise kesin optimal çözüme ulaşılmadığı fakat bulunan çözümün geçerli olduğu belirtilmektedir.

3.4.3 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma Etkili EAT İçin Test Problemleri

Geliştirilen matematiksel modelde öğrenme ve bozulma etkisinin birlikte etkili olduğu gerçek işlem sürelerinin hesaplanmasında kullanılacak olan Li vd. (2018) geliştirmiş olduğu öğrenme ve bozulma etkili işlem sürelerinin hesaplanmasına

$$\begin{aligned}
 PR_{j,t} = & A_t * \sum_{w=1}^B \sum_{r=1}^N (PW_{j,t,w} - PW_{j,t,w} * (1 - r^a) + \{e^{-\beta r} - 1\} * PW_{j,t,w} * (1 - r^a) * X_{j,t,w,r} \\
 & + (1 - A_t) * (P_{j,t} + H_t * \sum_{w=1}^B \sum_{r=1:r>1}^N \sum_{i=1:i \neq j}^N STR_{i,j,t,w,r} \\
 & + \sum_{w=1}^B (STF_{j,w} * r^a * X_{j,t,w,1}))
 \end{aligned}$$

yardımcı olan formülasyonun problemin yapısına uygun olacak şekilde uyarlanması ile Kısıt (7.3) oluşturulmuştur.

Oluşturulan formülasyonda; Li vd. (2018) farklı olarak öğrenme etkisi ve bozulma etkisini kontrol eden parametreler yer almamıştır. Bu sayede pozisyon ilerledikçe oluşan öğrenme miktarı ve üstel bozulma etkisi nedeniyle azalan öğrenme miktarı arasındaki değişim daha net gözlemlenmiştir. Ayrıca bu formülasyonun problemin de konusu olan gerçek üretim ortamını daha iyi yansıttığı düşünülmektedir.

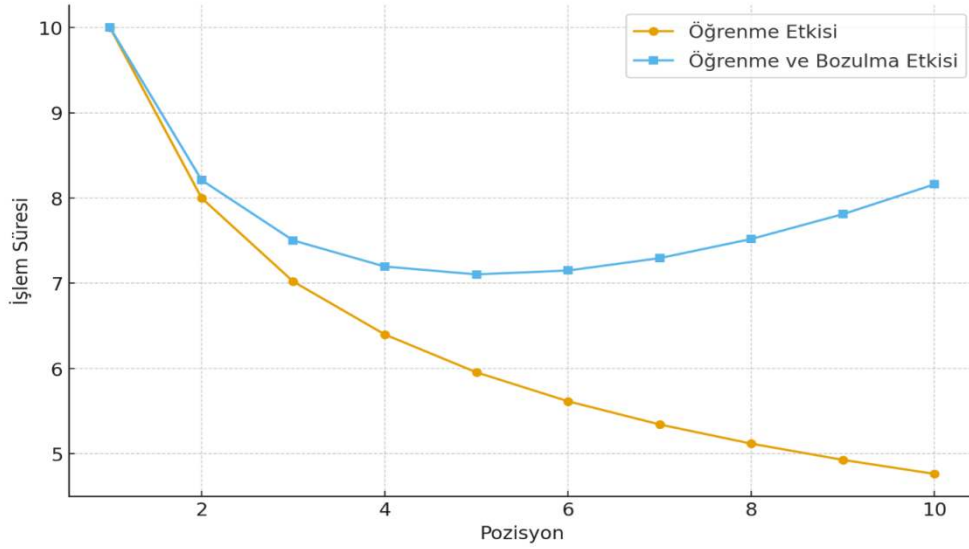
Çalışanlarda gün içinde meydana gelen yorgunluğun işin daha geç pozisyonlarda yapılması ile birleşmesi sonucu kazanılan öğrenme miktarının bozulma etkisi ile belirgin şekilde azaldığı belirlenmiştir. Pozisyonun ilerlemesiyle birlikte bozulma etkisinin öğrenme miktarını önemli düzeyde düşürmesi işlem sürelerinde artışa yol açmaktadır.

Örneğin işlem süresi (P_j) 10 dakika ve öğrenme oranının %80 ve bozulma oranının %0,05 olduğu bir işin uyarlanan formülle işlem süresi üzerindeki etkisi Tablo 3.13 ve Şekil 3.6 ile gösterilmektedir.

Tablo 3.13 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma Etkili İşlem Süreleri

Pozisyon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Öğrenme Etkisi	10	7,9996	7,0204	6,3993	5,9556	5,6161	5,3441	5,1192	4,9287	4,7643
Öğrenme Miktarı	0	2,0004	2,9795	3,6006	4,0443	4,3838	4,6558	4,8807	5,0712	5,2356
Bozulma Miktarı	0	0,2104	0,4821	0,7971	1,1486	1,5337	1,9511	2,4004	2,8820	3,3965
Öğrenme ve Bozulma	10	8,2099	7,5026	7,1965	7,1043	7,14984	7,2952	7,5197	7,8107	8,1608

Oluşturulan tablo ve grafik birlikte incelendiğinde modelde sadece öğrenme etkisi olduğunda işlem sürelerinde pozisyon arttıkça azalma meydana gelmektedir. Ancak öğrenme ile bozulma birlikte ele alındığında işlem sürelerinde ilk pozisyonlarda azalma oluşmakta ancak bozulma miktarının ilerleyen pozisyonlarda artması sonucu işlem sürelerinde azalma durumundan artma durumuna geçtiği görülmektedir.



Şekil 3.6 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma Etkili İşlem Süreleri

3 aşamalı Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma EAT test problemi için matematiksel model sonuçları

Mevcut sistemin basitleştirilmiş hali olan 3 aşamalı veri setinde öğrenmenin pozisyon bağımlı ve bozulmanın üstel olduğu aynı zamanda farklı öğrenme ve bozulma oranları kombinasyonlarının bulunduğu test problemleri sonuçları Tablo 3.14’de gösterilmektedir.

Tablo 3.14’te verilen sonuçlar incelendiğinde test problemlerinde öğrenme ve bozulma etkisinin olmadığı amaç fonksiyon değerlerine göre öğrenme ve bozulma etkisinin birlikte etkili olmasıyla kayda değer bir iyileşme sağlandığı gözlemlenmiştir. Kısıt (7.3) kullanıldığı matematiksel modelde en iyi parametre değerlerinin beklendiği gibi öğrenme oranının %70 ve bozulma oranının ise %10 olduğu kombinasyonda gerçekleşmiştir. Bu durum amaç fonksiyon değerleri üzerinden TP1’de %24,3’lük, TP2’de %21,05 ve TP3’te ise %12,32’lik bir iyileşme sağlanmıştır.

Test problemlerinin sonuçlarına çözüm süresi açısından bakıldığında öğrenme ve bozulma etkilerinin modele dahil edilmesiyle birlikte çözüm sürelerinde genel bir artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. TP2 diğer test problemlerine göre daha zor yapıda olduğu ve modelin kaynak tahsisi kararları daha fazla olduğu için çözüm süreleri TP1 ve TP3’e göre daha uzundur.

Tablo 3.14 Üç Aşamalı Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma EAT Test Problemi için Elde Edilen Sonuçlar

Test Problemi	Parametreler	Alt Sınır	Amaç Fonksiyon Değeri	Alt Sınırdan Sapma (%)	Model Durumu	Çözüm Süresi (sn)
TP1	Öğrenme Yok	84,19	84,19	0,00	Optimal	4,25
TP1	Ö.O =0,70 B.O =0,10	63,71	63,71	0,00	Optimal	17,71
TP1	Ö.O =0,70 B.O =0,20	70,82	70,82	0,00	Optimal	14,95
TP1	Ö.O =0,80 B.O =0,10	70,52	70,52	0,00	Optimal	14,90
TP1	Ö.O =0,80 B.O =0,20	75,27	75,27	0,00	Optimal	16,25
TP1	Ö.O =0,90 B.O =0,10	77,36	77,36	0,00	Optimal	13,28
TP1	Ö.O =0,90 B.O =0,20	79,73	79,73	0,00	Optimal	14,25
TP2	Öğrenme Yok	419,73	419,73	0,00	Optimal	44,09
TP2	Ö.O =0,70 B.O =0,10	331,38	331,38	0,00	Optimal	316,39
TP2	Ö.O =0,70 B.O =0,20	360,25	360,25	0,00	Optimal	169,97
TP2	Ö.O =0,80 B.O =0,10	359,73	359,73	0,00	Optimal	2960,27
TP2	Ö.O =0,80 B.O =0,20	380,99	380,99	0,00	Optimal	264,71
TP2	Ö.O =0,90 B.O =0,10	391,15	391,15	0,00	Optimal	787,42
TP2	Ö.O =0,90 B.O =0,20	401,78	401,78	0,00	Optimal	682,08
TP3	Öğrenme Yok	461,68	461,68	0,00	Optimal	2,33
TP3	Ö.O =0,70 B.O =0,10	404,82	404,82	0,00	Optimal	11,51
TP3	Ö.O =0,70 B.O =0,20	423,22	423,22	0,00	Optimal	15,62
TP3	Ö.O =0,80 B.O =0,10	423,73	423,73	0,00	Optimal	25,08
TP3	Ö.O =0,80 B.O =0,20	436,01	436,01	0,00	Optimal	89,53
TP3	Ö.O =0,90 B.O =0,10	442,71	442,71	0,00	Optimal	68,03
TP3	Ö.O =0,90 B.O =0,20	448,85	448,85	0,00	Optimal	52,56

Çözüm kalitesi açısından ise tüm test problemleri ve parametre kombinasyonları için matematiksel model optimum çözümler üretmiştir. 3 aşamalı EAT sistemi nispeten küçük bir problem seti olduğu için, önerilen matematiksel modelin optimum çözümünü elde etmek mümkün olmaktadır.

5 aşamalı Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Üstel Bozulma EAT test problemi için matematiksel model sonuçları

Mevcut sisteme daha yakın olan orta ölçekli 5 aşamalı sistem için farklı öğrenme ve bozulma kombinasyonlarını içeren test problemlerinin sonuçları Tablo 3.15’de verilmiştir.

Tablo 3.15’te verilen test sonuçlarına göre öğrenme ve bozulma etkilerinin model üzerinde etkili olmasıyla amaç fonksiyon değerlerinde iyileşmelerin olduğu belirlenmiştir. Test problemlerinde en iyi parametre değerlerinin öğrenme etkisinin en yüksek değeri olan % 70 ve bozulma oranının ise en düşük değeri %10 olan kombinasyon olduğunda amaç fonksiyon değerleri belirgin şekilde beklendiği gibi düşmektedir. Amaç fonksiyon değerlerinde TP1’de %21’lik, TP2’de %27’lik ve TP3’te %10’luk iyileşmeler sağlanmaktadır. Ayrıca düşük öğrenme ve yüksek bozulma değerlerinde bile öğrenme ve bozulma etkisinin olmadığı duruma kıyasla iyileşme gözlemlenmiştir.

Test problemleri sonuçları çözüm süresi açısından incelendiğinde ise problemlerin çoğunda model kabul edilebilir süreler içerisinde optimum sonuçlar vermiştir. Sadece öğrenme oranının %90 ve bozulma oranının %10 olduğu kombinasyonda çözüm süresi maksimum sınır olan 3600 saniyede durmuş ve çözüm yalnızca geçerli olarak kabul edilmiştir. Bu test probleminin bu öğrenme ve bozulma kombinasyonunda alt sınırdan sapma yüzdesi % 32,15 olarak elde edilmiştir. Bu durum modelin bu parametre kombinasyonunda zorlandığı ve çözümün optimalden uzak kaldığını ortaya koymaktadır. Bu sonuç dışında diğer 20 sonuçta, amaç fonksiyonu değeri olarak optimum değerler elde edilmiştir.

Tablo 3.15 Beş Aşamalı Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma EAT Test Problemi için Elde Edilen Sonuçları

Test Problemi	Parametreler	Alt Sınır	Amaç Fonksiyon Değeri	Alt Sınırdan Sapma (%)	Model Durumu	Çözüm Süresi (sn)
TP1	Öğrenme Yok	498,81	498,81	0,00	Optimal	88,39
TP1	Ö.O =0,70 B.O =0,10	394,29	394,29	0,00	Optimal	687,53
TP1	Ö.O =0,70 B.O =0,20	429,59	429,59	0,00	Optimal	129,19
TP1	Ö.O =0,80 B.O =0,10	430,41	430,41	0,00	Optimal	200,88
TP1	Ö.O =0,80 B.O =0,20	452,78	452,78	0,00	Optimal	274,05
TP1	Ö.O =0,90 B.O =0,10	464,88	464,88	0,00	Optimal	132,55
TP1	Ö.O =0,90 B.O =0,20	476,07	476,07	0,00	Optimal	175,09
TP2	Öğrenme Yok	590,88	590,88	0,00	Optimal	674,25
TP2	Ö.O =0,70 B.O =0,10	434,15	434,15	0,00	Optimal	3244,14
TP2	Ö.O =0,70 B.O =0,20	499,99	499,99	0,00	Optimal	2550,22
TP2	Ö.O =0,80 B.O =0,10	485,42	485,42	0,00	Optimal	2460,89
TP2	Ö.O =0,80 B.O =0,20	530,85	530,85	0,00	Optimal	2456,45
TP2	Ö.O =0,90 B.O =0,10	405,82	536,31	32,15	Geçerli	3600
TP2	Ö.O =0,90 B.O =0,20	583,83	583,83	0,00	Optimal	3214,70
TP3	Öğrenme Yok	521,82	521,82	0,00	Optimal	299,78
TP3	Ö.O =0,70 B.O =0,10	467,90	467,90	0,00	Optimal	1276,86
TP3	Ö.O =0,70 B.O =0,20	484,11	484,11	0,00	Optimal	193,92
TP3	Ö.O =0,80 B.O =0,10	485,81	485,81	0,00	Optimal	466,58
TP3	Ö.O =0,80 B.O =0,20	496,63	496,63	0,00	Optimal	257,19
TP3	Ö.O =0,90 B.O =0,10	503,81	503,81	0,00	Optimal	1540,28
TP3	Ö.O =0,90 B.O =0,20	512,40	512,40	0,00	Optimal	209,02

3.4.4 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma Etkili EAT İçin Test Problemleri

Oluşturulan matematiksel modelde, hem öğrenme hem de bozulma etkilerinin pozisyon bağımlı olarak birlikte etkili olduğu gerçek işlem sürelerinin hesaplanması için geliştirilen formülasyon problemin yapısına uygun olacak şekilde uyarlanmış ve Kısıt (7.4) oluşturulmuştur. Buna göre, bir işin gerçek işlem süresi; aşağıdaki formülasyonla hesaplanmaktadır.

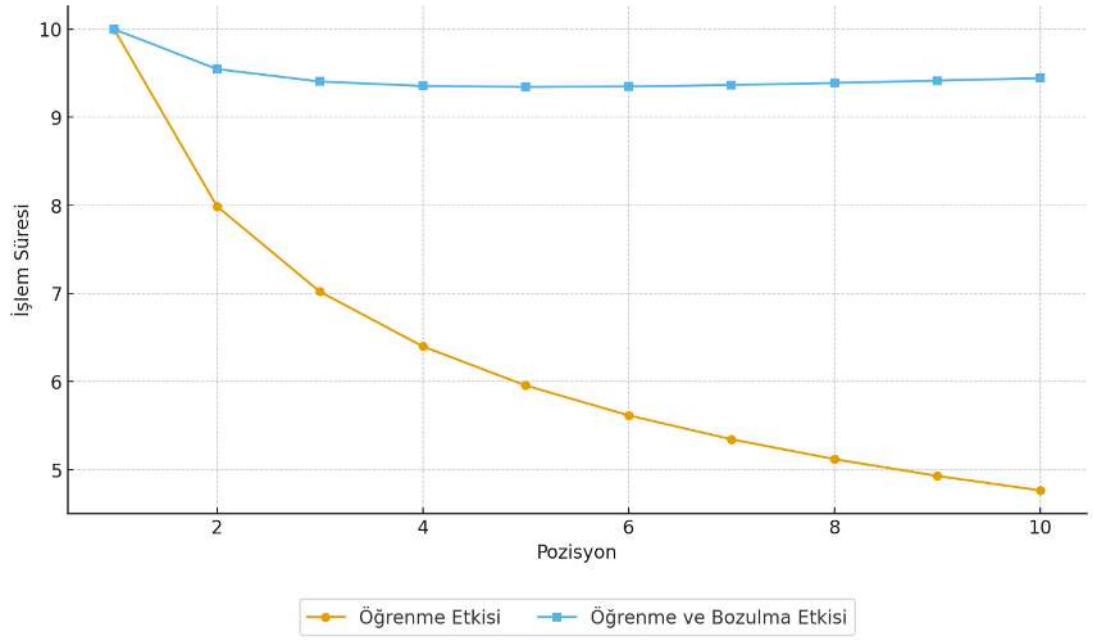
$$PR_{j,t} = A_t * \sum_{w=1}^B \sum_{r=1}^N (PW_{j,t,w} * ((r^a + r^b)/2) * X_{j,t,w,r}) + (1 - A_t)(P_{j,t} + H_t \\ * \sum_{w=1}^B \sum_{r=1:r>1}^N \sum_{i=1:i \neq j}^N STR_{i,j,t,w,r} + \sum_{w=1}^B (STF_{j,w} * r^a * X_{j,t,w,1}))$$

Bu formülasyonda öğrenme ve bozulma etkileri, her ikisi de pozisyon bağımlı olarak modele dahil edilmiş, ancak birbirine zıt etkiler oluşturmaları nedeniyle birlikte ele alınmıştır. Öğrenme etkisi pozisyon ilerledikçe işlem sürelerinde azalma meydana getirirken, bozulma etkisi ise pozisyon ilerledikçe işlem sürelerinde artışa neden olmaktadır. Formülasyonda bu iki zıt etki işlem süresi üzerinde ortalama bir değer olarak etkisini göstermekte ve böylece gerçekçi üretim ortamlarında gözlemlenen dinamik süre davranışı matematiksel olarak yansıtılmaktadır.

