

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

**ENTEGRE PROSES PLANLAMA, ÇİZELGELEME, TESLİM TARİHİ
BELİRLEME VE TESLİMAT**

DOKTORA TEZİ

Onur CANPOLAT

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

MART 2023

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

**ENTEGRE PROSES PLANLAMA, ÇİZELGELEME, TESLİM TARİHİ
BELİRLEME VE TESLİMAT**

DOKTORA TEZİ

Onur CANPOLAT

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Halil İbrahim DEMİR

MART 2023

Onur Canpolat tarafından hazırlanan “ENTEĞRE PROSES PLANLAMA, ÇİZELGELEME, TESLİM TARİHİ BELİRLEME VE TESLİMAT” adlı tez çalışması 02.03.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :

Jüri Üyesi :

Jüri Üyesi :

Jüri Üyesi :

Jüri Üyesi :



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “ENTEĞRE PROSES PLANLAMA, ÇİZELGELEME, TESLİM TARİHİ BELİRLEME VE TESLİMAT” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(02/03/2023)

Onur Canpolat





Aileme...



TEŞEKKÜR

Hayatımın her anında daima yanımda olan annem ve babam başta olmak üzere, çalışmam boyunca bana her anlamda destek olan saygıdeğer eşim Kadriye Canpolat'a ve kızım Elif Sare'ye gönülden teşekkür ederim. Hem akademik anlamda hem de sosyal anlamda bilgi birikimi ve tecrübesiyle danışmanlığımı yapan pek kıymetli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Halil İbrahim DEMİR'e ve öneri ve yorumlarıyla çalışmama destek olan hocalarım Sayın Prof. Dr. İbrahim ÇİL'e ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ali GÜLBAĞ'a şükranlarımı sunarım. Son olarak tanıdığım günden itibaren ihtiyaç duyduğum her an desteklerini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Alper KİRAZ'a ve Sayın Arş. Gör. Enes Furkan ERKAN'a teşekkür ederim.

Onur CANPOLAT



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Özgün Değeri	2
1.2. Çalışmanın Getirileri	3
1.3. Tezin Yapısı ve Algoritmalar	4
2. FONKSİYONLAR	5
2.1. Proses Planlama	5
2.2. Çizelgeleme	6
2.2.1. Çizelgeleme notasyonları	7
2.2.2. Çizelgeleme kuralları	8
2.3. Teslim Tarihi Belirleme	9
2.3.1. Teslim tarihi belirleme kuralları	10
2.3.1.1. CON (Ortak)	10
2.3.1.2. SLK (Eşit pay)	11
2.3.1.3. WSLK (Ağırlıklı eşit pay)	11
2.3.1.4. TWK (Toplam iş kapsamı)	11
2.3.1.5. WTWK (Ağırlıklı toplam iş kapsamı)	12
2.3.1.6. NOP (Operasyon sayısı)	12
2.3.1.7. WNOP (Ağırlıklı operasyon sayısı)	12
2.3.1.8. NOPPT (İşlem süresi ve operasyon sayısı)	13
2.3.1.9. WNOPPT (Ağırlıklı işlem süresi ve operasyon sayısı)	13
2.3.1.10. PPW (Toplam iş kapsamı ve pay)	14
2.3.1.11. WPPW (Ağırlıklı toplam iş kapsamı ve pay)	14
2.3.1.12. RDM (Random allowance – Rasgele)	14
2.4. Teslimat	15
2.4.1. Araç rotalama problemleri çözüm yöntemleri	18
2.4.1.1. Tasarruf algoritması	20
2.4.1.2. Süpürme algoritması	20
2.4.1.3. En yakın komşu algoritması	20
3. BÜTÜNLEŞİK ÇALIŞMALAR	23
3.1. Bütünleşik Proses Planlama ve Çizelgeleme	23
3.2. Bütünleşik Çizelgeleme ve Teslim Tarihi Belirleme	31
3.3. Bütünleşik Proses Planlama, Çizelgeleme ve Teslim Tarihi Belirleme	37

3.4. Bütünleşik Çizelgeleme ve Araç Rotalama	38
3.5. Bütünleşik Proses Planlama, Çizelgeleme, Teslim Tarihi Belirleme ve Araç Rotalama.....	46
4. KULLANILAN YÖNTEMLER.....	47
4.1. Genetik Algoritma	47
4.1.1. Genetik algoritma operatörleri	49
4.1.2. Uygunluk fonksiyonu	49
4.1.3. Seçilim.....	49
4.1.4. Çaprazlama.....	50
4.1.5. Mutasyon.....	51
4.1.6. Yeni popülasyon ve durdurma kriteri	51
4.2. Evrimsel Strateji	53
4.3. Tavlama Benzetimi.....	54
4.4. Rassal Arama.....	57
4.5. Hibrit Arama.....	58
5. BENZETİM	59
5.1. Problemin Tanımı	59
5.2. Problemin Modellenmesi.....	61
5.2.1. Kromozom yapısı	64
5.2.2. Teslim tarihi belirlemenin modellenmesi.....	66
5.2.2.1. WSLK kuralı	67
5.2.2.2. WTWK kuralı.....	68
5.2.2.3. WPPW kuralı.....	69
5.2.2.4. WNOPPT kuralı	70
5.2.3. Çizelgelemenin modellenmesi	71
5.2.4. Teslimatın modellenmesi	72
5.2.4.1. Süpürme algoritması	72
5.2.4.2. Tasarruf algoritması	73
5.2.4.3. Hibrit algoritma	76
5.2.4.4. Random teslimat algoritması.....	76
5.2.4.5. Önem algoritması	76
5.3. Performans Kriteri	79
5.4. Mini Atölye Örneği	81
5.4.1. İşlerin çizelgelenmesi.....	84
5.4.2. Araç hareket rotası	84
6. DENEYSEL ÇALIŞMA VE ANALİZLER	87
6.1. Taguchi Deney Tasarımı	87
6.2. 2 Numaralı Atölye Sonuçları.....	90
6.3. Duyarlılık Analizi	91
7. BULGULAR VE TARTIŞMA	97
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	109
KAYNAKLAR.....	113
ÖZGEÇMİŞ.....	131

KISALTMALAR

3PL	: Üçüncü parti lojistik
ACO	: Karınca kolonisi algoritması
ARP	: Araç rotalama problemi
CAPP	: Bilgisayar destekli proses planlama
ES	: Evrimsel strateji
GA	: Genetik algoritma
HA	: Hibrit arama
IPDS	: Bütünleşik üretim ve dağıtım çizelgeleme
IPODS	: Bütünleşik üretim ve dışa yönelik dağıtım çizelgeleme
IPPS	: Bütünleşik proses planlama ve çizelgeleme
IPPSDDA	: Bütünleşik proses planlama, çizelgeleme ve teslim tarihi belirleme
IPTS	: Bütünleşik üretim ve taşıma çizelgeleme
JIT	: Tam zamanında üretim
PSO	: Parçacık sürü optimizasyonu
PTSP	: Üretim ve taşıma çizelgeleme problemi
RA	: Rassal arama
SWDDA	: Bütünleşik çizelgeleme ve teslim tarihi belirleme
TB	: Tavlama benzetimi