Örneğin işlem süresi (P_j) 10 dakika ve öğrenme oranının %80 ve bozulma oranının %10 olduğu bir işin uyarlanan formülle işlem süresi üzerindeki etkisi Tablo 3.16'da ve Şekil 3.7'de gösterilmektedir.

Tablo 3.16 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma Etkili İşlem Süreleri

Pozisyon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Öğrenme Etkisi	10	7,99	7,02	6,39	5,95	5,61	5,34	5,11	4,92	4,76
Bozulma Etkisi	10	11,09	11,79	12,31	12,73	13,08	13,38	13,66	13,90	14,12
Öğrenme ve Bozulma Etkisi	10	9,54	9,40	9,35	9,34	9,34	9,36	9,38	9,41	9,44



Şekil 3.7 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma Etkili İşlem Süreleri

Oluşturulan tablo ve grafik birlikte incelendiğinde yalnızca öğrenme etkisi altında sürelerin sürekli azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Ancak öğrenme ve bozulmanın birlikte modellendiği durumda ise işlem süreleri, ilk pozisyonlarda öğrenmenin etkisiyle düşmekte belirli bir noktadan sonra ise bozulmanın artan etkisiyle tekrar yükselişe geçmektedir. Bu durum insan davranışlarının dinamik yapısını doğrudan yansıtmakta ve geliştirilen formülasyonun gerçek üretim ortamlarını daha doğru ve güvenilir biçimde yansıtmak için bir bakış açısı sunduğu düşünülmektedir.

3 aşamalı Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma EAT test problemi için matematiksel model sonuçları

Mevcut sistemin basitleştirilmiş hali olan 3 aşamalı test problemlerinde pozisyon bağımlı öğrenme ve pozisyon bağımlı bozulma etkilerinin birlikte ele alındığı ve farklı öğrenme ve bozulma oranları kombinasyonlarının değerlendirildiği test problemleri sonuçları Tablo 3.17’de gösterilmektedir.

Tablo 3.17 Üç Aşamalı Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma EAT Test Problemi için Elde Edilen Sonuçlar

Test Problemi	Parametreler	Alt Sınır	Amaç Fonksiyon Değeri	Alt Sınırdan Sapma (%)	Model Durumu	Çözüm Süresi (sn)
TP1	Öğrenme Yok	84,19	84,19	0,00	Optimal	4,25
TP1	Ö.O =0,70 B.O =0,10	74,19	74,19	0,00	Optimal	17,85
TP1	Ö.O =0,70 B.O =0,20	77,57	77,57	0,00	Optimal	15,23
TP1	Ö.O =0,80 B.O =0,10	78,56	78,56	0,00	Optimal	8,75
TP1	Ö.O =0,80 B.O =0,20	81,94	81,94	0,00	Optimal	17,20
TP1	Ö.O =0,90 B.O =0,10	82,95	82,95	0,00	Optimal	9,170
TP1	Ö.O =0,90 B.O =0,20	86,33	86,33	0,00	Optimal	11,39
TP2	Öğrenme Yok	419,73	419,73	0,00	Optimal	44,09
TP2	Ö.O =0,70 B.O =0,10	375,32	375,32	0,00	Optimal	100,21
TP2	Ö.O =0,70 B.O =0,20	390,43	390,43	0,00	Optimal	184,94
TP2	Ö.O =0,80 B.O =0,10	395,74	395,74	0,00	Optimal	183,31
TP2	Ö.O =0,80 B.O =0,20	409,88	409,88	0,00	Optimal	222,77
TP2	Ö.O =0,90 B.O =0,10	414,74	414,74	0,00	Optimal	198,72
TP2	Ö.O =0,90 B.O =0,20	426,97	426,97	0,00	Optimal	115,82
TP3	Öğrenme Yok	461,68	461,68	0,00	Optimal	2,33
TP3	Ö.O =0,70 B.O =0,10	431,93	431,93	0,00	Optimal	23,86
TP3	Ö.O =0,70 B.O =0,20	440,67	440,67	0,00	Optimal	36,44
TP3	Ö.O =0,80 B.O =0,10	444,54	444,54	0,00	Optimal	35,17
TP3	Ö.O =0,80 B.O =0,20	453,27	453,27	0,00	Optimal	20,45
TP3	Ö.O =0,90 B.O =0,10	457,18	457,18	0,00	Optimal	18,58
TP3	Ö.O =0,90 B.O =0,20	465,92	465,92	0,00	Optimal	34,96

Tablo 3.17'deki sonuçlar değerlendirildiğinde amaç fonksiyon değerleri açısından öğrenme ve bozulma etkilerinin modele dahil edilmesi mevcut duruma kıyasla amaç fonksiyon değerlerinde genel bir iyileşme sağlamıştır. Özellikle düşük öğrenme oranları ve düşük bozulma oranları üç test probleminde de daha düşük amaç fonksiyon değerleri üretmiştir. Ayrıca bu modelde en iyi parametre kombinasyonu öğrenme etkisi oranının %70 ve bozulma oranının %10 olduğu belirlenmiştir. Bu durum TP1 'de % 11,9'luk, TP2'de %10,6'lık ve TP3'te ise %6,4'lük iyileşme sağlamıştır.

Çözüm süresine göre değerlendirildiğinde öğrenme ve bozulma etkilerinin modele dahil edilmesi ve parametre kombinasyonlarının çözüm uzayını karmaşıktırması nedeniyle çözüm süreleri yükselmektedir. Ancak bu artışa rağmen çözüm sürelerinin kabul edilebilir seviyelerde kaldığı ve matematiksel modelin küçük aşamalı test problemlerindeki etkili performansını ortaya koymaktadır.

Çözüm kalitesi bakımından ise tüm test problemlerinde modelin optimum çözüme ulaşması geliştirilen matematiksel modelin kararlı ve güvenilir olduğunu göstermektedir. Genel olarak model farklı parametre kombinasyonları altında dahi yüksek çözüm kalitesini korumaktadır.

5 aşamalı Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma EAT test problemi için matematiksel model sonuçları

Mevcut sisteme daha yakın bir yapıya sahip olan orta ölçekli 5 aşamalı sistem için, pozisyon bağımlı öğrenme ve pozisyon bağımlı bozulma etkilerinin birlikte değerlendirildiği farklı öğrenme ve bozulma oranı kombinasyonlarını içeren test problemlerinin sonuçları Tablo 3.18'de gösterilmektedir.

Tablo 3.18'den elde edilen sonuçlar incelendiğinde test problemlerinde amaç fonksiyon değerlerinde belirgin iyileşmeler sağlandığı belirlenmiştir. TP1 için amaç fonksiyon değerinde % 10,7 , TP3 için ise %5,8 oranında iyileşme elde edilmiştir. Bu iyileşmelerin öğrenme oranının % 70 ve bozulma oranının % 10 olduğu parametre kombinasyonlarında gerçekleştiği belirlenmiştir. Öğrenme etkisi değerinin yüksek, bozulma etkisi değerinin düşük olduğu bu kombinasyon amaç fonksiyon değeri üzerinde öğrenmenin bozulma etkisine kıyasla daha baskın olduğu bu sayede anlamlı biçimde azalmalarının meydana gelmesini açıklamaktadır.

Tablo 3.18 Beş Aşamalı Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma EAT Test Problemi için Elde Edilen Sonuçlar

Test Problemi	Parametreler	Alt Sınır	Amaç Fonksiyon Değeri	Alt Sınırdan Sapma (%)	Model Durumu	Çözüm Süresi (sn)
TP1	Öğrenme Yok	498,81	498,81	0,00	Optimal	88,39
TP1	Ö.O =0,70 B.O =0,10	445,45	445,45	0,00	Optimal	105,92
TP1	Ö.O =0,70 B.O =0,20	461,36	461,36	0,00	Optimal	114,09
TP1	Ö.O =0,80 B.O =0,10	468,30	468,30	0,00	Optimal	3360,53
TP1	Ö.O =0,80 B.O =0,20	484,20	484,20	0,00	Optimal	80,23
TP1	Ö.O =0,90 B.O =0,10	491,25	491,25	0,00	Optimal	102,23
TP1	Ö.O =0,90 B.O =0,20	507,15	507,15	0,00	Optimal	2729,92
TP2	Öğrenme Yok	590,88	590,88	0,00	Optimal	674,25
TP2	Ö.O =0,70 B.O =0,10	317,42	508,74	60,27	Geçerli	3600
TP2	Ö.O =0,70 B.O =0,20	534,30	534,30	0,00	Optimal	478,73
TP2	Ö.O =0,80 B.O =0,10	445,17	541,70	21,68	Geçerli	3600
TP2	Ö.O =0,80 B.O =0,20	358,00	568,63	58,83	Geçerli	3600
TP2	Ö.O =0,90 B.O =0,10	364,89	578,46	58,53	Geçerli	3600
TP2	Ö.O =0,90 B.O =0,20	393,5828	598,3025	52,01	Geçerli	3600
TP3	Öğrenme Yok	521,82	521,82	0,00	Optimal	299,78
TP3	Ö.O =0,70 B.O =0,10	491,77	491,77	0,00	Optimal	456,19
TP3	Ö.O =0,70 B.O =0,20	499,46	499,46	0,00	Optimal	379,12
TP3	Ö.O =0,80 B.O =0,10	504,13	504,13	0,00	Optimal	106,12
TP3	Ö.O =0,80 B.O =0,20	511,81	511,81	0,00	Optimal	134,86
TP3	Ö.O =0,90 B.O =0,10	516,55	516,55	0,00	Optimal	112,80
TP3	Ö.O =0,90 B.O =0,20	524,24	524,24	0,00	Optimal	75,72

Buna karşılık öğrenme oranının %90 ve bozulma oranının %20 olduğu kombinasyonlarda Kısıt (7.4) 'ün formülasyonu gereği yaklaşık %5 oranında ek bir bozulma oluşmakta ve bu durum öğrenmenin olmadığı mevcut duruma kıyasla amaç fonksiyon değerinin artmasına neden olmaktadır.

Test problemi sonuçları çözüm süresi açısından incelendiğinde öğrenme ve bozulma etkisinin modele dahil edilmesiyle çözüm sürelerini genel olarak artırdığı belirlenmiştir. Özellikle TP2' de öğrenme ve bozulma içeren tüm durumlar (bir durum hariç) 3600 saniyelik zaman dilimine ulaşmış ve çözüm süresi keşilmiştir. Bu durum öğrenme ve bozulmanın çözüm uzayını karmaşıktırarak çözüm elde etme performansını ciddi şekilde azalttığının göstermektedir.

Çözüm kalitesi açısından TP1 ve TP3 için tüm durumlarda optimal çözüme ulaşıldığı ve alt sınırdan sapmanın sıfır olduğu görülmektedir. Bu durum söz konusu problemlerde çözüm kalitesinin yüksek ve güvenilir olduğu anlamına gelmektedir. Ancak TP2'de ise bir durum hariç diğer tüm kombinasyonlarda maksimum zaman limitinde yalnızca geçerli çözümler elde edilebilmiştir. Dahası bu geçerli çözümlerin alt sınır sapsmaları %21 ve %60 arasında değişmekte bu da bulunan çözümlerin optimal çözümden uzak ve dolayısıyla kalite açısından zayıf olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak öğrenme ve bozulma etkileri özellikle TP2 gibi karmaşık problemlerde çözüm kalitesinde ciddi bir düşüşe yol açmaktadır.

3.5 Farklı İş Sayıları İçin Test Problemleri

Bu bölümde, sabit öğrenme ve bozulma parametreleri altında iş sayısının artırılmasının model performansına etkisi incelenmiştir. Bu amaçla önceki bölümdeki gibi üç aşama ve beş aşamalı modeller kullanılmış, ancak iş sayısı 5'ten 7'ye çıkarılarak daha büyük ölçekli test problemleri oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuş ve problem ölçeği büyüdükçe çözüm süresi, amaç fonksiyonu değeri ve çözüm kalitesindeki değişim analiz edilmiştir. Bu çalışma modelin ölçeklenebilirliğini değerlendirmek ve gerçek üretim ortamlarına daha yakın durumlardaki davranışını belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada kullanılan 14 ürünlü ana sistemin temsili bir örneğini oluşturmak amacıyla farklı ürün rotalarına sahip işlerden oluşan test problemleri tasarlanmıştır. Bölüm 3.4'te sunulan 5 iş içeren 3 test probleminin sonuçları, bu bölümdeki karşılaştırmalı analiz için doğrudan kullanılmıştır.

Daha sonra modelin ölçeklenebilirliğini ve daha karmaşık durumlardaki davranışını incelemek için test problemleri genişletilmiştir. Bu amaçla benzer ürün rotası çeşitliliğini koruyacak şekilde iş sayısı 7'ye çıkarılarak yeni test problemleri oluşturulmuştur. Bu genişletilmiş problem seti, daha fazla işin planlanması gereken gerçek üretim ortamlarına daha yakın bir yapı sunmakta ve modelin artan problem büyüklüğü karşısındaki performansının daha kapsamlı bir analizine olanak tanımaktadır.

Yedi iş olduğu test problemleri şu şekilde;

Test Problemi 4 (TP4), çoğunlukla orta düzeyde önem derecelerine ve farklı ürün rotalarına sahip Ürün 1 , Ürün 3, Ürün 6 ,Ürün 8 , Ürün 10, Ürün 11 , Ürün 14'ten

Test Problemi 5 (TP5), çoğunlukla yüksek düzeyde önem derecelerine sahip Ürün 2 , Ürün 4, Ürün 5, Ürün 7 , Ürün 9, Ürün 12 , Ürün 13'ten,

Test Problemi 6 (TP6) ise benzer ürün rotalarına sahip ve çoğunlukla orta düzeyde önem derecelerine sahip Ürün 1 , Ürün 4, Ürün 5, Ürün 7, Ürün 10, Ürün 13, Ürün 14'ten oluşturulmuştur.

3.5.1 Farklı İş Sayıları İçin Pozisyon Bağımlı Öğrenme Etkili EAT İçin Test Problemleri

Bu bölümde, Biskup (2008) tarafından önerilen pozisyon bağımlı öğrenme etkisi modeli temel alınarak, bu etkinin farklı iş sayıları içeren test problemleri üzerindeki performansı incelenmiştir. Analizlerde, literatürde yaygın olarak kabul gören %80 öğrenme oranı kullanılmış ve bu oran ile oluşturulan test problemlerinin sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

3 aşamalı Farklı İş Sayıları İçin Pozisyon Bağımlı Öğrenme Etkili EAT test problemleri için matematiksel model sonuçları

Üç aşamadan oluşan test problemleri için, hem öğrenme etkisinin olmadığı durum hem de %80 öğrenme oranı ile farklı iş sayıları (5 iş ve 7 iş) kullanılarak geliştirilen matematiksel modeller uygulanmış ve test edilmiştir. Sonuçlar Tablo 3.19'da verilmiştir.

Tablo 3.19 Üç Aşamalı Farklı İş Sayıları İçin Pozisyon Bağımlı Öğrenme Etkili EAT Test Problemi için Elde Edilen Sonuçlar

Test Problemi	İş Sayısı	Öğrenme Oranı	Alt Sınır	Amaç Fonksiyon Değeri	Alt Sınırdan Sapma (%)	Model Durumu	Çözüm Süresi (sn)
TP1	5	Yok	84,19	84,19	0,00	Optimal	4,25
TP1	5	%80	66,63	66,63	0,00	Optimal	10,20
TP4	7	Yok	252,58	252,58	0,00	Optimal	192,56
TP4	7	%80	114,09	114,09	0,00	Optimal	2184,25
TP2	5	Yok	419,73	419,73	0,00	Optimal	44,09
TP2	5	%80	342,32	342,32	0,00	Optimal	24,03
TP5	7	Yok	741,05	741,05	0,00	Optimal	248,76
TP5	7	%80	350,94	529,09	50,76	Geçerli	3.600
TP3	5	Yok	461,68	461,68	0,00	Optimal	2,33
TP3	5	%80	413,67	413,67	0,00	Optimal	2,44
TP6	7	Yok	825,78	825,78	0,00	Optimal	279,50
TP6	7	%80	473,16	473,16	0,00	Optimal	1482,91

Tablo 3.19’da verilen sonuçlara göre iş sayısındaki artış, modelin optimal çözüme ulaşma süresini belirgin bir şekilde artırmaktadır. Özellikle 7 işli öğrenme etkisinin dahil olduğu test problemlerinde bu süreler çok fazla artış göstermekte ve zaman zaman maksimum çözüm sınırlarına ulaşmaktadır. Çözüm kalitesi açısından bakıldığında ise iş sayısı arttıkça oldukça küçük sayılabilecek 3 aşamalı EAT için bile optimal çözüm garantisi azalmaktadır. Örneğin, TP5’de yüksek sapma yüzdesine sahip geçerli bir çözüm elde edilmiştir. Bu durum iş sayısı ve problemin zorluğu arttıkça modelin kesin çözüm sonuçlarının uygulanabilirliğinin sınırlandığı ve özellikle öğrenme etkisinin modelin zorluğunu daha da artırdığını ortaya koymaktadır.

5 aşamalı Farklı İş Sayıları İçin Pozisyon Bağımlı Öğrenme Etkili EAT test problemleri için matematiksel model sonuçları

Ana sistem modeline daha yakın olan beş aşamalı test problemleri pozisyon bağımlı öğrenme etkisi için öğrenmenin olmadığı durum ve %80 öğrenme oranı olmak üzere matematiksel model geliştirilmiş ve sonuçları Tablo 3.20’de değerlendirilmiştir.

Tablo 3.20 Beş Aşamalı Farklı İş Sayıları İçin Pozisyon Bağımlı Öğrenme Etkili EAT Test Problemi için Elde Edilen Sonuçlar

Test Problemi	İş Sayısı	Öğrenme Oranı	Alt Sınır	Amaç Fonksiyon Değeri	Alt Sınırdan Sapma (%)	Model Durumu	Çözüm Süresi (sn)
TP1	5	Yok	498,81	498,81	0,00	Optimal	88,39
TP1	5	%80	402,21	402,21	0,00	Optimal	112,52
TP4	7	Yok	294,66	792,59	168,98	Geçerli	3600
TP4	7	%80	186,20	700,05	275,97	Geçerli	3600
TP2	5	Yok	590,88	590,88	0,00	Optimal	674,25
TP2	5	%80	449,37	449,37	0,00	Optimal	2440,62
TP5	7	Yok	136,85	903,91	560,51	Geçerli	3600
TP5	7	%80	95,05	566,96	496,48	Geçerli	3600
TP3	5	Yok	521,82	521,82	0,00	Optimal	299,78
TP3	5	%80	476,96	476,96	0,00	Optimal	133,55
TP6	7	Yok	342,32	933,63	172,74	Geçerli	3600
TP6	7	%80	45,66	642,48	1.307,09	Geçerli	3600

Test problemlerinin sonuçları incelendiğinde 5 işli test problemlerinde çözümler genel olarak hem çözüm süresi hem de kalite açısından başarılıdır. Öğrenme etkisinin modele dahil edilmesiyle çözüm süreleri uzamış fakat optimal çözümler üretilebilmiştir. İş sayısının 7’ye çıkması ile çözüm süreleri önemli ölçüde artmakta ve modelden maksimum süre içerisinde optimum sonuç elde etmek mümkün

olmamaktadır. Optimum sonuç elde edilemese bile, optimuma yakın sonuçlar elde edilmek istenir fakat, model sonuçlarının 7 işli problemlerde yüksek sapma yüzdeleri ile değer üretebildiğini göstermektedir. Bu durum problem boyutu büyüdükçe matematiksel modelin çözüm bulmakta zorlandığı ve iş sayısı arttıkça ve öğrenme etkisi gibi parametreler eklendiğinde çözüm süresinin arttığı ve çözüm kalitesinin düştüğünü gözlemlenmiştir.

3.5.2 Farklı İş Sayıları İçin Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma Etkili EAT İçin Test Problemleri

Bu bölümde Li vd. (2018) tarafından oluşturulan pozisyona dayalı üstel öğrenme ve bozulma etkili formülasyon temel alınarak, bu iki etkinin birlikte farklı iş sayıları içeren test problemleri üzerindeki performansı incelenmiştir. Test problemlerinde öğrenme ve bozulma etkisinin bulunmadığı sonuçlar ve bu formülasyon için bu iki etkinin literatürde yaygın kombinasyonu olan öğrenme oranı % 80 ve bozulma oranı % 10 kullanılmıştır.

3 aşamalı Farklı İş Sayıları İçin Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma Etkili EAT test problemleri için matematiksel model sonuçları

Üç aşamalı test problemleri üzerinde, hem öğrenme ve bozulma etkilerinin bulunmadığı temel durum, hem de %80 öğrenme oranı ve %10 bozulma oranı şeklinde sabitlenmiş parametrelerle, farklı iş sayılarına (5 iş ve 7 iş) sahip test problemleri için matematiksel model uygulanmış ve test problemi sonuçları Tablo 3.21’de verilmiştir.

Tablo 3.21’de verilen sonuçlar değerlendirildiğinde öğrenme ve bozulma modellerinin matematiksel modele dahil edilmesiyle amaç fonksiyon değerlerinde beklendiği gibi belirgin iyileştirmeler görülmektedir. Fakat, çözüm sürelerinde artış söz konusudur. Özellikle iş sayısının artması ile birlikte çözüm süreleri 7 işli problemlerde oldukça artmış ve tanımlanan üst süre limitine yaklaşmıştır.

Çözüm kalitesi açısından matematiksel model, 5 işli gibi küçük ölçekli problemlerde optimal çözümleri kabul edilebilir süreler içerisinde elde edebilmektedir. Ancak iş sayısı 7’ye çıktığında çözüm kalitesinde belirgin bir düşüş gözlemlenmiştir. Özellikle TP2 gibi karmaşık ve zor problemlerde çözüm süresi limiti içerisinde optimal çözüm elde edilemediği için alt sınırdan sapma yüzdesi %51,08’lik bir geçerli çözüm elde edilebilmiştir. İş sayısı artışının çözüm kalitesindeki negatif etkisi, bu öğrenme ve bozulma türünün yer aldığı problemlerde de devam etmektedir.

Tablo 3.21 Üç Aşamalı Farklı İş Sayıları İçin Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma Etkili EAT Test Problemi için Elde Edilen Sonuçlar

Test Problemi	İş Sayısı	Parametreler	Alt Sınır	Amaç Fonksiyon Değeri	Alt Sınırdan Sapma (%)	Model Durumu	Çözüm Süresi (sn)
TP1	5	Yok	84,19	84,19	0,00	Optimal	4,25
TP1	5	Ö.O =0,80 B.O =0,10	82,89	82,89	0,00	Optimal	173,74
TP4	7	Yok	252,58	252,58	0,00	Optimal	192,56
TP4	7	Ö.O =0,80 B.O =0,10	194,17	194,17	0,00	Optimal	2042,19
TP2	5	Yok	419,73	419,73	0,00	Optimal	44,09
TP2	5	Ö.O =0,80 B.O =0,10	413,64	413,64	0,00	Optimal	847,70
TP5	7	Yok	741,05	741,05	0,00	Optimal	248,76
TP5	7	Ö.O =0,80 B.O =0,10	470,54	710,93	51,08	Geçerli	3600
TP3	5	Yok	461,68	461,68	0,00	Optimal	2,33
TP3	5	Ö.O =0,80 B.O =0,10	453,06	453,06	0,00	Optimal	241,19
TP6	7	Yok	825,78	825,78	0,00	Optimal	279,50
TP6	7	Ö.O =0,80 B.O =0,10	752,94	752,94	0,00	Optimal	2027,92

5 aşamalı Farklı İş Sayıları İçin Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma Etkili EAT test problemleri için matematiksel model sonuçları

Beş aşamalı test problemleri kapsamında iki temel durum üzerinde test problemi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. İlk durumda öğrenme ve bozulma etkilerinin bulunmadığı mevcut durum ele alınırken; ikinci durumda ise %80 öğrenme oranı ve %10 bozulma oranı olarak sabitlenmiş parametreler kullanılmıştır. Her iki durumda da 5 iş ve 7 iş olmak üzere farklı iş sayılarına sahip test problemlerine uygulanmış ve matematiksel modelin performansı karşılaştırmalı olarak Tablo 3.22’de verilmiştir.

Tablo 3.22 Beş Aşamalı Farklı İş Sayıları İçin Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma Etkili EAT Test Problemi için Elde Edilen Sonuçlar

Test Problemi	İş Sayısı	Parametreler	Alt Sınır	Amaç Fonksiyon Değeri	Alt Sınırdan Sapma (%)	Model Durumu	Çözüm Süresi (sn)
TP1	5	Yok	498,81	498,81	0,00	Optimal	88,39
TP1	5	Ö.O =0,80 B.O =0,10	482,32	482,32	0,00	Optimal	1864,12
TP4	7	Yok	294,66	792,59	168,98	Geçerli	3600
TP4	7	Ö.O =0,80 B.O =0,10	210,94	728,25	245,24	Geçerli	3600
TP2	5	Yok	590,88	590,88	0,00	Optimal	674,25
TP2	5	Ö.O =0,80 B.O =0,10	573,72	573,72	0,00	Geçerli	2251,91
TP5	7	Yok	136,32	903,91	563,08	Geçerli	3600
TP5	7	Ö.O =0,80 B.O =0,10	153,46	850,93	454,49	Geçerli	3600
TP3	5	Yok	521,82	521,82	0,00	Optimal	299,78
TP3	5	Ö.O =0,80 B.O =0,10	513,07	513,07	0,00	Optimal	197,62
TP6	7	Yok	342,32	933,63	172,74	Geçerli	3600
TP6	7	Ö.O =0,80 B.O =0,10	362,64	880,11	142,69	Geçerli	3600

Tablo 3.22'deki test sonuçları incelendiğinde, 5 işli test problemlerinde çözüm sürelerinin genellikle kısa olduğu görülmektedir. Çoğunda optimum sonuç elde edilmiş olması, modelin küçük boyutlu problemlerde oldukça iyi performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Ancak iş sayısının 7'ye çıktığında bu durum değişmektedir. Çözüm süreleri maksimum süre limitine takılmakta ve alt sınırdan sapma yüzdesi değerleri de oldukça yüksek kalmaktadır. Bu durum matematiksel modelin büyük iş sayısında hem çözüm süresinde hem de çözüm kalitesinde düşüşe yol açmaktadır. Çözüm kalitesini etkileyen bir diğer faktörün de artan aşama sayısı olduğunun vurgulanması gerekir.

3.5.3 Farklı İş Sayıları İçin Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma Etkili EAT İçin Test Problemleri

Bu bölümde Li vd. (2018) tarafından oluşturulan pozisyona dayalı üstel öğrenme ve bozulma etkili formülasyona uygun olacak şekilde geliştirilen pozisyon bağımlı öğrenme ve pozisyona dayalı üstel bozulma etkili yeni bir formülasyon için farklı iş sayıları içeren test problemlerinin sonuçları değerlendirilmiştir. Test problemleri için parametre değerleri öğrenme etkisi oranı için %80 ve bozulma oranı için %10 kullanılmıştır.

3 aşamalı Farklı İş Sayıları İçin Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma Etkili EAT test problemleri için matematiksel model sonuçları

Üç aşamalı test problemleri kapsamında, hem öğrenme ve bozulma etkilerinin bulunmadığı temel durum, hem de % 80 öğrenme oranı ve %10 bozulma oranı şeklinde sabitlenmiş parametrelerle farklı iş sayılarına (5 iş ve 7 iş) sahip test problemleri için matematiksel model uygulanmış ve sonuçlar Tablo 3.23’de verilmiştir.

Tablo 3.23’teki sonuçlar değerlendirildiğinde daha önce de karşılaştığımız gibi iş sayısındaki artış hem çözüm sürelerinde önemli değişimlere neden olmuştur. 5 işli problemlerde çözüm süreleri nispeten kısa ve kabul edilebilir düzeydeyken iş sayısı 7’ye çıktığında çözüm süreleri belirgin şekilde uzamış özellikle TP2’de zaman sınırına ulaşmıştır. Çözüm kalitesi açısından da sadece 7 işli TP5 probleminde optimum sonuç elde edilememiş olup, %56,32’lik alt sınırdan sapma değeri ile sonuçlanmıştır.

Modelin, Tablo 3.23’deki problemde optimum sonuca ulaşması ve sadece bir problemde verilen süre limiti içerisinde geçerli bir sonuç elde etmesi, 3 aşamalı küçük EAT sistemlerdeki bu öğrenme ve bozulma türünün dahil olduğu problemlerde oldukça etkili sonuçların kabul edilebilir süreler içerisinde ulaşılabilceğini göstermektedir.

5 aşamalı Farklı İş Sayıları İçin Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma Etkili EAT test problemleri için matematiksel model sonuçları

Beş aşamalı test problemleri üzerinde iki farklı durum analiz edilmiştir. İlk durumda öğrenme ve bozulma etkilerinin olmadığı mevcut durum temel alınırken; ikinci durumda ise % 80 öğrenme oranı ve % 10 bozulma oranı olarak sabitlenmiş parametreler kullanılmıştır. Her iki durumda da 5 iş ve 7 iş şeklinde farklı iş sayılarına

sahip test problemlerine uygulanmış ve matematiksel modelin performansı karşılaştırmalı olarak Tablo 3.24'te verilmiştir.

Tablo 3.23 Üç Aşamalı Farklı İş Sayıları İçin Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma Etkili EAT Test Problemi için Elde Edilen Sonuçlar

Test Problemi	İş Sayısı	Parametreler	Alt Sınır	Amaç Fonksiyon Değeri	Alt Sınırdan Sapma (%)	Model Durumu	Çözüm Süresi (sn)
TP1	5	Yok	84,19	84,19	0,00	Optimal	4,25
TP1	5	Ö.O =0,80 B.O =0,10	70,52	70,52	0,00	Optimal	14,90
TP4	7	Yok	252,58	252,58	0,00	Optimal	192,56
TP4	7	Ö.O =0,80 B.O =0,10	137,50	137,50	0,00	Optimal	131,75
TP2	5	Yok	419,73	419,73	0,00	Optimal	44,09
TP2	5	Ö.O =0,80 B.O =0,10	359,73	359,73	0,00	Optimal	2960,27
TP5	7	Yok	741,05	741,05	0,00	Optimal	248,76
TP5	7	Ö.O =0,80 B.O =0,10	333,79	521,77	56,32	Geçerli	3600
TP3	5	Yok	461,68	461,68	0,00	Optimal	2,33
TP3	5	Ö.O =0,80 B.O =0,10	423,73	423,73	0,00	Optimal	25,08
TP6	7	Yok	825,78	825,78	0,00	Optimal	279,50
TP6	7	Ö.O =0,80 B.O =0,10	518,31	518,31	0,00	Optimal	3423,28

Test problemleri incelendiğinde, 5 işli test problemlerinde matematiksel model hem çözüm süresi hem de çözüm kalitesi açısından iyi performans göstermektedir. Bütün 5 işli problemlerde optimum sonuç kabul edilebilir çözüm sürelerinde elde edilmiştir. Öğrenme etkisinin modele dahil edilmesi amaç fonksiyon değerini azaltmakta ve çözüm süresini genellikle artırmaktadır.

Buna karşılık, 7 işli test problemlerinin hepsinde, model çözüm süresinin maksimum sınırı olan 3.600 saniyede ancak alt sınırdan sapma yüzdesinin oldukça yüksek olduğu çözümler verebilmiştir. Bu durum ise matematiksel modelde problem boyutu (iş sayısı, aşama sayısı) arttıkça modelin çözüm süresini artırmakta ve kaliteli

çözümleri limitli sürelerde sağlamakta zorlandığını göstermektedir. Genel olarak, küçük iş sayılarında model yüksek performans sağlarken, büyük iş sayılarında çözüm süresi ve kalite açısından performans düşmektedir.

Tablo 3.24 Beş Aşamalı Farklı İş Sayıları İçin Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma Etkili EAT Test Problemi için Elde Edilen Sonuçları

Test Problemi	İş Sayısı	Parametreler	Alt Sınır	Amaç Fonksiyon Değeri	Alt Sınırdan Sapma (%)	Model Durumu	Çözüm Süresi (sn)
TP1	5	Yok	498,81	498,81	0,00	Optimal	88,39
TP1	5	Ö.O =0,80 B.O =0,10	430,41	430,41	0,00	Optimal	200,88
TP4	7	Yok	294,66	792,59	168,98	Geçerli	3600
TP4	7	Ö.O =0,80 B.O =0,10	134,19	802,43	497,98	Geçerli	3600
TP2	5	Yok	590,88	590,88	0,00	Optimal	674,25
TP2	5	Ö.O =0,80 B.O =0,10	485,42	485,42	0,00	Optimal	2460,89
TP5	7	Yok	136,85	903,91	560,51	Geçerli	3600
TP5	7	Ö.O =0,80 B.O =0,10	54,52	662,51	1.115,17	Geçerli	3600
TP3	5	Yok	521,82	521,82	0,00	Optimal	299,78
TP3	5	Ö.O =0,80 B.O =0,10	485,81	485,81	0,00	Optimal	2460,89
TP6	7	Yok	342,32	933,63	172,74	Geçerli	3600
TP6	7	Ö.O =0,80 B.O =0,10	124,42	710,11	470,74	Geçerli	3600

Tablo 3.22’de verilen beş aşamalı EAT için pozisyona dayalı üstel öğrenme ve bozulma etkili sonuçlarla kıyaslandığında, pozisyon bağımlı öğrenme ve pozisyona dayalı üstel bozulmanın etkili olduğu sonuçlarda, daha iyi amaç fonksiyonu değerlerine ulaşılmasına rağmen; hem çözüm süresi, hemde alt sınırdan sapma yüzdesi açısından daha yüksek değerler elde edilmiştir.

3.5.4 Farklı İş Sayıları İçin Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma Etkili EAT İçin Test Problemleri

Bu bölümde, farklı iş sayılarına (5 iş ve 7 iş) sahip test problemleri kapsamında hem öğrenme hem de bozulma etkilerinin pozisyon bağımlı olarak ele alındığı test problemleri oluşturulmuştur. Oluşturulan test problemlerinde en iyi parametre değerleri öğrenme etkisi oranı %80 ve bozulma etkisi oranı % 10 olarak belirlenmiştir.

3 aşamalı Farklı İş Sayıları İçin Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma Etkili EAT test problemleri için matematiksel model sonuçları

Üç aşamalı test problemleri için iki temel durum ele alınmıştır. Birinci durumda öğrenme ve bozulma etkileri dikkate alınmamış, ikinci durumda ise %80 öğrenme oranı ve %10 bozulma oranı parametreleri sabitlenmiştir. Her iki durum da 5 iş ve 7 iş içeren farklı iş sayısındaki test problemlerine uygulanarak matematiksel modelin performansı karşılaştırmalı olarak Tablo 3.25'te gösterilmiştir.

Tablo 3.25'teki sonuçlar incelendiğinde diğer öğrenme ve bozulma türlerinde olduğu gibi iş sayısının 5 'ten 7 'ye yükselmesi tüm test problemlerinde önemli artışlara neden olmuştur. Bu durum özellikle 7 işli TP2'de 3600 saniyelik zaman sınırına ulaşmış ve optimum çözüm elde edilememiş, alt sınırdan %68,51 sapan bir çözüm elde edilmiştir. Küçük ölçekli olan 3 aşamalı EAT problemlerinde genellikle optimum sonucun elde edilebileceği çıkarsaması, bu pozisyon bağımlı öğrenme ve pozisyon bağımlı bozulma etkili durum için de aynı şekilde geçerlidir.