SİMGELER

m	: Makine sayısı
n	: İş sayısı
C_{ij}	: Bir işin bir makinedeki işleminin bitiş zamanı
c_j	: Bir işin tamamlanma zamanı
d_j	: Bir işin teslim tarihi
L_j	: Gecikme
p_i	: Bir işin toplam proses zamanı
N_i	: Bir işin operasyon sayısı
w_i	: Müşteri ağırlıkları
Z_i	: Müşteri ağırlık katsayısı



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Çizelgeleme notasyonları.	7
Tablo 2.2. Çizelgelemede kullanılan hiyerarşik yapı.	9
Tablo 3.1. IPPS problem çözümünde kullanılan yöntemler.	26
Tablo 5.1. Müşteri önemleri.	60
Tablo 5.2. Atölyelere ait bilgiler.	62
Tablo 5.3. Örnek proses planı.	62
Tablo 5.4. Yöntemlerin kromozomda aldığı değerler.	66
Tablo 5.5. Çizelgeleme kuralları.	71
Tablo 5.6. Örnek tasarruf bilgileri.	75
Tablo 5.7. Önem algoritması örnek bilgiler.	78
Tablo 5.8. Bölgelere göre öncelik endeksi ortalamaları.	78
Tablo 5.9. Koordinatlar arası mesafe matrisi.	83
Tablo 5.10. Teslimata ilişkin zaman-olay çizelgesi.	85
Tablo 5.11. İşlere ait zamanlar.	85
Tablo 5.12. Teslim tarihleri.	86
Tablo 5.13. İşlere ait ceza puanları.	86
Tablo 6.1. Taguchi ortogonal dizi seçimi.	87
Tablo 6.2. Deney tasarımında kullanılan parametreler ve seviyeleri.	88
Tablo 6.3. Taguchi deneyleri ve sonuçları.	89
Tablo 6.4. 2 numaralı atölye için en iyi sonuçlar.	90
Tablo 6.5. En iyi sonuçlar ve kromozomlar.	92
Tablo 6.6. Teslim tarihi belirleme kuralları analizi.	92
Tablo 6.7. Çizelgeleme kuralları analizi.	93
Tablo 6.8. Teslimat kuralları analizi.	95
Tablo 7.1. Entegrasyon seviyeleri.	97
Tablo 7.2. Entegrasyon seviyelerinin performansı.	98
Tablo 7.3. Entegrasyon seviyeleri iyileştirmeler.	99
Tablo 7.4. SIRO-RDM için teslimat kurallarının performansları.	100
Tablo 7.5. Atölyelere ait sonuçlar.	100
Tablo 7.6. 4 nolu atölye 4000 iterasyon.	101
Tablo 7.7. Performans karşılaştırma.	102
Tablo 7.8. En iyi kromozomda teslim tarihi kuralları analizi.	102
Tablo 7.9. En iyi kromozomda çizelgeleme kuralları analizi.	103
Tablo 7.10. En iyi kromozomda teslimat kuralları analizi.	105



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. ARP probleminin çalışma alanları.....	16
Şekil 2.2. ARP konusunda yıllara göre çalışma sayıları.....	16
Şekil 2.3. ARP türleri.....	17
Şekil 2.4. ARP çözüm yöntemleri.....	18
Şekil 3.1. IPPS probleminin çalışma alanları.....	23
Şekil 3.2. IPPS konusunda yıllara göre çalışma sayıları.....	24
Şekil 3.3. SWDDA probleminin çalışma alanları.....	31
Şekil 3.4. SWDDA konusunda yıllara göre çalışma sayıları.....	32
Şekil 3.5. Entegre çizelgeleme ve araç rotalama konusundaki çalışma sayıları.....	40
Şekil 3.6. Entegre çizelgeleme ve araç rotalama çalışmalarının içeriği.....	41
Şekil 4.1. Genetik algoritma adımları.....	48
Şekil 4.2. Popülasyon örneği.....	49
Şekil 4.3. Çaprazlama öncesi kromozomlar.....	50
Şekil 4.4. Çaprazlama sonrası kromozomlar.....	50
Şekil 4.5. Mutasyon işlemi.....	51
Şekil 4.6. GA akış şeması.....	52
Şekil 4.7. ES akış şeması.....	53
Şekil 4.8. TB akış şeması.....	56
Şekil 4.9. Tavlama benzetimi adımları.....	57
Şekil 5.1. Problemin akışı.....	61
Şekil 5.2. Müşteri konumları.....	63
Şekil 5.3. Mesafe matrisi.....	64
Şekil 5.4. Problemin yapısı.....	65
Şekil 5.5. Kromozom yapısı.....	65
Şekil 5.6. 2 numaralı atölye için kromozom örneği.....	66
Şekil 5.7. Teslim tarihi belirleme akış şeması.....	67
Şekil 5.8. Çizelgeleme akış şeması.....	72
Şekil 5.9. Süpürme algoritması çalışma prensibi.....	73
Şekil 5.10. Tasarruf algoritması.....	74
Şekil 5.11. Önem algoritması akış şeması.....	77
Şekil 5.12. Teslimat varyantları – (a) öncelik endeksine göre; (b) yakınlığa göre....	79
Şekil 5.13. Ceza değerlerinin hesaplanması.....	81
Şekil 5.14. Mini atölye notasyonlar.....	82
Şekil 5.15. Teslimat noktalarının konumları.....	82
Şekil 5.16. Örnek uygulamaya ait kromozom.....	83
Şekil 5.17. Makinalara atanmış işler.....	84
Şekil 5.18. Kromozomun son hali.....	84
Şekil 6.1. Taguchi sinyal gürültü oranı sonuçları.....	89
Şekil 6.2. 2 numaralı atölye sonuçları.....	91
Şekil 6.3. Teslim tarihi belirleme kuralları duyarlılık analizi.....	93
Şekil 6.4. Çizelgeleme kuralları duyarlılık analizi.....	94

Şekil 6.5. Teslimat kuralları duyarlılık analizi.....	95
Şekil 7.1. Entegrasyon seviyelerinin karşılaştırılması.	98
Şekil 7.2. Teslim tarihi kurallarının performansları.....	103
Şekil 7.3. Atölye bazlı çizelgeleme kuralları performansı.....	104
Şekil 7.4. Atölye bazlı teslimat kuralları performansı.	106



ENTEGRE PROSES PLANLAMA, ÇİZELGELEME, TESLİM TARİHİ BELİRLEME VE TESLİMAT

ÖZET

Proses planlama, çizelgeleme ve teslim tarihi belirleme imalatı oluşturan üç temel fonksiyondur. Bu fonksiyonların aralarında herhangi bir iletişim olmadan, bağımsız bir şekilde çalışmaları günümüzde pek mümkün olmayan bir uygulamadır. İmalat sanayinin robotlarla çalışmaya başladığı günlerde, planlamanın çizelgeleme ile ya da çizelgelemenin teslim tarihi ile entegre olmadan çalışması düşünülemez. Bundan dolayıdır ki, bu fonksiyonların entegrasyonu yıllardır özellikle akademik anlamda yoğun bir şekilde çalışılan bir konudur. Yapılan çalışmalar, bu entegrasyonun zor bir iş olduğunu ortaya koymaktadır. Üç fonksiyonun entegre edildiği çalışma sayısı bile son derece az iken bu çalışmada, üç temel imalat fonksiyonuna dördüncü bir fonksiyon olan teslimat fonksiyonu ilave edilmiştir.