5 aşamalı Farklı İş Sayıları İçin Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma Etkili EAT test problemleri için matematiksel model sonuçları

Ana sistem modeline daha yakın olan beş aşamalı test problemleri pozisyon bağımlı öğrenme etkisi için öğrenmenin olmadığı durum ve %80 öğrenme ve %10 bozulma oranı olmak üzere matematiksel model geliştirilmiş ve sonuçları Tablo 3.26' da değerlendirilmiştir.

Tablo 3.26'daki sonuçlar incelendiğinde iş sayısının artması çözüm süresi ve çözüm kalitesi üzerinde olumsuz etki oluşturduğu gözlemlenmiştir. 5 işli test problemlerinde matematiksel model hem hızlı hem de güvenilir çözümler üretebilirken iş sayısı 7'ye çıktığında ise çözüm süreleri maksimum süreye ulaşmakta ve alt sınırdan sapma yüzdesi değerleri yüksek kalarak modelin performansını düşürmektedir.

Öğrenme ve bozulma etkisi, 5 işli problemlerde amaç fonksiyon değeri ve çözüm kalitesini iyileştirirken, 7 işli problemlerde amaç fonksiyon değerini iyileştirmiş fakat çözüm süresi büyümüş ve çözüm kalitesi kötüleşmiştir.

Tablo 3.25 Üç Aşamalı Farklı İş Sayıları İçin Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma Etkili EAT Test Problemi için Elde Edilen Sonuçları

Test Problemi	İş Sayısı	Parametreler	Alt Sınır	Amaç Fonksiyon Değeri	Alt Sınırdan Sapma (%)	Model Durumu	Çözüm Süresi (sn)
TP1	5	Yok	84,19	84,19	0,00	Optimal	4,25
TP1	5	Ö.O =0,80 B.O =0,10	78,56	78,56	0,00	Optimal	8,75
TP4	7	Yok	252,58	252,58	0,00	Optimal	192,56
TP4	7	Ö.O =0,80 B.O =0,10	171,44	171,44	0,00	Optimal	132,23
TP2	5	Yok	419,73	419,73	0,00	Optimal	44,09
TP2	5	Ö.O =0,80 B.O =0,10	395,74	395,74	0,00	Optimal	183,31
TP5	7	Yok	741,05	741,05	0,00	Optimal	248,76
TP5	7	Ö.O =0,80 B.O =0,10	376,71	634,78	68,51	Geçerli	3600
TP3	5	Yok	461,68	461,68	0,00	Optimal	2,33
TP3	5	Ö.O =0,80 B.O =0,10	444,54	444,54	0,00	Optimal	35,17
TP6	7	Yok	825,78	825,78	0,00	Optimal	279,50
TP6	7	Ö.O =0,80 B.O =0,10	646,00	646,00	0,00	Optimal	2965,44

Tablo 3.26 Beş Aşamalı Farklı İş Sayıları İçin Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma Etkili EAT Test Problemi için Elde Edilen Sonuçlar

Test Problemi	İş Sayısı	Parametreler	Alt Sınır	Amaç Fonksiyon Değeri	Alt Sınırdan Sapma (%)	Model Durumu	Çözüm Süresi (sn)
TP1	5	Yok	498,81	498,81	0,00	Optimal	88,39
TP1	5	Ö.O =0,80 B.O =0,10	468,30	468,30	0,00	Optimal	3360,53
TP4	7	Yok	294,66	792,59	62,8	Geçerli	3600
TP4	7	Ö.O =0,80 B.O =0,10	200,02	698,58	71,36	Geçerli	3600
TP2	5	Yok	590,88	590,88	0,00	Optimal	674,25
TP2	5	Ö.O =0,80 B.O =0,10	445,17	541,70	21,68	Geçerli	3600
TP5	7	Yok	136,85	903,91	560,51	Geçerli	3600
TP5	7	Ö.O =0,80 B.O =0,10	153,46	850,92	454,49	Geçerli	3600
TP3	5	Yok	521,82	521,82	0,00	Optimal	299,78
TP3	5	Ö.O =0,80 B.O =0,10	504,13	504,13	0,00	Optimal	106,12
TP6	7	Yok	342,32	933,63	172,73	Geçerli	3600
TP6	7	Ö.O =0,80 B.O =0,10	287,21	815,40	183,90	Geçerli	3600

3.6 Test Problemi Sonuçları

Çalışmada geliştirilen matematiksel modelin geçerliliği ve performansı, farklı iş ve aşama sayıları ile öğrenme ve bozulma parametrelerinin çeşitli değerleri üzerinden test edilmiştir.

Bölüm 3.4’te, sabit iş sayısı için farklı aşamalı problemler için yalnızca öğrenme etkisi ile öğrenme ve bozulma etkilerinin üç farklı kombinasyonu matematiksel modele uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre mevcut sistemin basitleştirilmiş hali olan üç aşamalı problemlerde, geliştirilen model kısa sürede optimum çözümleri her türlü öğrenme ve bozulma etkisinde üretebilmiştir, bu da modelin küçük ölçekli problemlerdeki yüksek performansını ortaya koymaktadır. Ancak iş sayısı sabit tutulduğunda ve aşama sayısı arttıkça çözüm sürelerinin uzadığı

ve alt sınırdan sapma yüzdelerinin yükseldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca öğrenme ve bozulma etkilerinin modele dahil edilmesiyle çözüm uzayının genişlediği ve modelin maksimum zaman limitinde optimum çözüme ulaşmakta zorlandığı tespit edilmiştir.

Bölüm 3.5'te ise sabit öğrenme ve bozulma parametreleri altında farklı iş ve aşama sayılarına sahip test problemleri oluşturularak matematiksel modele uygulanmıştır. Üç aşamalı problemlerde iş sayısı arttıkça çözüm süreleri uzamakla birlikte model optimal sonuçlar üretmeye devam etmiştir. Bununla birlikte hem iş hem de aşama sayısının aynı anda arttığı büyük ölçekli problemlerde ise model verilen maksimum süre içerisinde optimum sonucu bulamamıştır. Bu durum modelin karmaşık ve büyük boyutlu problemlerde etkinliğinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla uygulama çalışmasındaki firma verilerinin büyük ölçekli ve karmaşık yapısı gerçekçi zaman dilimlerinde uygulanabilir çözümler üretebilmek adına sezgisel bir yöntem geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

3.7 Gerçek Hayat Problemi

3.7.1 Problemin Tanımı ve Veri Seti

Bu bölümde ana sistem tarafından üretilen toplam 14 farklı ürün içinden önümüzdeki 1 aylık süre içinde üretilmesi için siparişi alınan 10 ürünün üretim çizelgelemesinin oluşturulmasını içermektedir. Bu ürünlere ve sipariş büyüklüklerine ait bilgiler Tablo 3.27'de verilmiştir.

Firma alınan bu siparişleri doğrudan tek parça hâlinde üretmek yerine, çeşitli parti büyüklüklerine ayırarak üretim sürecini planlamakta ve gerçekleştirmektedir. Bu yaklaşım, hem üretim esnekliğini artırmakta hem de kapasite, iş gücü ve zaman kısıtlarının daha etkin yönetilmesini mümkün kılmaktadır. Firma tarafından bu 10 ürün için tespit edilen parti büyüklükleri Tablo 3.28'de verilmiştir. Parti büyüklüklerinin belirlenmesi problemi çizelgeleme probleminin bir parçası olmasına rağmen, firma tarafından belirlenen parti büyüklükleri çizelgeleme probleminin girdisi olarak kullanılmıştır. Parti büyüklüğü belirlemek için herhangi bir çözüm yaklaşımının önerilmesi bu çalışmanın kapsamı içerisinde yer almamaktadır.

Tablo 3.27 Üretilen Ürünlerin Parti Büyüklükleri

Ürünler	Sipariş Miktarı	Parti (lot) Sayısı	Parti (lot) Büyüklüğü
Ürün 1	6500	2	3250
Ürün 2	6500	2	3250
Ürün 3	10.000	4	2500
Ürün 5	10.000	4	2500
Ürün 9	5000	1	5000
Ürün 10	6000	1	6000
Ürün 11	5000	1	5000
Ürün 12	5000	1	5000
Ürün 13	9000	6	1500
Ürün 14	4000	2	2000

Tablo 3.28 Üretilen Ürünlerin Parti Büyüklüklerine Göre Ayrımı

Ürünler	Parti (lot) Kodu	Parti (lot) Büyüklüğü	Teslim Zamanı (hafta)
Ürün 1	Ü1-1	3250	1
Ürün 1	Ü1-2	3250	1
Ürün 2	Ü2-1	3250	1
Ürün 2	Ü2-2	3250	1
Ürün 3	Ü3-1	2500	1
Ürün 3	Ü3-2	2500	1
Ürün 3	Ü3-3	2500	1
Ürün 3	Ü3-4	2500	1
Ürün 5	Ü5-1	2500	2
Ürün 5	Ü5-2	2500	2
Ürün 5	Ü5-1	2500	2
Ürün 5	Ü5-2	2500	2
Ürün 9	Ü9	5000	4
Ürün 10	Ü10	6000	4
Ürün 11	Ü11	5000	4
Ürün 12	Ü12	5000	4
Ürün 13	Ü13-1	1500	3
Ürün 13	Ü13-1	1500	3
Ürün 13	Ü13-1	1500	3
Ürün 13	Ü13-1	1500	3
Ürün 13	Ü13-1	1500	3
Ürün 13	Ü13-1	1500	3
Ürün 14	Ü14-1	1500	1
Ürün 14	Ü14-2	1500	1

Tablo 3.29 Üretilen Ürünlerin Dört Haftalık Üretim Planı

Hafta No:	Parti Kodu	Öncelik Değeri	Parti (lot) Büyüklüğü	Teslim Zamanı (saat)
Hafta 1	Ü14-1	6	2000	54
Hafta 1	Ü14-2	6	2000	54
Hafta 1	Ü3-1	7	2500	54
Hafta 1	Ü1-1	3	3250	54
Hafta 1	Ü2-1	3	3250	54
Hafta 2	Ü3-2	7	2500	54
Hafta 2	Ü3-3	7	2500	54
Hafta 2	Ü3-4	7	2500	54
Hafta 2	Ü5-1	7	2500	54
Hafta 2	Ü5-2	7	2500	54
Hafta 2	Ü1-2	3	3250	54
Hafta 2	Ü2-2	3	3250	54
Hafta 3	Ü5-3	7	2500	54
Hafta 3	Ü5-4	7	2500	54
Hafta 3	Ü13-1	6	1500	54
Hafta 3	Ü13-2	6	1500	54
Hafta 3	Ü13-3	6	1500	54
Hafta 3	Ü13-4	6	1500	54
Hafta 4	Ü13-5	6	1500	54
Hafta 4	Ü13-6	6	1500	54
Hafta 4	Ü9	9	5000	54
Hafta 4	Ü10	10	6000	54
Hafta 4	Ü11	9	5000	54
Hafta 4	Ü12	9	5000	54

Haftalık üretim planları sonucunda ay sonu itibarıyla her bir ürün için oluşan gecikme değerleri belirlenmiştir. Bu durumda gerçekleşen gecikmeler ürün bazında değerlendirilmiş ve ay sonu itibarıyla ürünlerin toplam gecikme durumu belirlenmiştir. Firmanın mevcut üretim planı uygulaması sonucunda oluşan ürün bazlı gecikme verileri Tablo 3.30’da sunulmaktadır.

Tablo 3.30 Ürün Bazlı Gecikme Zamanları (saat)

Ürünler	Ü1	Ü2	Ü3	Ü5	Ü9	Ü10	Ü11	Ü12	Ü13	Ü14
Gecikme Zamanı	36	36	18	18	0	0	9	0	18	0
Önem Derecesi	3	3	7	7	9	10	9	9	6	6
Ağırlıklı Gecikme	108	108	126	126	0	0	81	0	108	0
Ağırlıklı Toplam Gecikme	657									

Elde edilen bulgular, mevcut planlama yaklaşımının özellikle teslim gecikmeleri açısından yetersiz kaldığını göstermiştir. Ayrıca, üretim süreçlerinde öğrenme ve bozulma etkilerinin işlem ve hazırlık süreleri üzerindeki belirleyici rolü dikkate alındığında, klasik planlama yaklaşımlarının üretimin dinamik yapısını yeterince temsil edemediği görülmektedir. Bu durum, problem yapısına daha uygun ve kısa sürede uygulanabilir çözümler sunabilen sezgisel yaklaşımların tercih edilmesini gerekli kılmaktadır.

3.7.2 Çözüm Algoritması

Çözüm algoritmasının oluşturulmasında, problemin çok aşamalı yapısı, teslim zamanı odaklı performans ölçütü ile üretim süreçlerinde öğrenme ve bozulma etkilerinin birlikte dikkate alınması belirleyici olmuştur. Özellikle gecikmelerin azaltılmasına yönelik iş sıralama ihtiyacı, işlerin teslim zamanları ile işlem önem derecelerinin eş zamanlı olarak değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu doğrultuda, teslim zamanları ve işlem önceliklerini birlikte ele alan Ağırlıklı Erken Teslim Zamanı (WEDD -Weighted Earliest Due Date) –) sezgiseli, problemin özgün yapısını yansıtacak şekilde bir çözüm algoritmasına entegre edilmiştir.

Literatürde yaygın kullanılan Ağırlıklı Erken Teslim Zamanı (WEDD) sezgiseli, işlerin teslim tarihlerinin ağırlıklarına oranına göre (d_j/w_j) sıralanması prensibine dayanır (Molina-Sánchez & González-Neira, 2016). Bu yaklaşım, üretim sistemlerinde işlerin sıralanması ve teslim sürelerinin optimize edilmesini sağlamakta olup, işlem önceliklerini ve işlerin önem derecelerini aynı anda dikkate alabilmektedir. WEDD sezgiseli, problemlere esneklik kazandırarak gecikmelerin minimize edilmesi ve iş yüklerinin dengelenmesine katkıda bulunması nedeniyle literatürde sıkça başvurulan etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Mevcut çalışmada ise WEDD sezgiseli iş sıralaması kullanılırken aynı zamanda öğrenme ve bozulma etkileri ile çalışan bağımlı hazırlık ve işlem süreleri de dikkate alınarak işlerin uygun çalışanlara atanmasını sağlayan bir yaklaşım geliştirilmiştir.

3.7.2.1 Ağırlıklı Erken Teslim Tarihi (WEDD) Sezgiseli

Gerçek hayat probleminin yapısına uygun olarak işlerin önceliklerine göre aşamalarda sıralanması ve çalışanlara atanmasını sağlamak amacıyla geliştirilmiş sezgisel algoritma aşağıda sunulmaktadır.

Adım 1: Başlangıç hesaplamaları

Tüm işler için WEDD kuralına göre dj/wj değerleri hesaplanır. Hesaplanan dj/wj değerleri küçükten büyüğe sıralanır.

Adım 2: Aşama 1 için çizelgeleme

Sıralama değerlerine göre işler Aşama 1’de 1. çalışana aynı sıra ile atanır. İşlerin 1.aşamada başlama ve bitiş süreleri hesaplanır.

Adım 3: Aşama 2 için çizelgeleme

1. aşamadan çıkan iş, bu aşamada en erken çizelgelenebilecek olduğu çalışana(makineye) atanır. İlk pozisyona atamalarda, işin çizelgelenebileceği birden fazla çalışan(makine) olması durumunda başlangıç hazırlık süresi en düşük olan çalışana(makineye) atanır.

Bu aşamada çalışanların ilk pozisyonları dolduktan sonra, geride kalan işler sırasıyla en erken çizelgelenebilecek çalışanın sıradaki pozisyonlarına atanır. İşlerin bu aşamadaki başlama ve bitiş süreleri hesaplanır.

Adım 4: Aşama 3 için çizelgeleme

2. aşamadan çıkan iş, bu aşamada en erken çizelgelenebilecek olduğu çalışana(makineye) atanır. İlk pozisyona atamalarda, işin çizelgelenebileceği birden fazla çalışan(makine) olması durumunda başlangıç hazırlık süresi en düşük olan çalışana(makineye) atanır.

Bu aşamada çalışanların ilk pozisyonları dolduktan sonra, geride kalan işler sırasıyla en erken çizelgelenebilecek çalışanın sıradaki pozisyonlarına atanır. İşlerin bu aşamadaki başlama ve bitiş süreleri hesaplanır.

Adım 5: Aşama 4 için çizelgeleme

3. aşamadan çıkan işler, bu aşama için daha önceden atanmış çalışanlar arasından en erken çizelgelenebilecek çalışana atanır.

Bu aşamada çalışanların ilk pozisyonları dolduktan sonra, geride kalan işler sırasıyla en erken çizelgelenebilecek çalışanın sıradaki pozisyonlarına atanır. İşlerin bu aşamadaki başlama ve bitiş süreleri hesaplanır.

Adım 6: Aşama 5 için çizelgeleme

4. aşamadan çıkan işler, bu aşama için daha önceden atanmış çalışanlar arasından en erken çizelgelenebilecek çalışana atanır.

Bu aşamada çalışanların ilk pozisyonları dolduktan sonra, geride kalan işler sırasıyla en erken çizelgelenebilecek çalışanın sıradaki pozisyonlarına atanır. İşlerin bu aşamadaki başlama ve bitiş süreleri hesaplanır.

Adım 7: Aşama 6 için çizelgeleme

5. aşamadan çıkan işler, bu aşama için daha önceden atanmış tek çalışana bir önceki aşamadan geliş zamanları küçük olan öncelikli olacak şekilde atanır. İşlerin bu aşamadaki başlama ve bitiş süreleri hesaplanır.

Adım 8: Aşama 7 için çizelgeleme

6. aşamadan çıkan iş, bu aşamada en erken çizelgelenebilecek olduğu çalışana(makineye) atanır. İlk pozisyona atamalarda, işin çizelgelenebileceği birden fazla çalışan(makine) olması durumunda başlangıç hazırlık süresi en düşük olan çalışana(makineye) atanır.

Bu aşamada çalışanların ilk pozisyonları dolduktan sonra, geride kalan işler sırasıyla en erken çizelgelenebilecek çalışanın sıradaki pozisyonlarına atanır. İşlerin bu aşamadaki başlama ve bitiş süreleri hesaplanır.

Adım 9: Aşama 8 için çizelgeleme

7. aşamadan çıkan iş, Aşama 8'deki çalışana bir önceki aşamadan geliş zamanları küçük olan öncelikli olacak şekilde atanır. İşlerin başlama ve bitiş süreleri buna göre hesaplanır.

Adım 10: Tamamlanma Zamanı hesaplaması

Her işin son aşamadan çıktığı süre, tamamlanma süresi(C_j) olarak kayıt edilir. Her iş için teslim zamanı ve tamamlanma zamanı arasındaki farktan gecikme zamanı $T_j = d_j - C_j$ hesaplanır.

Adım 11: Amaç fonksiyonu değeri desaplaması

Her işin önem ağırlığı(W_j) ile gecikme zamanı (T_j) çarpılarak ağırlıklı gecikmedeğeri ($W_j * T_j$) elde edilir.

Tüm işlerin ağırlıklı gecikme zamanları ($W_j * T_j$) toplanarak amaç fonksiyon değeri $\sum W_j * T_j$ olarak yazılım hesaplanır.

3.7.2.1.1 Ağırlıklı Erken Teslim Tarihi (WEDD) Sezgiseli Kullanılan Veri Seti

Bu bölümde, problemin yapısına uygun olarak geliştirilen WEDD Sezgiseli için kullanılacak veriler tanıtılmıştır. Bu veriler; aşama-çalışan atamaları, temel işlem süreleri, çalışan bağımlı işlem süreleri ile çalışan bağımlı ilk hazırlık ve sonraki hazırlık sürelerini kapsamaktadır.

WEDD Sezgiselinde kullanılacak veri setini açıklamak amacıyla, gerçek bir üretim veri setinden alınan Hafta 1 verileri örnek olarak kullanılmıştır. Söz konusu veri seti; ürünlerin temel işlem sürelerini, çalışanlara göre değişkenlik gösteren işlem ve hazırlık sürelerini ve her bir çalışan için ilk hazırlık sürelerini içermektedir.

Problemde çalışan atamaları Aşama 1, Aşama 2, Aşama 3, Aşama 7 ve Aşama 8'de çalışan atamaları önceden belirlenmiştir. Ancak Aşama 4, Aşama 5 ve Aşama 6'da çalışabilen 6 farklı çalışanın (Çalışan 8, Çalışan 9, Çalışan 10, Çalışan 11, Çalışan 12, Çalışan 13) bu aşamalara atanmasında firmanın haftalık üretim planınında yer alan ürünlere göre atamaları her hafta değişmektedir. Bu aşamalarda haftalık çalışan atamalarında çalışanların ilgili haftada üretilmesi planlanan parti kodlarındaki işlem süreleri toplamı dikkate alınarak yapılmıştır. Hafta 1 için Aşama 4, Aşama 5 ve Aşama 6'daki çalışan bağımlı işlem süreleri ile çalışanların parti kodları bazındaki toplam işlem süreleri sırasıyla Tablo 3.31, Tablo 3.32 ve Tablo 3.33'te sunulmuştur.

Tablo 3.31 Hafta 1 ve Aşama 4 için Çalışan Bağımlı İşlem Süreleri (saat)

Parti Kodu	Ü14-1	Ü14-2	Ü3-1	Ü1-1	Ü2-1	Toplam İşlem Süresi
Çalışan 8	6,02	6,02	8,54	3,9	3,97	28,47
Çalışan 9	5,45	5,45	8,26	3,98	4,19	27,35
Çalışan 10	5,05	5,05	6,73	3,39	3,65	23,89
Çalışan 11	4,61	4,61	6,04	3,11	3,58	21,97
Çalışan 12	5,06	5,06	6,87	3,44	3,67	24,12
Çalışan 13	4,09	4,09	4,22	3,00	2,59	18,01

Tablo 3.32 Hafta 1 ve Aşama 5 için Çalışan Bağımlı İşlem Süreleri (saat)

Parti Kodu	Ü14-1	Ü14-2	Ü3-1	Ü1-1	Ü2-1	Toplam İşlem Süresi
Çalışan 8	0	0	4,96	5,13	8,22	18,32
Çalışan 9	0	0	5,03	5,34	7,71	18,08
Çalışan 10	0	0	4,31	4,65	6,34	15,31
Çalışan 11	0	0	3,90	4,45	5,80	14,15
Çalışan 12	0	0	4,29	4,57	6,35	15,22
Çalışan 13	0	0	3,70	4,3	6,40	14,40

Tablo 3.33 Hafta 1 ve Aşama 6 için Çalışan Bağımlı İşlem Süreleri (saat)

Parti Kodu	Ü14-1	Ü14-2	Ü3-1	Ü1-1	Ü2-1	Toplam İşlem Süresi
Çalışan 8	9,42	9,42	14,50	14,77	8,86	56,99
Çalışan 9	8,65	8,65	14,83	15,61	8,81	56,56
Çalışan 10	8,51	8,51	13,44	13,60	7,33	51,40
Çalışan 11	8,12	8,12	12,74	13,34	6,34	48,69
Çalışan 12	7,92	7,92	13,55	13,66	7,57	50,63
Çalışan 13	4,52	4,52	9,97	10,85	6,12	35,99

Problemde Hafta 2, Hafta 3 ve Hafta 4 için çalışan bağımlı işlem süreleri Ek 10, Ek 11, Ek 12, Ek 15, Ek 16, Ek 17, Ek 20, Ek 21, Ek 22’de bulunmaktadır.

Aşama 4, Aşama 5 ve Aşama 6’daki çalışan atamalarında, çalışanların toplam işlem süreleri dikkate alınmıştır. En düşük toplam işlem süresine sahip olan Çalışan 13, genellikle tek makineden oluşan Aşama 6’ya atanmaktadır. İşlem süreleri Çalışan 13’e göre daha yüksek olan iki çalışan ise iki makineli Aşama 5’e, kalan üç çalışan ise Aşama 4’e atanarak gerçek hayat problemine yönelik bir çalışan atama kuralı oluşturulmuştur.

Tablo 3.34 Gerçek Hayat Problemi Aşama 4, Aşama 5 ve Aşama 6 için Çalışan Atamaları

	Aşama 4	Aşama 5	Aşama 6
Hafta 1	Çalışan 8 – Çalışan 9 Çalışan 10	Çalışan 11 – Çalışan 12	Çalışan 13
Hafta 2	Çalışan 8 – Çalışan 9 Çalışan 12	Çalışan 10 – Çalışan 11	Çalışan 13
Hafta 3	Çalışan 8 – Çalışan 9 Çalışan 12	Çalışan 10 – Çalışan 11	Çalışan 13
Hafta 4	Çalışan 9 – Çalışan 10 Çalışan 12	Çalışan 11 – Çalışan 13	-

Tablo 3.34 incelendiğinde, her hafta üretim planında yer alan ürünlere bağlı olarak Aşama 4, Aşama 5 ve Aşama 6’daki çalışan atamalarının optimize edilerek değiştiği görülmektedir. Örneğin, Hafta 1’de Aşama 4’te üç çalışan (Çalışan 8, 9, 10) görevlendirilirken, Hafta 4’te aynı aşamada farklı bir çalışan kombinasyonu (Çalışan 9, 10, 12) kullanılmıştır. Bu durum, atamaların o hafta üretilmesi planlanan ürünlerin işlem süreleri ve özellikleri doğrultusunda esnek ve optimize şekilde belirlendiğini göstermektedir. Ayrıca, Hafta 4’te Aşama 6’ya çalışan atanmamış olması, o hafta üretilcek ürünler arasında bu aşamada işlem gerektiren herhangi bir ürün bulunmamasından kaynaklanmaktadır.

Tablo 3.35 Hafta 1 için Temel İşlem Süreleri (saat)

Parti Kodu	Aşama 1	Aşama 2	Aşama 3	Aşama 7	Aşama 8
Ü14-1	0,85	6,14	1,42	2,55	0
Ü14-2	0,85	6,14	1,42	2,55	0
Ü3-1	1,97	4,43	3,01	2,64	0
Ü1-1	1,04	2,80	1,86	2,83	0
Ü2-1	1,12	3,15	2,19	3,10	0

Tablo 3.35, Hafta 1 için temel işlem süreleri, ürünlerin Aşama 1, Aşama 2, Aşama 3, Aşama 7 ve Aşama 8’ deki çalışandan bağımsız işleri sadece makinelerin gerçekleştirdiği aşamalardaki işlem sürelerini göstermektedir.

Çalışan bağımlı hazırlık ve ilk süreleri Aşama 2, Aşama 3 ve Aşama 7 ‘ de gerçekleşen ürünlerin kalıplarının değişim süresidir. Bu aşamalarda çalışan bağımlı hazırlık süreleri Tablo 3.4, Ek 1, Ek 2, Ek 3, Ek 4, Ek 5, Ek 6, Ek 7 ve Ek 8 ‘den ulaşılabilmektedir. Çalışan bağımlı ilk hazırlık süreleri, ürünün pres makinelerinde ilk pozisyonda işlem görmesi durumunda üründen önce pres makinesinde bulunan kalıp için gereken değişim süresidir.

Gerçek hayat probleminde Hafta 2, Hafta 3, Hafta 4 için çalışan bağımlı ilk hazırlık süreleri EK 13, EK 18, EK 23’ de bulunmaktadır.

Tablo 3.36 Hafta 1 için Aşama 2, Aşama 3 ve Aşama 7 için Çalışan Bağımlı İlk Hazırlık Süreleri (saat)

Parti Kodu	Ç2	Ç3	Ç4	Ç5	Ç6	Ç7	Ç14	Ç15	Ç16
Ü14-1	0,49	0,45	0,4	0,36	0,47	0,52	0,55	0,61	0,50
Ü14-2	0,49	0,45	0,4	0,36	0,47	0,52	0,55	0,61	0,50
Ü3-1	0,71	0,62	0,56	0,57	0,63	0,83	0,62	0,93	0,62
Ü1-1	0,74	0,64	0,56	0,51	0,59	0,73	0,60	0,80	0,56
Ü2-1	0,74	0,65	0,63	0,5	0,58	0,73	0,68	1,12	0,86

Gerçek hayat probleminde Hafta 2, Hafta 3, Hafta 4 için çalışan bağımlı ilk hazırlık süreleri EK 13, EK 18, EK 23’ de bulunmaktadır.

3.7.3 WEDD Sezgiselinin Öğrenme ve Bozulma Etkisi Modellerinde Uygulanması

Bu bölümde, öğrenme etkisi ile öğrenme ve bozulma etkilerinin üç farklı kombinasyonunu içeren toplam dört farklı modelde, işlerin atanması WEDD sezgiseli ile gerçekleştirilmiş ve işlem süreleri bu modellere göre hesaplanmıştır. İşlerin sıralanması için WEDD sezgisel kuralı kullanılmış; çalışan bağımlı hazırlık zamanları ile çalışan bağımlı işlem sürelerinin hesaplanmasında ise sadece öğrenme etkisi içeren model ve öğrenme ile bozulma etkilerinin üç farklı kombinasyonunu içeren modeller kullanılmıştır. Ayrıca geliştirilen matematiksel model ile sezgisel yaklaşımın sonuçları, çözüm süresi ve matematiksel model sonucundan yüzde sapma olmak üzere iki farklı performans kriteri üzerinden değerlendirilmiştir.

Matematiksel model sonucundan % sapma ;

$$\frac{\text{Sezgisel Yaklaşım Sonucu} - \text{Matematiksel Model Sonucu}}{\text{Matematiksel Model Sonucu}} \times 100$$

formülü ile hesaplanmaktadır.

3.7.3.1 Pozisyon Öğrenme Etkisi Altında WEDD Sezgiseli

Tablo 3.37 Pozisyon Öğrenme Etkisi Altında WEDD Sezgiseli Sonuçları

	Matematiksel Model				Sezgisel Yaklaşım		
	Alt Sınır	Model Sonucu	Alt Sınırdan Sapma (%)	Çözüm Süresi (sn)	Model Sonucu	Mat. Modelin Sonucundan Sapma (%)	Çözüm Süresi (sn)
Hafta 1	0	0	0,00	4,20	0	0,00	56,30
Hafta 2	0	15,46	∞	3600	29,74	92,37	83,10
Hafta 3	0	0	0,00	1,92	0	0,00	107,80
Hafta 4	5,25	5,25	0,00	186,75	51,59	877,00	66,20

Modelde, literatürde yaygın olarak kabul gören öğrenme etkisi oranı %80 olarak alınmıştır. Öğrenme etkisi, çalışan bağımlı işlem sürelerinde ve çalışan bağımlı hazırlık sürelerinde etkili olmuştur. Geliştirilen matematiksel model ve sezgisel yaklaşım sonuçları Tablo 3.37’de sunulmuştur

Tablo 3.37’den elde edilen sonuçlar incelendiğinde, matematiksel modelin küçük boyutlu problemler için optimum çözümler ürettiği, ancak iş sayısının 7 olduğu Hafta 2 için çözüm süresinin maksimum sınıra ulaştığı ve matematiksel modelin bir çözüm bulamadığı görülmüştür. Sezgisel yaklaşım ise tüm haftalarda hızlı çözümler üretebilmiştir. Ayrıca, iş sayısının en fazla olduğu Hafta 2’de matematiksel modele göre çok daha kısa sürede pratik çözümler üretebilmiştir. Bu durum, geliştirilen WEDD Sezgiseli’nin özellikle zaman kısıtlı ve büyük ölçekli problemlerde etkili sonuçlar verdiğini göstermektedir.

3.7.3.2 Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma Etkisi Altında WEDD Sezgiseli

Geliştirilen WEDD Sezgiseli ile gerçek işlem sürelerinde öğrenme ve bozulma etkilerinin birlikte etkili durum birlikte ele alınmıştır. Çalışmada öğrenme etkisi oranı % 90 ve bozulma etkisi oranı % 10 olarak belirlenmiş ve matematiksel model ve sezgisel yaklaşım sonuçları Tablo 3.38’de sunulmuştur.

Tablo 3.38 Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma Etkisi Altında Ağırlıklı Erken Teslim Tarihi (WEDD) Sezgiseli Sonuçları

	Matematiksel Model				Sezgisel Yaklaşım		
	Alt Sınır	Model Sonucu	Alt Sınırdan Sapma (%)	Çözüm Süresi (sn)	Model Sonucu	Mat. Modelin Sonucundan Sapma (%)	Çözüm Süresi (sn)
Hafta 1	0	0	0,00	12,25	0	0,00	66,70
Hafta 2	0	71,43	∞	3600	188,29	62,06	98,20
Hafta 3	0	0	0,00	2,20	0	0,00	51,10
Hafta 4	6,51	6,51	0,00	482,25	70,25	979,00	106,54

Tablo 3.38'in sonuçları incelendiğinde, matematiksel modelin küçük ölçekli problemlerde optimum çözümler ürettiği, ancak daha karmaşık (zor) problemlerde çözüm süresinin belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, Hafta 2 verileri için maksimum süre sınırına ulaştığı ve bu nedenle bir çözüm üretemediği tespit edilmiştir.

Buna karşılık, geliştirilen sezgisel yaklaşım tüm haftalar için kısa sürede çözüm üretebilmiştir. Sezgisel yaklaşımın çözüm sürelerinin matematiksel modele kıyasla önemli ölçüde daha düşük olduğu ve özellikle büyük boyutlu problemlerde etkin bir çözüm alternatifi sunduğu belirlenmiştir.

3.7.3.3 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma Etkisi Altında WEDD Sezgiseli

Bu bölümde, pozisyon bağımlı öğrenme etkisi ile üstel bozulma etkisinin birlikte dikkate alındığı durumda geliştirilen WEDD sezgiseli ele alınmıştır. Gerçek işlem sürelerinde öğrenme ve bozulma etkilerinin birlikte etkili olduğu durumda öğrenme etkisi oranı %80 ve bozulma etkisi oranı %10 olarak belirlenmiştir. Bu doğrultuda elde edilen matematiksel model ve sezgisel yaklaşım sonuçları Tablo 3.39'da sunulmaktadır.

Tablo 3.39 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma Etkisi Altında WEDD Sezgiseli Sonuçları

	Matematiksel Model				Sezgisel Yaklaşım		
	Alt Sınır	Model Sonucu	Alt Sınırdan Sapma (%)	Çözüm Süresi (sn)	Model Sonucu	Mat. Modelin Sonucundan Sapma (%)	Çözüm Süresi (sn)
Hafta 1	0	0	0,00	1,08	0	0,00	63,27
Hafta 2	0	69,22	∞	3600	68,23	-1,43	98,41
Hafta 3	0	0	0,00	2,20	0	0,00	74,93
Hafta 4	8,27	8,27	0,00	358,33	94,33	1040	71,50

Tablo 3.39'un sonuçlarına göre, matematiksel model küçük boyutlu problemlerde kısa sürede optimal çözümler üretirken, iş sayısı arttıkça çözüm süreleri belirgin şekilde uzamakta ve maksimum süre sınırına yaklaşmaktadır. Buna karşılık, sezgisel yaklaşım büyük boyutlu problemlerde dahi kısa sürede yüksek kalitede

çözümler üretebilmektedir. Ayrıca sezgisel yaklaşımın amaç fonksiyonu değeri, matematiksel modelin amaç fonksiyonu değerinden daha iyi bir sonuç vermiş; dolayısıyla matematiksel model sonucundan sapma değeri -%1,43 olarak gerçekleşmiştir. Bu durum, pozisyon bağımlı öğrenme ve pozisyona dayalı üstel bozulma etkisinin bulunduğu problemin çözümünde sezgisel yaklaşımın, matematiksel modele kıyasla daha hızlı, istikrarlı ve büyük ölçekli problemler için hem daha uygulanabilir hem de daha iyi sonuçlar veren bir yöntem olduğunu göstermektedir.