Siparişe göre üretim felsefesinin yaygınlaştığı şiddetli rekabet piyasasında yüksek müşteri memnuniyetini sağlayabilmenin etkili yollarından biri de ürünleri hızlı teslim edebilmektedir. Özellikle raf ya da kullanım ömrü kısa olan ürünler için hızlı bir tedarik zinciri süreci oldukça önemlidir. Tedarik zincirinin en önemli adımı olan teslimatın, imalat ile entegre edilmesi tüm süreç için son derece faydalı olacaktır.

Bu çalışmada, üretim süreçlerinin dijitalleştirilebilmesi amacıyla, imalatın en önemli üç fonksiyonu olan proses planlama, çizelgeleme ve teslim tarihi belirleme ile tedarik zinciri sürecinin önemli parçası olan teslimat fonksiyonunun entegrasyonu amaçlanmıştır. Entegrasyonun yapılabilirliğini göstermek, sıralı ve bağımsız çözümlere kıyasla sağladığı faydayı ifade edebilmek ve yalnızca teslimatı entegre etmenin bile etkisini gösterebilmek açılarından ilk olacak bu çalışma sayesinde literatüre önemli bir katkı sağlamak hedeflenmektedir. Ayrıca, literatürdeki çalışmaların aksine, müşterilerin birbirleri ile eşit olmadığı ve her müşterinin farklı bir öneme sahip olduğu değerlendirilmiştir.

Çalışmada 4 farklı atölye incelenmektedir. Her atölyedeki iş sayıları ve müşteri konumları farklıdır. Çizelgeleme fonksiyonu bile NP-hard (polinomik olmayan zor) sınıfında girdiği için entegre problem ancak çok küçük boyutlu örneklerde kesin çözümün ulaşılabilirdiği bir problemdir. Bu sebeple, sezgisel çözüm yöntemlerinden yararlanılması daha doğrudur. Çalışmada ele alınan problemin çözümünde genetik algoritma (GA), tavlama benzetimi (TB), rassal arama (RA), hibrit arama (HA) ve evrimsel strateji (ES) yöntemlerinden faydalanılmıştır.

Yapılan çalışma sonucunda dört fonksiyonun entegre edilmesinin mümkün olduğu, hatta entegre etmenin bağımsız çalıştığı hallere kıyasla yaklaşık yüzde 50 oranında daha fazla verimlilik sağladığına ulaşılmıştır. Ayrıca, üç fonksiyonun entegre bir şekilde çalıştığı sistemlere sadece teslimatı entegre etmenin ise yaklaşık yüzde 20 oranında bir iyileşmeye sebep olduğu görülmüştür. Çözüm yöntemlerinde ise en iyi sonuçları GA'nın elde ettiğine ulaşılmıştır.



INTEGRATED PROCESS PLANNING, SCHEDULING, DUE DATE ASSIGNMENT AND DELIVERY

SUMMARY

The three main functions that make up manufacturing are process planning, scheduling, and due date assignment. These functions cannot be performed alone nowadays without interacting with one another. In the past, the preparation of process plans without considering scheduling caused arbitrary applications and the planner to make plans at his own convenience. However, the inputs of the scheduling function consist of the outputs obtained from the process planning function in the integration of these functions. As a result, there will be a more balanced workload, improved company performance, realistic planning, and shorter, simpler deadlines.

Since the advent of robots in the industrial sector, it is impossible to imagine the process planning operating independently of the scheduling or the scheduling operating independently of the due date assignment. As a result, the integration of these functions has received a significant interest, particularly in the academic context. The integration of the scheduling function with the process planning function has been the subject of countless studies in the literature. Similarly, there are numerous studies that combine the functions of scheduling and due date assignment.

Studies show that this integration is a difficult task. Although there are very few studies that combine the three functions, a fourth function -the delivery function- has been added to the three fundamental manufacturing functions in this study.

Delivering goods quickly is one of the most efficient ways to ensure high customer satisfaction in the fiercely competitive market where the make-to-order philosophy has gained universal acceptance. Fast supply chain operations are crucial, especially for products with a short shelf life or short lifespan.

Manufacturing and delivery will benefit greatly from being integrated because delivery is the most crucial step in the supply chain. To digitize production processes, this study aims to integrate the three most crucial manufacturing functions, namely process planning, scheduling, and due date assignment, as well as the delivery function, which plays a significant role in the supply chain process. With this study, which will be the first to highlight the benefits of integration of sequential and independent solutions, show the effect of simply integrating delivery, and demonstrate its viability, it is intended to make a significant contribution to the literature.

Additionally, it has been determined that customers are not equal and that each customer has a different importance, in contrast to studies found in the literature.

Four different job shops are examined at in the study. Each job shop has a diverse assortment of jobs and customers. The integrated problem is a problem for which the correct solution can only be obtained in very small-sized samples because even the scheduling function belongs to the NP-hard class. Heuristic solution techniques would be more accurate for this reason. The genetic algorithm (GA), simulated annealing

(TB), random search (RA), hybrid search (HA), and evolutionary strategy (ES) methods were utilized to solve the problem covered in the paper.

In this study, each solution is represented by a chromosome. The first digit of the chromosome represents a gene for the due date assignment function, the second digit a gene for the scheduling function, and the third digit a gene for the delivery function.

Some investigations were conducted in the study like to determine the best solution method, the best due date assignment rule, the best scheduling rule, and the best delivery rule.

The results were also subjected to sensitivity analysis to improve consistency. The Taguchi technique was used to find the values of factors such population size, number of genes to change in mutation, crossover points, and random search rate that would give the most effective solution.

It was found that the heuristic algorithms used outperformed the non-integrated solution by 54%. This demonstrates the significance of integration. The global solution improves as the level of integration rises as well, which is another finding. Even at lower levels, integrating manufacturing functions is significantly more advantageous than not integrating them at all.

Among the solution methods, evolutionary strategy in job shop 1, genetic algorithm in job shop 2 and 3, and random search algorithms in job shop 4 gave better results. Within the due date assignment function rules, WSLK gave superior results in all workshops. Although there was no obvious leader in the scheduling rules, the delivery rules' saving algorithm performed better than the others. It has been determined that the functions' ability to alter the overall performance is governed more by the rules for due date assignment than by the rules for scheduling and delivering.

The study's conclusion is that it is feasible to integrate four functions, and even that integration results in around 50% more efficiency when compared to situations in which it operates independently. Additionally, it has been found that adding merely delivery to systems in which all three functions operate together results in an improvement of about 20%. It was discovered that GA produced the best results among the available solution methods.