3.7.3.4 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma Etkisi Altında WEDD Sezgiseli

Bu bölümde geliştirilen WEDD Sezgiseli'nde öğrenme ve bozulma etkilerinin pozisyon bağımlı olduğu çalışma gerçekleştirilmiştir. Öğrenme etkisi oranı % 80 ve bozulma etkisi oranı % 10 olarak belirlenmiş ve matematiksel model ve sezgisel yaklaşım sonuçları Tablo 3.40'da sunulmuştur.

Tablo 3.40 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma Etkisi Altında WEDD Sezgiseli Sonuçları

	Matematiksel Model				Sezgisel Yaklaşım		
	Alt Sınır	Model Sonucu	Alt Sınırdan Sapma (%)	Çözüm Süresi (sn)	Model Sonucu	Mat. Modelin Sonucundan Sapma (%)	Çözüm Süresi (sn)
Hafta 1	0	0	0	3,55	0	0	64,38
Hafta 2	0	80,08	∞	3600	68,23	19,36	76,91
Hafta 3	0	0	0	8,74	0	0	89,24
Hafta 4	5,25	5,25	0	1064,36	94,33	1252	113,60

Tablo 3.40'dan elde edilen sonuçlara göre matematiksel model küçük problemlerde etkin sonuçlar üretmesine rağmen problem boyutu arttıkça çözüm süresi belirgin şekilde artmaktadır. Buna karşılık geliştirilen sezgisel yaklaşım tüm problem boyutlarında düşük çözüm sürelerinde çözümler elde edebilmiştir. Özellikle matematiksel model Hafta 2 için maksimum sürede çözüm bulamamasına rağmen sezgisel yaklaşım kısa sürede sonuç bulabilmiştir.

3.7.4 Gerçek Hayat Problemi Çözüm Sonuçları

Gerçek hayat problemine ait amaç fonksiyonu değeri, mevcut durum ile birlikte, öğrenme etkisi ve üç farklı öğrenme-bozulma etkisi kombinasyonu altında geliştirilen matematiksel model ve WEDD sezgiseli ile elde edilen çözüm sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuş olup, öğrenme ve bozulma etkilerinin çizelgeleme performansı üzerindeki etkilerini analiz etmek ve yöntemlerin birbirine göre performansını değerlendirmek amacıyla Tablo 3.41 oluşturulmuştur.

Tablo 3.41 Gerçek Hayat Problemi Çözüm Sonuçları

Model / Sistem Durumu	Öğrenme Oranı	Bozulma Oranı	Amaç Fonksiyon Değeri
Mevcut Sistem	-	-	657
Matematiksel Model Çözümleri			
Pozisyon Bağımlı Öğrenme	%80	-	20,71
Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma	%90	%10	78,94
Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma	%80	%10	77,49
Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Bozulma	%80	%10	85,33
Sezgisel Yaklaşım Çözümleri			
Pozisyon Bağımlı Öğrenme	%80	-	81,34
Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma	%90	%10	258,54
Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma	%80	%10	162,57
Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Bozulma	%80	%10	166,55

Mevcut sistemde elde edilen amaç fonksiyonu değeri, çalışmada ele alınan diğer çözüm yaklaşımlarına kıyasla oldukça yüksektir. Bu durum işletmede hâlihazırda uygulanan çizelgeleme kararlarının üretim etkinliği açısından sınırlı kaldığını ve alternatif çizelgeleme yaklaşımlarının değerlendirilmesinin gerekli olduğunu göstermektedir.

Öğrenme etkisinin tek başına ele alındığı durumda ise, mevcut sisteme kıyasla belirgin bir iyileşme sağlanmış ve bu yaklaşım hem matematiksel model hem de

sezgisel yaklaşım kapsamında diğer öğrenme ve bozulma kombinasyonlarına kıyasla en düşük amaç fonksiyonu değerlerini üretmiştir. Bu sonuçlar, pozisyon bağımlı öğrenmenin çizelgeleme sürecinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Öğrenme ve bozulma etkilerinin birlikte ele alındığı üç model arasında ise hem matematiksel model hem de sezgisel yaklaşım kapsamında en düşük amaç fonksiyonu değeri Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma modeliyle elde edilmiştir. Bu durum öğrenme etkisinin pozisyona bağlı olarak hızlı bir şekilde gelişmesine karşın bozulma etkisinin üstel yapısı sayesinde daha kontrollü bir şekilde artmasından kaynaklanmaktadır. Diğer öğrenme ve bozulma kombinasyonları bu modeli takip eden sonuçlar üretmiş olup, genel olarak öğrenme ve bozulma etkilerinin çizelgeleme sürecine dâhil edilmesiyle amaç fonksiyonu değerlerinde mevcut sisteme kıyasla belirgin azalmalar gözlemlenmiştir.

Çözüm yöntemleri arasında matematiksel model, en düşük amaç fonksiyonu değerlerini üretmesiyle ön plana çıkmaktadır. Ancak matematiksel modelin uzun işlem sürelerine sahip olması özellikle büyük ölçekli problemlerde önemli bir sınırlılık oluşturmaktadır. Buna karşılık sezgisel yaklaşım, daha kısa sürede pratik çözümler sunarak zaman kısıtı bulunan durumlar için uygulanabilir bir alternatif olarak değerlendirilmektedir.

Genel olarak sonuçlar, öğrenme etkisinin baskın bir rol oynadığını, bozulma etkisinin ise performansı sınırlayıcı bir unsur olarak çalıştığını göstermekte buna rağmen her iki etkinin birlikte ele alındığı modellerin mevcut sisteme kıyasla daha etkin çözümler sunduğu anlaşılmaktadır.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, esnek akış tipi bir üretim sisteminde öğrenme ve bozulma etkilerinin birlikte ele alındığı bir çizelgeleme problemi incelenmiş ve bu problemi çözmek amacıyla bir matematiksel model geliştirilmiştir. Problemin karmaşık yapısı ve amaç fonksiyonunun niteliği gereği NP-zor sınıfında yer alması, çözüm yaklaşımının belirlenmesinde etkili olmuştur.

Geliştirilen matematiksel modelin geçerliliğini ve performansını değerlendirmek amacıyla; iş, aşama ve çalışan sayısı ile öğrenme etkisinin türü ve bozulma etkisinin modele dâhil edilip edilmemesi ve türü gibi parametrelere bağlı olarak farklı veri setleri oluşturulmuş ve bu veri setleri üzerinden model test edilerek söz konusu parametrelerin matematiksel model performansı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir.

İş sayısının sabit tutulduğu; aşama sayısının (3 ve 5) ve çalışan sayısının (7 ve 12) değişken olarak ele alındığı test problemleri oluşturulmuştur. Bu test problemlerinde yalnızca öğrenme etkisinin dikkate alındığı model ile öğrenme ve bozulma etkilerinin birlikte ele alındığı üç farklı model kombinasyonu için, farklı öğrenme ve bozulma oranlarına sahip parametreler kullanılarak matematiksel model çalıştırılmıştır. Sabit iş sayısına sahip ve aşama sayısının (3) ile çalışan sayısının (7) en düşük olduğu problemlerin tamamında matematiksel model optimal çözümler üretebilmiş; öğrenme ve bozulma etkilerinin dikkate alınmadığı durumlara kıyasla amaç fonksiyon değerlerinde iyileşmeler elde edilmiştir. Aşama sayısının artmasıyla birlikte çözüm sürelerinin uzadığı, bazı test problemlerinde ise maksimum süre sınırı içerisinde yalnızca geçerli çözümlerin elde edilebildiği görülmüştür.

Daha sonra sabit öğrenme ve sabit öğrenme–bozulma parametreleri kullanılarak iş sayısının (5 ve 7) ve aşama sayısının (3 ve 5) değişken olduğu test problemleri oluşturulmuştur. Üç aşamalı test problemlerinde, TP2 hariç olmak üzere beş işli problemlerde optimal çözümler elde edilirken, iş sayısının yediye çıkması durumunda yalnızca geçerli çözümler bulunabilmiştir. Beş aşamalı problemlerde ise iş sayısının yedi olduğu durumlarda matematiksel model, tüm öğrenme ve bozulma modelleri için maksimum süre sınırı içinde yalnızca geçerli çözümler üretebilmiştir. Bu bulgular, matematiksel modelin küçük boyutlu problemlerde optimal sonuçlar

verebildiğini, ancak problem boyutu büyüdükçe çözüm bulmakta zorlandığını ve çözüm kalitesinin azaldığını göstermektedir.

Çalışmada ele alınan gerçek hayat problemi, iş, aşama ve çalışan sayısı bakımından büyük boyutlu problem sınıfına girdiğinden, problemin çözümü için probleme özgü bir WEDD sezgisel algoritması geliştirilmiştir. Sezgisel yaklaşımda işler, teslim zamanları ve önem dereceleri dikkate alınarak d_j/w_j değerlerine göre sıralanmış; ayrıca üretim sistemindeki aşamalarda iş-çalışan atamaları gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen sezgisel algoritma yalnızca öğrenme etkisinin ve öğrenme ile bozulma etkilerinin birlikte ele alındığı üç farklı model kombinasyonu için uygulanmıştır. Sezgisel yaklaşımın problemdeki hem küçük hem de büyük boyutlu problemleri kısa sürelerde çözebildiği görülmüştür.

Son olarak gerçek hayat problemine ait mevcut sistem, matematiksel model ve sezgisel yaklaşım sonuçları amaç fonksiyonu değeri açısından $(\sum W_j T_j)$ karşılaştırılmıştır. Genel olarak öğrenme ve bozulma etkilerinin dikkate alındığı matematiksel model ve sezgisel yaklaşım sonuçlarının, mevcut sistemin amaç fonksiyonu değerine kıyasla daha düşük değerler ürettiği görülmüştür. Bu durum öğrenme ve bozulma etkilerinin çizelgeleme sürecine dâhil edilmesinin sistem performansı açısından önemli iyileştirmeler sağladığını ortaya koymaktadır.

Gerçek hayat uygulamasında işletme, çalışan ve iş özelliklerine bağlı olarak bu çalışmada ele alınan öğrenme ve bozulma türleri ile bu etkilere ait parametre kombinasyonlarını kullanarak çizelgeleme çalışmalarında temel amaç olan ağırlıklı gecikme süresini azaltmaya yönelik daha etkin üretim çizelgeleri oluşturabilecektir. Geliştirilen matematiksel model küçük boyutlu problemlerde optimal çizelgeler sunarak işletmelere karar destek sağlamaktadır. Büyük boyutlu problemlerde ise çözüm sürelerinin artması nedeniyle sezgisel yaklaşım, işletmeler için kısa sürede uygulanabilir ve pratik çözümler üreten bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

Öğrenme ve bozulma etkili esnek akış tipi çizelgeleme konu alan gelecek çalışmalar için çalışan bağımlı hazırlık ve işlem sürelerinin bulunduğu sistemlerde öğrenme ve bozulma etkilerinin çalışana göre ayrı olarak belirlenmesi çalışmanın gerçek üretim ortamlarını daha da iyi yansıtabileceği düşünülmektedir. Ayrıca modelin geçerliliğini farklı endüstri ortamındaki verilerle test ederek sonuçların genellenebilirliği sağlanabilecektir.

KAYNAKÇA

- [1] Allahverdi, A., Ng, C., Cheng, T., & Kovalyov, M. Y. (2008). A survey of scheduling problems with setup times or costs. *European Journal of Operational Research*, 187 (3), 985–1032.
- [2] Azadeh, A., Goodarzi, A. H., Kolaei, M. H., & Jebreili S. (2019). An efficient simulation–neural network–genetic algorithm for flexible flow shops with sequence-dependent setup times, job deterioration and learning effects. *Neural Computing and Applications*, 31, 5327–5341.
- [3] Baker, K. R. (1974). *Introduction to Sequencing and Scheduling*. John Wiley and Sons, New York.
- [4] Baker, K. R., & Trietsch, D. (2009). *Principles of sequencing and scheduling*. John Wiley & Sons.
- [5] Biskup, D. (1999). Single-machine scheduling with learning considerations. *European Journal of Operational Research*, 115 (1), 173–178.
- [6] Biskup, D. (2008). A state-of-the-art review on scheduling with learning effects. *European Journal of Operational Research*, 188 (2), 315–329.
- [7] Blazewicz, J., Ecker, K., Pesch, E., Schmidt, G., & Węglarz, J. (2001). *Scheduling computer and manufacturing processes*. Springer.
- [8] Brucker, P. (2007). *Scheduling algorithms* (5th ed.). Springer.
- [9] Campbell, H. G., Dudek, R. A., & Smith, M. L. (1970). A heuristic algorithm for the n-job, m-machine sequencing problem. *Management Science*, 16 (10), B630–B637.
- [10] Ceylan, H. (2014). Due date single machine scheduling problems with nonlinear deterioration and learning effects and past sequence dependent setup times. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, Article 843690, 1–7.
- [11] Cheng, M. (2013). Flowshop scheduling problems with a position-dependent exponential learning effect. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, Article 753123.

- [12] Cheng, T. E., & Wang, G. (2000). Single machine scheduling with learning effect considerations. *Annals of Operations Research*, 98 (1–4), 273–290.
- [13] Cheng, T. C. E., Lai, P. J., Wu, C. C., & Lee, W. C. (2009). Single-machine scheduling with sum-of-logarithm-processing-times-based learning considerations. *Information Sciences*, 179(18), 3127–3135.
- [14] Chinyao L., & Wen-Yi L.. (2013) Some scheduling problems with time-dependent learning effect and deteriorating jobs, *Applied Mathematical Modelling*, Volume 37, Issues 20–21, Pages 8865-8875
- [15] Dantzig, G. B. (1963). *Linear Programming and Extensions*. Princeton University Press, Princeton.
- [16] Dar-Li Y., & Wen-Hung K.. (2010) Scheduling with deteriorating jobs and learning effects, *Applied Mathematics and Computation*, Volume 218, Issue 5, Pages 2069-2073
- [17] Dorigo, M., Maniezzo, V., & Colorni, A. (1996). Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 26 (1), 29–41.
- [18] Emel, G. G., & Taşkın, Ç. (2002). Genetik Algoritma ve Uygulama Alanları. *Uludağ Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 21 (1), 129–152.
- [19] Eren, T. (2004). Çok Ölçütlü Akış Tipi Çizelgeleme Problemleri İçin Çözüm Yaklaşımları. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, Ankara, 247.
- [20] Eren, T. (2012). Makine-Bağımlı Bozulma Etkili Paralel Makineli Çizelgelemede Toplam Yükleme Yöntemini Minimize Etme. *International Journal of Engineering Research and Development*, 4 (1), 22–24.
- [21] Fu, Y., Ding, J.L., Wang, H. & Wang, J.. (2018) Two-objective stochastic flow-shop scheduling with deteriorating and learning effect in Industry 4.0-based manufacturing system. *Applied Soft Computing*, 68
- [22] Fu, Y., Guo, X., & Qi, L.. (2019) Artificial-Molecule-Based Chemical Reaction Optimization for Flow Shop Scheduling Problem With Deteriorating and Learning Effects. *IEEE Access*, PP. 1-1.

- [23] Glover, F. (1989). Tabu search—part I. *ORSA Journal on Computing*, 1 (3), 190–206.
- [24] Garey, M. R., & Johnson, D. S. (1979). *Computers and intractability: A guide to the theory of NP-completeness*. W. H. Freeman.
- [25] Geyik, F. (2000). Atölye Tipi Çizelgeleme için Uzman-Tabu Arama Modeli. Doktora tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [26] Graham, R. L., Lawler, E. L., Lenstra, J. K., & Kan, A. R. (1979). Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: A survey. *Annals of Discrete Mathematics*, 5 , 287–326.
- [27] Gupta, J. N. D. (1988). Two-stage, hybrid flowshop scheduling problem. *Journal of the Operational Research Society*, 39 (4), 359–364.
- [28] Gupta, J. N. D., & Gupta, S. K. (1988). Single facility scheduling with nonlinear processing times. *Computers & Industrial Engineering*, 14 (4), 387–393.
- [29] Hatami, D., Irajpour, A., & Ehtesham Rasi, R. (2024). A Data-Driven Model for the Energy-Efficient No-Wait Flexible Flow Shop Scheduling Problem with Learning and Deteriorating Effects.
- [30] Heizer, J., & Render, B. (2001). *Operations Management* (6th ed.). Prentice Hall, New Jersey.
- [31] Heragu, S., & Ekren, B.Y. (2009). Materials handling system design. In *Facilities design* (4th ed., pp. 1–24). CRC Press.
- [32] Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor.
- [33] Jacobs, F. R., Berry, W. L., Whybark, D. C., & Vollmann, T. E. (2011). *Manufacturing planning and control for supply chain management*. McGraw-Hill Professional.
- [34] Jaber, M. Y., & Guiffrida, A. L. (2004). Learning curves for processes generating defects requiring reworks. *European Journal of Operational Research*, 159 (3), 663–672.

- [35] Kirkpatrick, S., Gelatt, J. C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220 (4598), 671–680.
- [36] Koulamas, C., & Kyparisis, G. J. (2007). Single-machine and two-machine flowshop scheduling with general learning function. *European Journal of Operational Research*, 178 (2), 402–407.
- [37] Kuo, W.-H., & Yang, D.-L. (2006). Minimizing the makespan in a single machine scheduling problem with a time-based learning effect. *Information Processing Letters*, 97 (2), 64–67.
- [38] Kurniawan, D., Cakravastia, A., Suprayogi, S. & Abdul Halim, A.. (2021) A flow shop batch scheduling and operator assignment model with time- changing effects of learning and forgetting to minimize total actual flow time. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 13, 546.
- [39] Lawler, E. L., & Wood, D. E. (1966). Branch-and-bound methods: A survey. *Operations Research*, 14 (4), 699–719.
- [40] Lee, H.-T., Yang, D.-L., & Yang, S.-J. (2013). Multi-machine scheduling with deterioration effects and maintenance activities for minimizing the total earliness and tardiness costs. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66 (1–4), 547–554.
- [41] Lee, W. C., & Wu, C. C. (2004). Minimizing total completion time in a two-machine flowshop with a learning effect. *International Journal of Production Economics*, 88 (1), 85–93.
- [42] Li, X., Yang, Z., Ruiz, R., Chen, T., & Sui, S. (2018). An iterated greedy heuristic for no-wait flow shops with sequence dependent setup times, learning and forgetting effects. *Information Sciences*, 453, 408-425.
- [43] Li, S.-S., Chen, R.-X., Feng, Q., & Jiao, C.-W. (2019). Parallel-machine scheduling with job-dependent cumulative deterioration effect and rejection. *Journal of Combinatorial Optimization*, 38 (3), 957–971.
- [44] Liang, X., Zhang, B., Wang, J., Yin, N., & Huang, X. (2019). Study on flow shop scheduling with sum-of-logarithm-processing-times-based learning effects. *Journal of Applied Mathematics and Computing*, 61 (1–2), 373–388.

- [45] Lv, Z.-G., Zhang, L.-H., Wang, X.-Y., & Wang, J.-B. (2024). Single Machine Scheduling Proportionally Deteriorating Jobs with Ready Times Subject to the Total Weighted Completion Time Minimization. *Mathematics*, 12 (4), 610.
- [46] Mansfield, R. A. (1990). Genetic algorithms. University of Wales College of Cardiff.
- [47] Metropolis, N., Rosenbluth, A., Rosenbluth, M., Teller, A., & Teller, E. (1953). Equation of state calculations by fast computing machines. *Journal of Chemical Physics*, 21 (6), 1087–1092.
- [48] Miao, C., Meng, F., Zou, J., & Jia, B. (2017). Batch scheduling with proportional-linear deterioration and outsourcing. *Mathematical Problems in Engineering*.
- [49] Molina-Sánchez, L. P., & González-Neira, E. M. (2016). GRASP to minimize total weighted tardiness in a permutation flow shop environment. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7(1), 161–176.
- [50] Mosheiov, G. (2001). Scheduling problems with a learning effect. *European Journal of Operational Research*, 132 (3), 687–693.
- [51] Mosheiov, G., & Sidney, J. B. (2003). Scheduling with general job-dependent learning curves. *European Journal of Operational Research*, 147 (3), 665–670.
- [52] Mosheiov, G. (2005). A note on scheduling deteriorating jobs. *Mathematical and Computer Modelling*, 41 (8–9), 883–886.
- [53] Nahmias, S., & Olsen, T. L. (2015). *Production and operations analysis* (7th ed.). Waveland Press.
- [54] Nocedal, J., & Wright, S. J. (2006). *Numerical optimization* (2nd ed.). Springer Science & Business Media.
- [55] Pearl, J. (1984). *Heuristics: Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving*.
- [56] Pinedo, M. L. (2008). *Scheduling: Theory, Algorithms and Systems* (3rd ed.). Springer.

- [57] Ribas, I., Leisten, R., & Framinan, J. M. (2010). Review and classification of hybrid flow shop scheduling problems from a production system and a solutions procedure perspective. *Computers and Operations Research*, 37 (8), 1439–1454.
- [58] Ruiz, R., & Vázquez-Rodríguez, J. A. (2010). The hybrid flow shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 205 (1), 1–18.
- [59] Seidgar, H., Abedi, M., & Rad, S. T. (2015). A new mathematical model for scheduling flexible flow shop problem with learning and forgetting effects of workers. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 21 (4), 534–549.
- [60] Tyagi, D., Saider, H., Abedi, M., & Chandramouli, A. (2014). Learning and forgetting effects of flexible flow shop scheduling. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 7 (3), 857–867.
- [61] Touafek, N., Ladj, A., Benbouzid-Si Tayeb, F., Dahamni, A., & Baghdadi, R. (2022). Permutation flowshop scheduling problem considering learning, deteriorating effects and flexible maintenance. *Procedia Computer Science*, 207, 2518–2525.
- [62] Touafek, N., Benbouzid-Si Tayeb, F., & Ladj, A. (2023). A reinforcement-learning-driven artificial bee colony algorithm for scheduling jobs and flexible maintenance under learning and deteriorating effects. *Algorithms*, 16(9), 397
- [63] Touafek, N., Benbouzid-Si Tayeb, F., Ladj, A., & Baghdadi, R. (2025). Advanced optimization of flowshop scheduling with maintenance, learning and deteriorating effects leveraging surrogate modeling approaches. *Mathematics*, 13(15)
- [64] Wang, J.-B. (2007) A note on scheduling problems with learning effect and deteriorating jobs, *International Journal of Systems Science*, 37:12, 827-833.
- [65] Wang, J. & Lin, L. & Shan, F. (2008) Flow shop scheduling with effects of learning and deterioration. *Journal of Applied Mathematics and Computing*, 26, 367-379.
- [66] Wang, J.-B. & Liu, L.. (2009) Two-machine flow shop problem with effects of deterioration and learning. *Computers & Industrial Engineering*, 57, 1114-1121.
- [67] Wang, J.-B., Wang, D., Wang, L.-Y., Lin, L., Yin, N., & Wang, W.-W. (2009). Single machine scheduling with exponential time-dependent learning effect and past-

sequence-dependent setup times. *Computers & Mathematics with Applications*, 57 (1), 9–16.

[68] Wang, J.-B., Ji, P., Cheng, T. C. E. & Wang, D.. (2012) Minimizing makespan in a two-machine flow shop with effects of deterioration and learning. *Optimization Letters*, 6, 1-17.

[69] Wright, T. P. (1936). Factors affecting the cost of airplanes. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 3 (4), 122–128.

[70] Wu, C.-C., Yin, Y., Wu, W.-H., & Cheng, S.-R. (2012). Some polynomial solvable single-machine scheduling problems with a truncation sum-of-processing-times based learning effect. *European Journal of Industrial Engineering*, 6 (4), 441–453.

[71] Yang, Y., Kreipl, S., & Pinedo, M. (2000). Heuristics for minimizing total weighted tardiness in flexible flow shops. *Journal of Scheduling*, 3(2), 89–108.

[72] Yang, D. L., & Kuo, W. H. (2009). Single-machine scheduling with both deterioration and learning effects. *Annals of Operations Research*, 172, 315–327.

[73] Yelle, L. E. (1979). The learning curve: Historical review and comprehensive survey. *Decision Sciences*, 10 (2), 302–328.

EKLER

EK 1 Aşama 2 'de Çalışan 3 İçin Hazırlık Süreleri (dakika)

	Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü5	Ü6	Ü7	Ü8	Ü9	Ü10	Ü11	Ü12	Ü13	Ü14
Ü1	0	24	31	37	36	35	39	37	34	39	92	93	95	91
Ü2	25	0	37	35	38	39	36	36	39	35	94	97	96	93
Ü3	50	51	0	58	60	57	61	63	68	64	66	68	63	64
Ü4	67	70	68	0	39	41	42	58	60	61	59	61	58	60
Ü5	64	62	71	43	0	39	40	62	64	65	62	63	55	64
Ü6	65	68	70	37	42	0	41	58	61	62	59	61	64	62
Ü7	66	69	72	40	38	35	0	64	59	66	63	68	66	67
Ü8	48	43	41	55	52	51	50	0	28	27	58	57	60	57
Ü9	44	47	38	50	51	54	52	25	0	26	62	63	62	61
Ü10	46	45	40	53	50	53	53	24	28	0	64	59	63	60
Ü11	64	61	48	63	65	65	81	81	90	93	0	39	34	37
Ü12	63	62	47	66	65	65	83	83	83	85	38	0	36	38
Ü13	59	62	50	62	63	64	80	80	81	84	35	37	0	32
Ü14	63	64	45	64	62	60	81	81	82	80	32	37	38	0

EK 2 Aşama 2 'de Çalışan 4 İçin Hazırlık Süreleri (dakika)

	Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü5	Ü6	Ü7	Ü8	Ü9	Ü10	Ü11	Ü12	Ü13	Ü14
Ü1	0	21	27	33	34	32	30	30	32	31	89	88	86	89
Ü2	20	0	30	32	36	31	33	33	35	35	87	90	91	92
Ü3	45	47	0	52	54	53	50	57	62	60	57	60	59	55
Ü4	50	52	62	46	47	50	48	34	32	34	52	54	49	54
Ü5	58	61	64	0	32	34	30	53	51	54	56	59	55	52
Ü6	56	55	63	31	0	32	35	52	53	56	54	58	55	56
Ü7	57	60	66	32	35	0	33	51	50	51	53	56	60	53
Ü8	59	58	35	34	36	31	0	55	54	52	51	50	54	52
Ü9	41	39	32	46	45	48	45	0	22	21	55	51	50	54
Ü10	37	36	30	48	49	46	44	20	0	23	53	51	52	54
Ü11	58	60	42	58	60	59	58	73	75	72	0	30	30	32
Ü12	60	59	40	60	61	58	60	75	72	74	31	0	33	34
Ü13	58	61	43	55	57	60	58	76	74	71	30	31	0	34
Ü14	60	56	44	58	61	62	59	77	74	75	30	32	31	0

EK 3 Aşama 3 'de Çalışan 5 İçin Hazırlık Süreleri(dakika)

	Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü5	Ü6	Ü7	Ü8	Ü9	Ü10	Ü11	Ü12	Ü13	Ü14
Ü1	0	22	31	37	39	39	38	35	36	35	59	60	61	58
Ü2	23	0	29	40	44	36	37	32	42	38	55	61	58	57
Ü3	49	48	0	47	51	50	46	48	46	45	55	57	55	56
Ü4	33	32	33	0	20	23	24	30	32	33	37	38	41	41
Ü5	35	34	32	26	0	29	25	35	34	31	38	39	34	38
Ü6	30	33	30	20	24	0	21	34	31	30	42	40	39	37
Ü7	36	37	28	24	22	21	0	36	32	33	39	35	36	38
Ü8	55	54	37	50	53	48	49	0	20	25	49	47	51	55
Ü9	57	52	36	55	54	50	51	20	0	21	49	52	52	47
Ü10	53	52	32	51	52	48	45	24	22	0	49	45	48	50
Ü11	48	50	55	54	57	57	55	53	50	54	0	25	22	21
Ü12	45	49	53	53	52	50	54	56	59	53	27	0	28	24
Ü13	49	48	59	51	50	52	52	54	50	51	21	20	0	23
Ü14	45	46	56	53	51	50	54	54	52	51	26	22	25	0

EK 4 Aşama 3 'de Çalışan 6 İçin Hazırlık Süreleri (dakika)

	Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü5	Ü6	Ü7	Ü8	Ü9	Ü10	Ü11	Ü12	Ü13	Ü14
Ü1	0	22	31	37	39	39	38	35	36	35	59	60	61	58
Ü2	25	0	35	38	43	36	39	36	37	32	64	62	64	55
Ü3	55	56	0	57	56	59	57	54	51	55	60	64	62	61
Ü4	44	40	38	0	28	24	30	41	45	42	45	44	46	45
Ü5	41	39	41	26	0	27	34	42	38	39	44	43	46	46
Ü6	43	41	37	27	29	0	26	44	43	45	41	40	44	38
Ü7	42	39	40	30	28	28	0	45	41	36	41	45	39	46
Ü8	64	62	41	55	54	56	56	0	26	29	60	55	56	59
Ü9	61	64	43	63	60	59	57	28	0	31	56	59	57	51
Ü10	58	60	44	61	59	58	61	27	25	0	57	55	57	58
Ü11	55	54	62	66	62	65	67	62	58	57	0	31	30	32
Ü12	52	56	64	62	60	63	64	61	62	62	34	0	35	39
Ü13	57	58	67	66	61	60	63	62	59	64	31	35	0	32
Ü14	53	56	66	67	64	62	63	63	64	60	31	34	32	0

EK 5 Aşama 3 'de Çalışan 7 İçin Hazırlık Süreleri (dakika)

	Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü5	Ü6	Ü7	Ü8	Ü9	Ü10	Ü11	Ü12	Ü13	Ü14
Ü1	0	35	48	56	57	56	58	49	48	50	83	81	82	83
Ü2	37	0	51	55	58	59	61	55	51	54	85	80	84	86
Ü3	69	67	0	69	68	66	69	68	66	67	93	94	94	91
Ü4	59	51	47	0	41	43	40	53	54	52	58	59	57	51
Ü5	63	64	50	44	0	42	41	57	56	53	63	62	60	62
Ü6	65	62	52	41	40	0	41	54	51	50	63	59	64	59
Ü7	64	61	49	43	42	43	0	52	48	51	59	61	60	64
Ü8	81	85	46	78	83	80	77	0	42	45	68	63	65	67
Ü9	85	87	48	79	76	75	75	44	0	40	70	70	67	66
Ü10	84	83	49	77	81	81	80	40	43	0	70	71	72	67
Ü11	68	69	75	70	73	71	68	68	71	70	0	42	45	44
Ü12	71	69	82	73	71	74	70	68	69	73	47	0	46	50
Ü13	66	70	76	75	72	73	72	74	76	71	43	44	0	41
Ü14	73	72	81	72	71	75	74	72	69	74	44	48	47	0

EK 6 Aşama 7 'de Çalışan 14 İçin Hazırlık Süreleri (dakika)

	Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü5	Ü6	Ü7	Ü8	Ü9	Ü10	Ü11	Ü12	Ü13	Ü14
Ü1	0	27	49	53	58	55	46	58	0	0	0	0	63	69
Ü2	28	0	47	52	56	60	51	57	0	0	0	0	67	64
Ü3	49	57	0	45	46	39	44	50	0	0	0	0	62	50
Ü4	52	51	40	0	51	44	40	62	0	0	0	0	71	55
Ü5	46	58	31	48	0	50	49	45	0	0	0	0	48	53
Ü6	48	54	49	39	47	0	44	41	0	0	0	0	46	52
Ü7	47	54	47	55	39	42	0	69	0	0	0	0	73	71
Ü8	72	76	50	59	51	55	51	0	0	0	0	0	30	26
Ü9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ü10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ü11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ü12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ü13	56	63	72	71	71	69	26	29	0	0	0	0	0	69
Ü14	49	57	45	46	44	39	50	62	53	0	0	0	50	0

EK 7 Aşama 7 'de Çalışan 15 İçin Hazırlık Süreleri (dakika)

	Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü5	Ü6	Ü7	Ü8	Ü9	Ü10	Ü11	Ü12	Ü13	Ü14
Ü1	0	27	49	53	58	55	46	58	0	0	0	0	89	82
Ü2	28	0	47	52	56	60	51	57	0	0	0	0	87	76
Ü3	49	57	0	45	46	39	44	50	0	0	0	0	81	79
Ü4	52	51	40	0	51	44	40	62	0	0	0	0	76	67
Ü5	46	58	31	48	0	50	49	45	0	0	0	0	76	74
Ü6	48	54	49	39	47	0	44	41	0	0	0	0	71	80
Ü7	47	54	47	55	39	42	0	69	0	0	0	0	88	70
Ü8	72	76	50	59	51	55	51	0	0	0	0	0	77	57
Ü9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ü10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ü11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ü12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ü13	75	81	88	93	99	99	59	55	0	0	0	0	0	65
Ü14	65	66	87	79	83	87	92	98	0	0	0	0	79	0

EK 8 Aşama 7 'de Çalışan 16 İçin Hazırlık Süreleri (dakika)

	Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü5	Ü6	Ü7	Ü8	Ü9	Ü10	Ü11	Ü12	Ü13	Ü14
Ü1	0	37	55	57	53	52	59	55	0	0	0	0	63	56
Ü2	31	0	52	50	48	57	53	72	0	0	0	0	69	59
Ü3	49	56	0	49	45	49	42	66	0	0	0	0	75	72
Ü4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ü5	52	58	46	0	36	43	47	72	0	0	0	0	69	60
Ü6	54	46	37	49	0	43	44	68	0	0	0	0	62	66
Ü7	49	50	41	52	44	0	43	72	0	0	0	0	65	62
Ü8	53	58	44	42	45	48	0	64	0	0	0	0	56	55
Ü9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ü10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ü11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ü12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ü13	83	80	72	65	72	71	27	25	0	0	0	0	0	69
Ü14	49	56	49	45	42	49	66	75	0	0	0	0	0	72

EK 9 Hafta 2 için Temel İşlem Süreleri (saat)

Parti Kodu	Aşama 1	Aşama 2	Aşama 3	Aşama 7	Aşama 8
Ü3-2	1,97	4,43	3,01	2,64	0
Ü3-3	1,97	4,43	3,01	2,64	0
Ü3-4	1,97	4,43	3,01	2,64	0
Ü1-2	1,04	2,80	1,86	2,83	0
Ü2-2	1,12	3,15	2,19	3,10	0
Ü5-1	2,00	4,89	2,99	2,74	0
Ü5-2	2,00	4,89	2,99	2,74	0

EK 10 Hafta 2 ve Aşama 4 için Çalışan Bağımlı İşlem Süreleri (saat)

Parti Kodu	Ü3-2	Ü3-3	Ü3-4	Ü1-2	Ü2-2	Ü5-1	Ü5-2
Çalışan 8	8,54	8,54	8,54	3,90	3,97	8,61	8,61
Çalışan 9	8,26	8,26	8,26	3,98	4,19	8,73	8,73
Çalışan 10	6,73	6,73	6,73	3,39	3,65	6,80	6,80
Çalışan 11	6,04	6,04	6,04	3,1	3,58	6,11	6,11
Çalışan 12	6,87	6,87	6,87	3,4	3,67	6,57	6,57
Çalışan 13	4,22	4,22	4,22	3,00	2,59	4,20	4,20