1. GİRİŞ

Proses planlama, çizelgeleme ve teslim tarihi belirleme üç önemli fonksiyondur. Klasik planlamada, bu üç fonksiyon birbirlerini oldukça etkilemelerine rağmen ayrı ayrı ele alınmaktaydı (Demir ve ark., 2018). Ayrı ayrı ele alınan fonksiyonlar sonraki aşamalar için kötü girdiler oluşturmakta ve global çözümde performansı oldukça olumsuz etkilemektedir. Örneğin, yetersiz veya hatalı hazırlanmış proses planları sebebiyle atölyede yük dengesizliği oluşmakta ve gerçekçi olmayan proses planlarının atölye bazında takibi son derece güçleşmektedir. Sonuçta performans ölçülerinde önemli kayıplar olabilmekte ve atölye verimliliği azalmaktadır. Bu fonksiyonların ayrı ayrı ele alınması, birbirlerinden kopuk olmalarına dolayısıyla da performansın önemli miktarda azalmasına yol açmaktadır. Bu nedenle imalat fonksiyonlarının entegrasyonu son derece önemlidir. Entegrasyon, fonksiyonlar arası uyumsuz hedeflerin ortadan kalkması ve fonksiyonların haberleşir olması gibi faydalar sağlayacak ve performansı, kaliteyi ve verimliliği ciddi miktarda artıracaktır.

Geçmişte proses planlarının çizelgeleme hesaba katılmadan hazırlanması keyfi uygulamaların beraberinde gelmesine ve planlama personelinin kendi duygu ve düşüncelerine göre plan yapmasına sebebiyet vermektedir. Oysa bu fonksiyonların entegrasyonunda, çizelgeleme fonksiyonunun girdileri, proses planlama fonksiyonundan elde edilen çıktılarından oluşmaktadır. Dolayısıyla daha dengeli iş yükü oluşması ve işletme performansında artış, daha gerçekçi planlar, kısa süreler ve uyulması daha kolay durumlar oluşacaktır.

İmalatın temelinde yer alan fonksiyonlar haberleşir olmazsa, örneğin, çizelgeleme ile teslim tarihi fonksiyonları entegre edilmezse performans ölçütlerinde önemli düşüşler olabilir. Çünkü, çizelgeleme fonksiyonundan habersiz verilen teslim tarihi çok erkense gecikme maliyetleri ciddi oranda artabilir ve eğer çok geç ise, teslim tarihi ile ilgili maliyetler ve erken tamamlanma ile ilgili maliyetlerde önemli ölçüde artış olabilir. Bununla birlikte, müşteriler gereksiz yere verilmiş uzun teslim tarihlerinden memnun kalmayabilirler. Dolayısıyla, entegre olmamış üretim fonksiyonları, çok farklı şekillerde zararlara yol açabilmektedirler.

Entegrasyon önemli ancak zor bir iştir. Sadece çizelgeleme problemi tek başına polinom olmayan zor (NP-Hard) problem sınıfında olduğundan kesin çözümler ancak küçük problemler için mümkün olabilmektedir. Entegre problemleri düşündüğümüzde ise problem daha da karmaşıklaşmaktadır.

Bu çalışmada, proses planlama, çizelgeleme, teslim tarihi belirleme fonksiyonlarının entegrasyonuna dördüncü bir fonksiyon olarak teslimat fonksiyonu entegre edilmektedir. Öncelikle dört fonksiyonun entegre olmadığı bir yapı çalıştırılmış ve fonksiyonların entegrasyon seviyesi arttıkça performansın nasıl bir değişim gösterdiği incelenmiştir. Üç fonksiyonun entegrasyonu konusu, henüz son birkaç yılda çalışılmaya başlanmış olup, literatürde bazı çalışmalar bulunmasına rağmen çok fazla çalışma imkânı sağlayan geniş bir alan olduğu görülmüştür. Dört fonksiyonun entegrasyonu ise literatürde bir ilk olacaktır.

Problemleri çözerken sonuçlara makul sürelerde ulaşılması oldukça önemlidir. Bu çalışmadaki entegre problem, entegrasyon seviyesi arttıkça daha da karmaşık bir hal almaktadır. Bu karmaşık yapıya çok basit ve küçük ölçekli problemler hariç kesin bir çözüm bulmak mümkün değildir. Literatür incelendiğinde, benzer problemlerin çözümünde genellikle meta-sezgisel algoritmaların çözüm için kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada problemin yapısına oldukça uygun olan genetik algoritma (GA), hibrid arama (HA), evrimsel strateji (ES), rassal arama (RA) ve tavlama benzetimi (TB) teknikleri kullanılmış olup bu yöntemlerin sonuçları sıradan çözümlerle karşılaştırılmıştır. Yöntemlerin global performans üzerinde nasıl bir etkiye sahip oldukları analiz edilmiştir.

Kısaca bu çalışmayla dört önemli fonksiyon olan proses planlama, çizelgeleme, teslim tarihi belirleme ve teslimat entegre edilmekte ve bu dört fonksiyonun entegre edildiği bir yapı ilk kez uygulanmaktadır. Ayrıca GA, ES, HA, RA ve TB'nin sağladığı fayda gözlemlenerek en iyi sonucun hangi yöntemle alındığı belirlenmiştir.

1.1. Çalışmanın Özgün Değeri

Literatürde ikili olarak fonksiyonların entegrasyonuna dair çok sayıda çalışmaya rastlanabilmektedir. Bunlardan, bütünleşik proses planlama ve çizelgeleme (IPPS) problemi farklı alanlarda çok sayıda çalışmanın yer aldığı bir konu olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca bütünleşik çizelgeleme ve teslim tarihi belirleme (SWDDA)

problemi de geniş bir alanda çok fazla sayıda çalışma içermektedir (Demir ve Erden, 2020). Fakat üç fonksiyonu entegre eden bütünleşik proses planlama, çizelgeleme ve teslim tarihi belirleme (IPPSDDA) problemi son yıllarda çalışılmaya başlanan geniş bir araştırma alanıdır.

Bu çalışmada ise proses planlama, çizelgeleme ve teslim tarihi belirleme fonksiyonlarına bir de teslimat fonksiyonu entegre edilmiştir. Bu büyük entegrasyonu sağlayabilmek adına bazı sezgisel algoritmalarından faydalanılmıştır. Algoritmaların entegrasyonda ne kadar başarılı olduğu incelenmiştir. Literatüre ek olarak bu tez çalışmasında erken tamamlanma, gecikme ve teslim tarihinin tamamı, müşteri ağırlıkları da hesaba katılarak cezalandırılmıştır.

Çalışmada her müşterinin eşit bir öneme sahip olmadığı da ele alınmıştır. Literatürde var olan çalışmaların pek çoğunda teslim tarihi belirlenirken ya da çizelgeleme yapılırken müşteri ağırlıkları hesaba katılmamıştır. Bu nedenle bu çalışma, önemli müşteriye daha erken teslim tarihi verip bu müşteriyi daha erken çizelgelemenin performans ölçüsünü ne kadar geliştirdiğinin gözlemlenmesine imkân tanımaktadır. Önemli müşterilere ait işler teslimatta da öncelikli olarak değerlendirilmektedir. Bu sayede, önemli müşteri atölyenin her aşamasında daha ayrıcalıklı olmaktadır. Çalışmada genetik algoritma, hibrit arama, evrimsel strateji, tavlama benzetimi ve rassal arama gibi çözüm yöntemleri sıradan çözümlerle karşılaştırılmıştır.