EK 11 Hafta 2 ve Aşama 5 için Çalışan Bağımlı İşlem Süreleri (saat)

Parti Kodu	Ü3-2	Ü3-3	Ü3-4	Ü1-2	Ü2-2	Ü5-1	Ü5-2
Çalışan 8	8,22	8,22	8,22	4,96	5,13	7,64	7,64
Çalışan 9	7,71	7,71	7,71	5,02	5,34	8,33	8,33
Çalışan 10	6,34	6,34	6,34	4,31	4,65	6,34	6,34
Çalışan 11	5,80	5,80	5,80	3,90	4,45	5,87	5,87
Çalışan 12	6,35	6,35	6,35	4,29	4,57	6,73	6,73
Çalışan 13	6,40	6,40	6,40	3,70	4,30	4,10	4,10

EK 12 Hafta 2 ve Aşama 6 için Çalışan Bağımlı İşlem Süreleri (saat)

Parti Kodu	Ü3-2	Ü3-3	Ü3-4	Ü1-2	Ü2-2	Ü5-1	Ü5-2
Çalışan 8	8,86	8,86	8,86	14,50	14,77	8,96	8,96
Çalışan 9	8,81	8,81	8,81	14,83	15,61	9,37	9,37
Çalışan 10	7,33	7,33	7,33	13,44	13,6	7,09	7,09
Çalışan 11	6,34	6,34	6,34	12,74	13,34	6,39	6,39
Çalışan 12	7,57	7,57	7,57	13,55	13,66	6,95	6,95
Çalışan 13	6,12	6,12	6,12	9,97	10,85	5,41	5,41

EK 13 Hafta 2 için Çalışan Bağımlı İlk Hazırlık Süreleri (saat)

Parti Kodu	Ç2	Ç3	Ç4	Ç5	Ç6	Ç7	Ç14	Ç15	Ç16
Ü3-2	0,42	0,36	0,31	0,29	0,32	0,47	0,50	0,80	0,54
Ü3-3	0,42	0,36	0,31	0,29	0,32	0,47	0,50	0,80	0,54
Ü3-4	0,42	0,36	0,31	0,29	0,32	0,47	0,50	0,80	0,54
Ü1-2	0,96	0,85	0,74	0,46	0,57	0,78	0,66	1,23	0,69
Ü2-2	0,96	0,88	0,81	0,45	0,52	0,75	0,68	1,21	0,78
Ü5-1	0,50	0,47	0,36	0,39	0,39	0,57	0,67	0,89	0,60
Ü5-2	0,54	0,47	0,36	0,35	0,39	0,57	0,67	0,89	0,60

EK 14 Hafta 3 için Temel İşlem Süreleri (saat)

Parti Kodu	Aşama 1	Aşama 2	Aşama 3	Aşama 7	Aşama 8
Ü5-3	2	4,89	2,99	2,74	0
Ü5-4	2	4,89	2,99	2,74	0
Ü13-1	1,33	3,08	2,89	1,41	0,19
Ü13-2	1,33	3,08	2,89	1,41	0,19
Ü13-3	1,33	3,08	2,89	1,41	0,19
Ü13-4	1,33	3,08	2,89	1,41	0,19

EK 15 Hafta 3 ve Aşama 4 için Çalışan Bağımlı İşlem Süreleri (saat)

Parti Kodu	Ü5-3	Ü5-4	Ü13-1	Ü13-2	Ü13-3	Ü13-4
Çalışan 8	8,61	8,61	5,17	5,17	5,17	5,17
Çalışan 9	8,73	8,73	4,60	4,60	4,60	4,60
Çalışan 10	6,80	6,80	4,24	4,24	4,24	4,24
Çalışan 11	6,11	6,11	3,90	3,90	3,90	3,90
Çalışan 12	6,57	6,57	4,52	4,52	4,52	4,52
Çalışan 13	4,20	4,20	3,40	3,40	3,40	3,40

EK 16 Hafta 3 ve Aşama 5 için Çalışan Bağımlı İşlem Süreleri (saat)

Parti Kodu	Ü5-3	Ü5-4	Ü13-1	Ü13-2	Ü13-3	Ü13-4
Çalışan 8	7,64	7,64	5,84	5,84	5,84	5,84
Çalışan 9	8,33	8,33	5,48	5,48	5,48	5,48
Çalışan 10	6,34	6,34	5,33	5,33	5,33	5,33
Çalışan 11	5,87	5,87	4,08	4,08	4,08	4,08
Çalışan 12	6,73	6,73	5,20	5,20	5,20	5,20
Çalışan 13	4,10	4,10	5,00	5,00	5,00	5,00

EK 17 Hafta 3 ve Aşama 6 için Çalışan Bağımlı İşlem Süreleri (saat)

Parti Kodu	Ü5-3	Ü5-4	Ü13-1	Ü13-2	Ü13-3	Ü13-4
Çalışan 8	8,96	8,96	0	0	0	0
Çalışan 9	9,37	9,37	0	0	0	0
Çalışan 10	7,09	7,09	0	0	0	0
Çalışan 11	6,39	6,39	0	0	0	0
Çalışan 12	6,95	6,95	0	0	0	0
Çalışan 13	5,41	5,41	0	0	0	0

EK 18 Hafta 3 için Çalışan Bağımlı İlk Hazırlık Süreleri (saat)

Parti Kodu	Ç2	Ç3	Ç4	Ç5	Ç6	Ç7	Ç14	Ç15	Ç16
Ü5-3	0,55	0,45	0,52	0,49	0,68	0,66	0,78	0,7	0,68
Ü5-4	0,55	0,45	0,52	0,49	0,68	0,66	0,78	0,7	0,68
Ü13-1	0,44	0,4	0,36	0,15	0,22	0,27	0,26	0,49	0,24
Ü13-2	0,44	0,4	0,36	0,157	0,22	0,2	0,26	0,49	0,24
Ü13-3	0,44	0,4	0,36	0,1	0,22	0,27	0,26	0,49	0,24
Ü13-4	0,44	0,4	0,36	0,15	0,22	0,27	0,26	0,49	0,24

EK 19 Hafta 4 için Temel İşlem Süreleri (saat)

Parti Kodu	Aşama 1	Aşama 2	Aşama 3	Aşama 7	Aşama 8
Ü13-5	1,33	3,08	2,89	1,41	0,19
Ü13-6	1,33	3,08	2,89	1,41	0,192
Ü9	4,11	17,78	11,36	0	1,56
Ü10	5,13	21,87	14,33	0	1,70
Ü11	4,19	18,59	12,5	0	1,68
Ü12	4,37	18,26	11,81	0	1,43

EK 20 Hafta 4 ve Aşama 4 için Çalışan Bağımlı İşlem Süreleri (saat)

Parti Kodu	Ü13-5	Ü13-6	Ü9	Ü10	Ü11	Ü12
Çalışan 8	5,17	5,17	0	0	0	0
Çalışan 9	4,60	4,60	0	0	0	0
Çalışan 10	4,24	4,24	0	0	0	0
Çalışan 11	3,90	3,90	0	0	0	0
Çalışan 12	4,52	4,52	0	0	0	0
Çalışan 13	3,40	3,40	0	0	0	0

EK 21 Hafta 4 ve Aşama 5 için Çalışan Bağımlı İşlem Süreleri (saat)

Parti Kodu	Ü13-5	Ü13-6	Ü9	Ü10	Ü11	Ü12
Çalışan 8	5,84	5,84	0	0	0	0
Çalışan 9	5,48	5,48	0	0	0	0
Çalışan 10	5,33	5,33	0	0	0	0
Çalışan 11	4,09	4,09	0	0	0	0
Çalışan 12	5,21	5,21	0	0	0	0
Çalışan 13	5,01	5,01	0	0	0	0

EK 22 Hafta 4 ve Aşama 6 için Çalışan Bağımlı İşlem Süreleri (saat)

Parti Kodu	Ü13-5	Ü13-6	Ü9	Ü10	Ü11	Ü12
Çalışan 8	0	0	0	0	0	0
Çalışan 9	0	0	0	0	0	0
Çalışan 10	0	0	0	0	0	0
Çalışan 11	0	0	0	0	0	0
Çalışan 12	0	0	0	0	0	0
Çalışan 13	0	0	0	0	0	0

EK 23 Hafta 4 için Çalışan Bağımlı İlk Hazırlık Süreleri (saat)

Parti Kodu	Ç2	Ç3	Ç4	Ç5	Ç6	Ç7	Ç14	Ç15	Ç16
Ü13-5	0,79	0,73	0,65	0,48	0,57	0,69	0	0	0
Ü13-6	0,79	0,73	0,65	0,48	0,57	0,69	0	0	0
Ü9	0,87	0,77	0,67	0,54	0,67	0,75	0	0	0
Ü10	0,83	0,69	0,60	0,53	0,65	0,71	0	0	0
Ü11	0,80	0,73	0,60	0,56	0,65	0,73	0	0	0
Ü12	0,58	0,66	0,58	0,46	0,69	0,72	0	0	0

EK 24 Pozisyon Bağımlı Öğrenme Etkili WEDD Sezgiseli için Hafta 1 Sonuçları

Parti Kodu	Ü14-1	Ü14-2	Ü3-1	Ü1-1	Ü2-1
Teslim Zamanı	54	54	54	54	54
Gecikme Zamanı	0	0	0	0	0
Önem Derecesi	7	7	7	3	3
Ağırlıklı Gecikme	0	0	0	0	0
Hafta 1 -Toplam Gecikme	0				

EK 25 Pozisyon Bağımlı Öğrenme Etkili WEDD Sezgiseli için Hafta 2 Sonuçları

Parti Kodu	Ü3-2	Ü3-3	Ü3-4	Ü1-2	Ü2-2	Ü5-1	Ü5-2
Teslim Zamanı	54	54	54	54	54	54	54
Gecikme Zamanı	0	0	0	0	4,01	5,90	0
Önem Derecesi	7	7	7	3	3	7	7
Ağırlıklı Gecikme	0	0	0	0	12,03	41,33	0
Hafta 2 -Toplam Gecikme	53,36						

EK 26 Pozisyon Bağımlı Öğrenme Etkili WEDD Sezgiseli için Hafta 3 Sonuçları

Parti Kodu	Ü5-3	Ü5-4	Ü13-1	Ü13-2	Ü13-3	Ü13-4
Teslim Zamanı	54	54	54	54	54	54
Gecikme Zamanı	0	0	0	0	0	0
Önem Derecesi	7	7	6	6	6	6
Ağırlıklı Gecikme	0	0	0	0	0	0
Hafta 3 -Toplam Gecikme	0					

EK 27 Pozisyon Bağımlı Öğrenme Etkili WEDD Sezgiseli için Hafta 4 Sonuçları

Parti Kodu	Ü13-5	Ü13-6	Ü9	Ü10	Ü11	Ü12
Teslim Zamanı	54	54	54	54	54	54
Gecikme Zamanı	0	2,34	0	0	0	6,26
Önem Derecesi	6	6	9	10	9	9
Ağırlıklı Gecikme	0	14,04	0	0	0	56,33
Hafta 4 -Toplam Gecikme	70,37					

EK 28 Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma Etkili WEDD Sezgiseli için Hafta 1 Sonuçları

Parti Kodu	Ü14-1	Ü14-2	Ü3-1	Ü1-1	Ü2-1
Teslim Zamanı	54	54	54	54	54
Gecikme Zamanı	0	0	0	0	0
Önem Derecesi	7	7	7	3	3
Ağırlıklı Gecikme	0	0	0	0	0
Hafta 1 -Toplam Gecikme	0				

EK 29 Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma Etkili WEDD Sezgiseli için Hafta 2 Sonuçları

Parti Kodu	Ü3-2	Ü3-3	Ü3-4	Ü1-2	Ü2-2	Ü5-1	Ü5-2
Teslim Zamanı	54	54	54	54	54	54	54
Gecikme Zamanı	0	0	0	0	16,08	0	20,01
Önem Derecesi	7	7	7	3	3	7	7
Ağırlıklı Gecikme	0	0	0	0	48,25	0	140,04
Hafta 2 -Toplam Gecikme	188,29						

EK 30 Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma Etkili WEDD Sezgiseli için
Hafta 3 Sonuçları

Parti Kodu	Ü5-3	Ü5-4	Ü13-1	Ü13-2	Ü13-3	Ü13-4
Teslim Zamanı	54	54	54	54	54	54
Gecikme Zamanı	0	0	0	0	0	0
Önem Derecesi	7	7	7	3	3	7
Ağırlıklı Gecikme	0	0	0	0	0	0
Hafta 3 -Toplam Gecikme	0					

EK 31 Pozisyona Dayalı Üstel Öğrenme ve Bozulma Etkili WEDD Sezgiseli için
Hafta 4 Sonuçları

Parti Kodu	Ü13-5	Ü13-6	Ü9	Ü10	Ü11	Ü12
Teslim Zamanı	54	54	54	54	54	54
Gecikme Zamanı	0	2,32	0	0	0	6,26
Önem Derecesi	6	6	9	10	9	9
Ağırlıklı Gecikme	0	13,92	0	0	0	56,33
Hafta 4 -Toplam Gecikme	70,25					

EK 32 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma Etkili
WEDD Sezgiseli için Hafta 1 Sonuçları

Parti Kodu	Ü14-1	Ü14-2	Ü3-1	Ü1-1	Ü2-1
Teslim Zamanı	54	54	54	54	54
Gecikme Zamanı	0	0	0	0	0
Önem Derecesi	7	7	7	3	3
Ağırlıklı Gecikme	0	0	0	0	0
Hafta 1 -Toplam Gecikme	0				

**EK 33 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma Etkili
WEDD Sezgiseli için Hafta 2 Sonuçları**

Parti Kodu	Ü3-2	Ü3-3	Ü3-4	Ü1-2	Ü2-2	Ü5-1	Ü5-2
Teslim Zamanı	54	54	54	54	54	54	54
Gecikme Zamanı	0	0	0	0	11,98	4,61	0
Önem Derecesi	7	7	7	3	3	7	7
Ağırlıklı Gecikme	0	0	0	0	43,19	32,29	0
Hafta 2 -Toplam Gecikme	68,24						

**EK 34 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma Etkili
WEDD Sezgiseli için Hafta 3 Sonuçları**

Parti Kodu	Ü5-3	Ü5-4	Ü13-1	Ü13-2	Ü13-3	Ü13-4
Teslim Zamanı	54	54	54	54	54	54
Gecikme Zamanı	0	0	0	0	0	0
Önem Derecesi	7	7	7	3	3	7
Ağırlıklı Gecikme	0	0	0	0	0	0
Hafta 3 -Toplam Gecikme	0					

**EK 35 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyona Dayalı Üstel Bozulma Etkili
WEDD Sezgiseli için Hafta 4 Sonuçları**

Parti Kodu	Ü13-5	Ü13-6	Ü9	Ü10	Ü11	Ü12
Teslim Zamanı	54	54	54	54	54	54
Gecikme Zamanı	4,43	8,22	0	0	0	2,07
Önem Derecesi	6	6	9	10	9	9
Ağırlıklı Gecikme	26,56	49,17	0	0	0	18,61
Hafta 4 -Toplam Gecikme	94,33					

EK 36 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma Etkili WEDD
Sezgiseli için Hafta 1 Sonuçları

Parti Kodu	Ü14-1	Ü14-2	Ü3-1	Ü1-1	Ü2-1
Teslim Zamanı	54	54	54	54	54
Gecikme Zamanı	0	0	0	0	0
Önem Derecesi	7	7	7	3	3
Ağırlıklı Gecikme	0	0	0	0	0
Hafta 1 -Toplam Gecikme	0				

EK 37 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma Etkili WEDD
Sezgiseli için Hafta 2 Sonuçları

Parti Kodu	Ü3-2	Ü3-3	Ü3-4	Ü1-2	Ü2-2	Ü5-1	Ü5-2
Teslim Zamanı	54	54	54	54	54	54	54
Gecikme Zamanı	0	0	0	0	12,59	3,20	1,87
Önem Derecesi	7	7	7	3	3	7	7
Ağırlıklı Gecikme	0	0	0	0	37,75	44,72	13,12
Hafta 2 -Toplam Gecikme	95,59						

EK 38 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma Etkili WEDD
Sezgiseli için Hafta 3 Sonuçları

Parti Kodu	Ü5-3	Ü5-4	Ü13-1	Ü13-2	Ü13-3	Ü13-4
Teslim Zamanı	54	54	54	54	54	54
Gecikme Zamanı	0	0	0	0	0	0
Önem Derecesi	7	7	7	3	3	7
Ağırlıklı Gecikme	0	0	0	0	0	0
Hafta 3 -Toplam Gecikme	0					

EK 39 Pozisyon Bağımlı Öğrenme ve Pozisyon Bağımlı Bozulma Etkili WEDD
Sezgiseli için Hafta 4 Sonuçları

Parti Kodu	Ü13-5	Ü13-6	Ü9	Ü10	Ü11	Ü12
Teslim Zamanı	54	54	54	54	54	54
Gecikme Zamanı	0	2,34	0	0	0	6,26
Önem Derecesi	6	6	9	10	9	9
Ağırlıklı Gecikme	0	14,04	0	0	0	56,33
Hafta 4 -Toplam Gecikme	70,37					

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Şeyma AYDIN

Doğum Yeri ve Tarihi :

Yabancı Dili : İngilizce

İletişim (Telefon/e-posta) :

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Manisa Şehzade Mehmet Lisesi (2013)

Lisans : Manisa Celal Bayar Üniversitesi (2017)

Yüksek Lisans : Manisa Celal Bayar Üniversitesi (2025)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl :

Yayınları (SCI ve diğer) :

AYDIN Şeyma, SANCAR EDİS, Rahime (2025), Makine Çizelgelemede Öğrenme ve Bozulma Etkisinin Literatür Taraması, Araştırma, Geliştirme ve Yenilikçilik Konularında Güncel Çalışmalar, Sidas Medya, 249-270, (E-kitap).