1.2. Çalışmanın Getirileri

Çalışmanın literatüre katkıları ve getirileri şöyle sıralanabilir:

- Entegre olmamış kombinasyondan başlayarak adım adım dört fonksiyon entegre edilmesi ve entegrasyon seviyesinin global çözümü nasıl etkilediğinin incelenmesi.
- Dört fonksiyonun entegrasyonunun diğer entegrasyon seviyelerine nazaran en iyi kombinasyon olup olmadığının incelenmesi.
- Hibrit arama ve evrimsel strateji, genetik algoritma, tavlama benzetimi ve rassal arama yöntemlerinin bu entegrasyon seviyesinde ilk kez kullanılmış olması.
- GA, HA, ES, RA ve TB tekniklerinin sıradan çözümlere göre daha üstün olduğunun gösterilmesi.

- Literatürde gecikme veya hem gecikme hem erken tamamlanma cezalandırılırken bu çalışmada ağırlıklı belirlenmiş teslim tarihi süresi, gecikme ve erken tamamlanmanın hepsinin birden cezalandırılması çalışılmaktadır.
- Müşterileri farklı önem derecelerine göre değerlendirmenin ve teslim tarihi belirleme, çizelgeleme ve teslimat aşamalarında önem derecelerini hesaba katmanın performans üzerindeki etkilerinin incelenmesi.

1.3. Tezin Yapısı ve Algoritmalar

Tez çalışmasında, klasik atölye tipi imalat ortamı ele alınmış ve 25, 50, 75 ve 100 işten oluşan 4 farklı atölye ortamı incelenmiştir. Bu şekilde farklı büyüklükteki atölyeler ile sezgisel algoritmalar kombine edilerek performansları incelenmiştir.

Çalışmada sezgisel algoritmalar tavlama benzetimi, genetik algoritmalar ve evrimsel strateji, hibrit arama ve rassal arama algoritmaları kullanılmaktadır. Sezgisel bir arama tekniği olan tavlama benzetiminde, popülasyon üzerinde çalışmak yerine, her bir iterasyonda tek bir kromozoma odaklanmaktadır. Bu kromozom etrafında çok sayıda komşu çözüm üretir ve belirlenen kritere göre yeni çözümlerin kabul edilip edilmeyeceğine karar verir. Her iterasyonun ardından sıcaklık değerini düşürür.

Genetik algoritmada her yinelemede şimdiye kadar bulunan en iyi çözümlerin etrafında daha iyi çözümler aranır. Her iterasyonda, ana popülasyondan belirli bir miktar kromozom seçilir ve çaprazlama operatörü kullanılarak çapraz popülasyon üretilir. Ardından mutasyon operatörü ile mutasyona uğrayacak belli sayıdaki kromozom seçilir ve mutasyon popülasyonu üretilir. Bu işlemlerin ardından seçim yapılırken daha iyi performans gösteren kromozomların seçilme olasılığının daha yüksek olması sağlanır (Göçken ve ark., 2018).

Evrimsel strateji ise evrim teorisinden hareketle geliştirilen bir sezgisel algoritmadır. Genetik algoritmadan farklı olan yönü, genetik algoritmada çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin ikisi de kullanılırken, evrimsel stratejide yalnızca mutasyon operatörü kullanılır. Evrimsel strateji de iyi çözümler komşuluğunda daha iyi çözümleri bulma amacı güden bir yöntemdir.

2. FONKSİYONLAR

Bu bölümde çalışmada yer alan ve entegre edilmesi amaçlanan dört fonksiyon olan proses planlama, çizelgeleme, teslim tarihi belirleme ve teslimat hakkında bilgiler verilmektedir.

2.1. Proses Planlama

Küresel rekabetin yoğunluğunun gün geçtikçe artması, artık şirketlerin kalite ve verimlilikte yüksek değerlere ulaşmasını, müşteri memnuniyetini ciddi derecede arttırmasını ve müşteriye özel ve hızlı imalat yapılmasını mecburi hale getirmektedir. İmalat Mühendisleri Topluluğu proses planlamayı bir ürünün ekonomik ve rekabetçi bir şekilde üretebilmesi için kullanılacak metotların sistematik bir şekilde belirlenmesi olarak tanımlamıştır. Proses planlama, ürünlerin hangi yöntemle işleneceğini belirleyen ve bu nedenle tüm üretim aşamalarının temelini oluşturan bir kavramdır (Li ve Gao, 2020). Bir başka ifadeyle proses planlama, planlayıcısının konu hakkında üstün bilgiye sahip olmasını gerektiren karmaşık bir iştir. Bu bağlamda proses planlamayı ürünün tasarlanması ve üretilmesi arasındaki bir köprü olarak gören çalışmalar da bulunmaktadır (Xu ve Li, 2008).

Proses planlamanın tasarım ile üretimi birbirine bağlayan bu denli önemli ve temel bir unsur olması, akademik çalışmalarda da sıklıkla yer almasına neden olmuştur. Daha verimli proses planlarını hazırlayabilmek, proses planlarını başka diğer faaliyetlerle entegre edebilmek akademinin uzun süredir ilgi duyduğu problemlerdir. İlk imalat dönemlerinde, proses planlama manuel ya da deneysel olarak gerçekleştirilmekte idi. Manuel proses planlama günümüzde de yaygın olarak kullanılmasına rağmen, insana bağımlı bir düzen olmasından ötürü bazı dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Bunlar, deneyimli ve nitelikli personel eksikliği, hazırlanan planların düşük verimli olması, plan uygulayıcı işçilerin bilgisizliğinden kaynaklı tutarsızlıklar gibidir. Bu sebeple, bilgisayar destekli proses planlama (CAPP) ortaya çıkmıştır.

CAPP, imalat için gereken parçaların tasarlanmasında ve çizilmesinde bilgisayarlardan yararlanılan bir sistemdir. CAPP, işlenecek parçaların şekil ve boyut

gibi geometrik bilgilerini ve malzeme, dayanıklılık, makine ve operasyon gibi işlem bilgilerini bilgisayara girerek parça işlem rotasını ve işlem içeriğini çıkardığı bir süreçtir (Li ve Gao, 2020). Proses planlama ile diğer imalat fonksiyonları arasında bilgi entegrasyonunun sağlanması, ürün geliştirme sürecini kısaltarak pazara daha hızlı yanıt vermeyi sağlayan önemli bir konudur. Proses planlama yalnızca CAD ve CAM ile değil, aynı zamanda çizelgeleme, kurumsal kaynak planlama ve dağıtım ile de entegre olmalıdır (Yao ve ark., 2011).

Manuel ve bilgisayar destekli proses planlama dışında, üretken proses planlama adı verilen bir planlama çeşidi de bulunmaktadır. Üretken proses planlamada, bir veri tabanı üzerinde kayıtlı mevcut bir sisteme yeni bir bileşen dahil olduğunda veri tabanı sistemi üzerinden otomatik olarak proses planlama işlemi başlatılır. İnsana bağımlılığın en aza indirildiği bu sistemde, proses planlaması işlemi son derece hızlı ve tutarlı bir biçimde gerçekleştirilerek verimliliğin artırılması hedeflenir (Elinson ve ark., 1997).

IPPS (Integrated Process Planning and Scheduling, Entegre proses planlama ve çizelgeleme) güncelliğini sürdüren yaygın bir konudur. Bu konuda yayınlanan çok sayıdaki makale entegrasyonun önemini vurgulamış ve entegrasyon ile performansın artacağı gösterilmiştir. Amin-Naseri ve Afshari (2012), Dai ve ark. (2019), Liu ve ark. (2018), Chryssolouris ve ark. (1985) ve Chang ve Wysk (1984) bu çalışmalardan bazıları olarak gösterilebilir.

Literatüre bakıldığında IPPS alanında ve SWDDA konularında çok fazla sayıda çalışma yer aldığı gözlemlenmektedir. Bu çalışmalarda proses planlama ile çizelgelemenin ve çizelgelemeyle teslim tarihini entegre etmenin detaylı bir şekilde faydaları belirtilmiştir. Fakat bu üç fonksiyonun topluca entegrasyonu ya da teslimat fonksiyonunun entegrasyonuna literatürde pek rastlanmamaktadır ve bu konu gelecek vadetmektedir.

2.2. Çizelgeleme

Zhang ve Mallur (1994), üretim çizelgelemeyi, kaynakları işlere atarken zamanlamaya karar veren bir kaynak tahsisatı olarak tanımlamışlardır. Pinedo ve Chao (1999), çizelgelemeyi ürün ve hizmet üreten şirketlerde önemli bir karar verme prosesi olarak tanımlamışlardır. Çizelgelemeyi, kısıtlı kaynakların işlere atanmasını sağlayan bir

fonksiyon olarak görmektedirler. Ayrıca atölye çizelgelemeyi ise şöyle tanımlamışlardır; “ n adet iş ve bu işlerin atanabileceği m adet makinenin olduğu bir ortam, her işin önceden belirlenmiş ve takip edeceği bir rota bulunuyorsa ve her bir iş belirli bir makine sırasında ilerliyorsa bu ortam atölye çizelgeleme ortamıdır. Atölye tipi üretim her bir müşterinin kendine has özellikleri olduğu ve sipariş miktarlarının oldukça küçük olduğu durumlarda oluşmaktadır” (Pinedo ve Chao, 1999).

2.2.1. Çizelgeleme notasyonları

Çizelgeleme problemleri incelendiğinde literatürde kabul görmüş ve her çalışmada kullanılan bazı notasyonlar bulunmaktadır. Çizelgelemeye ait bazı notasyonlar Tablo 2.1’deki gibidir ve bu çalışmada da kullanılmıştır (Öztürk, 2018).

Tablo 2.1. Çizelgeleme notasyonları.

Notasyon	Açıklama
j	İş
i	Makine
m	Makine sayısı
n	İşlerin sayısı
p_{ij}	j . işin i . makinedeki iş/işlem süresi
d_j	Teslim tarihi
w_j	j . işin (müşterinin) ağırlığı
W_{ij}	j . işin i . makinedeki bekleme süresi
C_j	j . işin tamamlanma zamanı
F_j	Akış zamanı
L_j	Geç kalma
T_j	Gecikme
E_j	Erken tamamlanma

2.2.2. Çizelgeleme kuralları

Atölye çizelgeleme probleminde; m tane $\{M_1, M_2, M_3, \dots, M_m\}$ makinada işlenmek üzere bekleyen n tane $\{J_1, J_2, J_3, \dots, J_n\}$ iş bulunmaktadır. Her iş her makinede işlem görebilir. Atölye imalat ortamları son derece dinamik ve esnek yapıdalardır. Pek çok farklı müşteriden pek çok farklı siparişin geldiği karmaşık bir ortam olarak kabul edilmektedir.

Çeşitliliğin fazla olması üretim miktarlarının küçük olmasını beraberinde getirirken aynı zamanda çok sayıda makine rotası olacağından çizelgeleme işleminin yapılması oldukça zordur. Üretimde hangi işin hangi makine sırasını takip edeceği bilgisi proses planlama tarafından gelmektedir. Rotalar birbirinden bağımsızdır. Çizelgeleme bu bilgileri kullanarak işleri makinelere atamaktadır.

Bir j işinin i makinesindeki işinin bitiş zamanına C_{ij} , j işinin tamamlanma zamanına c_j ve teslim tarihine de d_j dendiğinde, gecikme L_j , aşağıdaki denklem 2.1 yardımıyla belirlenebilir.

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

Burada L_j pozitif veya negatif değerler alabilmektedir. Pozitif olması işin geciktiğini ifade ederken, negatif olması ise işin olması gerekenden daha erken tamamlandığını göstermektedir (Öztürk, 2018).

Pozitif gecikme (tardiness) T_j denklem 2.2 yardımıyla hesaplanabilir.

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

Çizelgeleme problemlerinde farklı hiyerarşi karakteristikleri kullanılsa da yaygın olarak kullanılan gösterim şekli $\alpha \mid \beta \mid \gamma$ notasyonlarının kullanıldığı gösterimdir. Burada her bir notasyonun ayrı bir anlamı bulunmaktadır. Bu hiyerarşik gösterime ait notasyonların bazıları ve anlamları Tablo 2.2’de gösterilmiştir (Öztürk, 2018).

Tablo 2.2. Çizelgelemede kullanılan hiyerarşik yapı.

α		β		γ	
(Makine Ortamları)		(Karakteristik ve Kısıtlar)		(Optimize Edilecek Parametre)	
1	Tek makine	r_j	Hazır olma zamanı	C_{max}	Maksimum tamamlanma zamanı
P_m	Eş paralel makineler	$prmp$	İşlem bölme	F_{max}	Maksimum akış zamanı
Q_m	Farklı hızdaki paralel makineler	$prec$	Öncelik kısıtları	L_{max}	Maksimum gecikme
F_m	Akış tipi	$batch(b)$	Parti işleme	T_{max}	Maksimum geç tamamlanma
J_m	Atölye tipi	$fmls$	İş aileleri	E_{max}	Maksimum erken tamamlanma
FJ_c	Esnek atölye tipi	$brkdw$	Arızalar	$\bar{C}$	Ortalama tamamlanma zamanı
		M_j	Makine uygunluk kısıtları	$\bar{F}$	Ortalama akış zamanı
				$\bar{T}$	Ortalama geç tamamlanma

2.3. Teslim Tarihi Belirleme

Teslim tarihi belirleme, son yıllarda tam zamanında üretim (JIT) gibi yeni tekniklerin gelişmesiyle yaygınlaşan ve pek çok araştırmanın konusu olan bir kavramdır. Müşteri memnuniyetinin sağlanmasında büyük önem taşıyan teslim tarihi belirleme, çizelgeleme ve proses planlama ile birleştirildiğinde çok daha verimli sonuçlar alınmasına, stokların azalmasına ve büyük maliyetlerden kaçınılmasına doğrudan etki etmektedir. Çünkü üretimi tamamlanan ürünlerin stokta bekletilmesi maliyetlere yol açabileceği gibi, müşterilere zamanında ürünlerini teslim edememek de başka maliyetlere sebebiyet verebilecektir.

İmalat ortamlarında teslim tarihlerine üreticiler ya da tüketiciler karar verebilir. Üreticiler karar verirse kendilerine uygun bir zamanı teslim tarihi olarak

belirleyebilirler. Aynı zamanda tüketiciler de arzu ettikleri tarihte teslim edilmesini tercih edebilirler (Çeven, 2007).

Tüketicilerin teslim tarihine karar vermesi iki farklı şekilde mümkün olabilir. Bunlardan ilkinde tüketiciler bağımsız şekilde teslim tarihi belirlerken diğerinde üretici ile tüketici ortak bir mutabakata vararak teslim tarihlerine karar vermektedir.

2.3.1. Teslim tarihi belirleme kuralları

Teslim tarihi belirleme işlemi bazı kurallara dayanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu kurallardan bazıları;

- Ortak teslim tarihi belirleme (CON); teslim tarihleri tüm işler için sabittir.
- Eşit paylı teslim tarihi belirleme (SLK); toplam proses zamanına hesaplanan bir pay eklenerek teslim tarihleri belirlenir.
- Toplam iş kapsamlı teslim tarihi belirleme (TWK); sabitler iş süreleri ile toplanmaz, çarpılır ve bu şekilde teslim tarihleri belirlenir.
- İş kapsamlı ve paylı teslim tarihi belirleme (PPW); TWK ile SLK'nın karışımı niteliğindedir.
- Operasyon sayısına bağlı teslim tarihi belirleme (NOP); işlerin operasyon sayıları belirli bir sabit ile çarpılır ve teslim tarihleri belirlenir.
- Rasgele teslim tarihi belirleme (RDM); teslim tarihleri belirli bir dağılıma göre rassal üretilmektedir.
- Toplam işlem süresine dayalı teslim tarihi belirleme (TPT); işin toplam işlem süresine bağlı olarak bir teslim tarihi belirlenmektedir.

Belirli sayıda işin her birine teslim tarihi belirlerken literatürde yer alan belli başlı kurallardan faydalanılmaktadır. Bu kurallar, teslim tarihlerinin ne şekilde belirleneceğini ifade eden ve proses planlama için kritik kavramlardır. Çalışmada kullanılan kurallar devam eden bölümde detaylıca anlatılmıştır.

2.3.1.1. CON (Ortak)

En temel teslim tarihi belirleme yöntemi olan CON yönteminde, işlerin tamamına aynı teslim tarihi verilmektedir. n adet işin müşteri tarafından aynı tarihte teslim edilmesi istendiği durumlarda sıklıkla kullanılan basit bir yöntemdir. Üst ürüne yetişmesi gereken alt ürünlerin teslim tarihleri, nihai ürüne yetişmesi gereken tüm alt montajlar ve aynı kamyonu yetişmesi gereken partilere hep CON ile teslim tarihi verilir.

2.3.1.2. SLK (Eşit pay)

Toplam iş süresine belirli bir pay eklenerek teslim tarihlerinin belirlenmesi yöntemidir. Bu yöntem denklem 2.3'te gösterilmektedir.

$$SLK_i = p_i + q_i \quad (2.3)$$

Burada, p_i değeri i işinin toplam proses zamanını ifade etmektedir. Çalışmada q_i (slack) değeri için çözüm havuzunu genişletmek ve daha iyi çözümlere ulaşmayı kolaylaştırmak amacıyla 3 farklı değer kullanılmaktadır. Bunlar sırasıyla; $\frac{q_i}{2}$, q_i ve $\frac{3q_i}{2}$ 'dir. Dolayısıyla, kural listesinde 3 adet SLK kuralı yer almaktadır.

2.3.1.3. WSLK (Ağırlıklı eşit pay)

WSLK, SLK yönteminin müşteri ağırlıklarının da hesaba katıldığı versiyonudur. Mantık olarak yine proses zamanlarına belirli bir pay eklenmesine dayanır ancak bu pay eklenirken ağırlıklarla çarpılarak müşterilerin önem dereceleri de probleme dahil edilmiş olur. WSLK yöntemine ilişkin formül, denklem 2.4'te gösterilmektedir.

$$WSLK_i = p_i + q_i * Z_i \quad (2.4)$$

Burada, p_i değeri i işinin toplam proses zamanını, Z değeri ise, müşteri ağırlıkları ile ters orantılı bir değeri ifade etmektedir. Tıpkı SLK yönteminde olduğu gibi WSLK yönteminde de q_i (slack) değeri için 3 farklı değer kullanılmaktadır. Bunlar sırasıyla; $\frac{q_i}{2}$, q_i ve $\frac{3q_i}{2}$ 'dir. Dolayısıyla, kural listesinde 3 adet WSLK kuralı yer almaktadır.

2.3.1.4. TWK (Toplam iş kapsamı)

SLK ve WSLK kurallarında, pay olarak eklenen sabit değerler, proses zamanları ile toplanarak işleme alınıyordu. TWK yönteminde ise bu değerler proses zamanları ile çarpılarak işleme alınmaktadır. Bu yöntemle belirlenen teslim tarihlerinde denklem 2.5 kullanılmaktadır.

$$TWK_i = p_i * k \quad (2.5)$$

Burada, p_i değeri i işinin toplam proses zamanını, k değeri ise, belirlenen sabit değeri ifade etmektedir. Daha geniş bir çözüm kümesi elde etmek ve daha iyi sonuçlara

kolayca ulaşabilmek amacıyla bu yöntemde kullanılan k sabiti için 3 farklı değer kullanılmıştır. Dolayısıyla, kural listesinde 3 adet TWK kuralı yer almaktadır.

2.3.1.5. WTWK (Ağırlıklı toplam iş kapsamı)

WTWK yöntemi, TWK kuralının müşteri ağırlıkları ile donatılmış versiyonudur. TWK'nın mantığını aynen kullanan bu yöntemde tek fark, k sabitinin Z değeri ile çarpılması sayesinde, probleme müşteri ağırlıklarının da entegre edilmesidir. Bu yönteme ait formül, denklem 2.6'daki gibidir.

$$WTWK_i = p_i * k * Z_i \quad (2.6)$$

Burada, p_i değeri i işinin toplam proses zamanını, k değeri ise, belirlenen sabit değeri ifade etmektedir. Benzer şekilde, bu yöntemde kullanılan k sabiti için 3 farklı değer kullanılmıştır. Dolayısıyla, kural listesinde 3 adet WTWK kuralı yer almaktadır.

2.3.1.6. NOP (Operasyon sayısı)

NOP kuralı, işlere operasyon sayısına bağlı olarak teslim tarihi veren bir kuraldır. n adet işin teslim tarihlerinin belirlenmesi amacıyla, her i işinin operasyon sayısının belirli bir katsayı ile çarpılması sonucunda teslim tarihlerinin belirlenmesi mantığına dayanmaktadır. NOP kuralına ait eşitlik denklem 2.7'de sunulmaktadır.

$$NOP_i = N_i * k \quad (2.7)$$

Burada, N_i değeri i işinin operasyon sayısını, k değeri ise belirlenen sabit değerini ifade etmektedir. Aynı mantıkla, bu yöntemde kullanılan k sabiti için 3 farklı değer kullanılmıştır. Dolayısıyla, kural listesinde 3 adet NOP kuralı yer almaktadır.

2.3.1.7. WNOP (Ağırlıklı operasyon sayısı)

WNOP kuralı, NOP kuralının müşteri ağırlıkları ile yeniden düzenlenmiş halidir. NOP kuralının mantığına sadık kalarak, yalnızca müşteri ağırlığı değerinin çarpılması suretiyle ortaya çıkan WNOP kuralına ait formül denklem 2.8'de gösterilmektedir.

$$WNOP_i = N_i * k * Z_i \quad (2.8)$$

Burada, N_i değeri i işinin operasyon sayısını, Z değeri müşteri ağırlıklarına göre ters orantılı bir değeri ve k değeri ise belirlenen sabit değerini ifade etmektedir. Çözüm

kümesini genişletmek ve daha hızlı ve kolay şekilde daha doğru çözümlere ulaşabilmek amacıyla bu yöntemde kullanılan k sabiti için 3 farklı değer kullanılmıştır. Dolayısıyla, kural listesinde 3 adet WNOP kuralı yer almaktadır.

2.3.1.8. NOPPT (İşlem süresi ve operasyon sayısı)

NOPPT kuralı, operasyon sayısını ve proses zamanları birlikte dikkate alarak hareket eden bir teslim tarihi belirleme kuralıdır. n adet işin her birine teslim tarihi verilirken her i işinin kaç operasyonunun olduğuna bakılmakta, bununla birlikte toplam proses zamanı dikkate alınmaktadır. NOPPT kuralının formülü denklem 2.9'da sunulmaktadır.

$$NOPPT_i = p_i * k_1 + NOP_i * k_2 \quad (2.9)$$

Burada, p_i değeri i işinin toplam proses zamanını, k_1 değeri proses zamanı için belirlenen sabit değeri, NOP_i değeri i işinin operasyon sayısını ifade ederken, k_2 değeri operasyon sayısının katsayısını tanımlamaktadır. Çalışmada NOPPT kuralı için 3 farklı k_1 ve 3 farklı k_2 değeri ele alınmaktadır. Dolayısıyla, kural listesinde 9 adet NOPPT kuralı yer almaktadır.

2.3.1.9. WNOPPT (Ağırlıklı işlem süresi ve operasyon sayısı)

WNOPPT kuralı, NOPPT kuralının ağırlıklarla donatılmış versiyonudur. NOPPT kuralının yapısına müşteri ağırlıklarının entegre edilmesi sonucu oluşturulmuştur. WNOPPT kuralına ait formül denklem 2.10'da gösterilmektedir.

$$WNOPPT_i = p_i * k_1 * Z_1 + NOP_i * k_2 * Z_2 \quad (2.10)$$

Burada, p_i değeri i işinin toplam proses zamanını, k_1 değeri proses zamanı için belirlenen sabit değeri, NOP_i değeri i işinin operasyon sayısını ifade ederken, k_2 değeri operasyon sayısının katsayısını tanımlamaktadır. Yine, Z_1 ve Z_2 değerleri, müşteri ağırlıkları ile ters orantılı olacak şekilde belirlenmiş değerlerdir. Çalışmada WNOPPT kuralı için 3 farklı k_1 ve 3 farklı k_2 değeri ele alınmaktadır. Dolayısıyla, kural listesinde 9 adet WNOPPT kuralı yer almaktadır.

2.3.1.10. PPW (Toplam iş kapsamı ve pay)

PPW yöntemi, SLK yöntemi ile TWK yönteminin birleştirilmesi sonucu oluşturulmuş bir yöntemdir. Toplam proses zamanının belirli bir katsayı değeri ile çarpılması ve üzerine bir miktar pay eklenmesi mantığına dayanmaktadır. PPW kuralı, denklem 2.11’de gösterilmektedir.

$$PPW_i = k * p_i + q_i \quad (2.11)$$

Burada, p_i değeri i işinin toplam proses zamanını, k değeri ise, belirlenen sabit değeri ifade etmektedir. PPW kuralı, çözüm kümesinde oldukça geniş bir arama yapar. Bu genişliği sağlayabilmek ve tek seferde daha çok çözümle hızlı sonuç elde edebilmek amacıyla bu yöntemde kullanılan k sabiti ve q_i değeri için 3’er farklı değer kullanılmıştır. Dolayısıyla, kural listesinde 9 adet PPW kuralı yer almaktadır.

2.3.1.11. WPPW (Ağırlıklı toplam iş kapsamı ve pay)

WPPW kuralı, PPW kuralının müşteri ağırlıkları dahil edilmiş halidir. PPW kuralının yapısı bozulmadan yalnızca müşteri ağırlıkları değerleriyle formülün genişletilmesi sayesinde ağırlıkların işleme alınmasına dayanmaktadır. WPPW kuralına ait formül denklem 2.12’de sunulmaktadır.

$$WPPW_i = p_i * k * Z_1 + q_i * Z_2 \quad (2.12)$$

Burada, p_i değeri i işinin toplam proses zamanını, k değeri ise, belirlenen sabit değeri ifade etmektedir. Z_1 ve Z_2 değerleri, müşteri ağırlıkları ile ters orantılı olacak şekilde belirlenmiş değerlerdir. WPPW kuralı, çözüm kümesinde oldukça geniş bir arama yapar. Bu genişliği sağlayabilmek ve tek seferde daha çok çözümle hızlı sonuç elde edebilmek amacıyla bu yöntemde kullanılan k sabiti ve q_i değeri için 3’er farklı değer kullanılmıştır. Dolayısıyla, kural listesinde 9 adet WPPW kuralı yer almaktadır.

2.3.1.12. RDM (Random allowance – Rasgele)

RDM yönteminde, n adet işin teslim tarihleri rasgele atanmaktadır. Ancak, söz konusu rasgeleliğin belirli bir olasılık dağılıma uyması gerekmektedir. Literatürde genellikle normal dağılıma uyacak şekilde atamalar yapıldığı görülmektedir.

2.4. Teslimat

İşletmeler, ürünlerini doğru zamanda müşteriye teslim ederek ve daha kaliteli ürünler sunarak müşterilerin memnuniyetini mümkün mertebe artırmayı amaçlamaktadırlar. Özellikle e-ticaret sektörünün büyümesiyle rekabet koşulları iyice artmış ve işletmeler doğru ürünü, doğru zamanda teslim etmek mecburiyetinde kalmışlardır. Çünkü, günümüzde ürünlerin uygun fiyatta olmasının yanı sıra müşterilerin talep ettiği zamanda ulaştırılması da doğrudan işletme performansına yansımaktadır. Bunun için, teslimat planlarının çok iyi bir şekilde organize edilmesi şarttır. Dolayısıyla, teslimat planlama işletmelerin rekabet koşullarında ayakta kalabilmesi açısından kritiktir (Kotler ve Keller, 2015). Araç rotalama problemi (ARP), en temel manada belirli bir dağıtım noktasından yine belirli noktalara müşteri taleplerinin minimum maliyetle taşınması olarak açıklanabilir. Dağıtım noktaları bir ya da birden fazla olabileceği gibi, müşteriler de belirli bir alana yayılmış birden fazla noktada yer alabilir (Laporte ve ark., 2000).

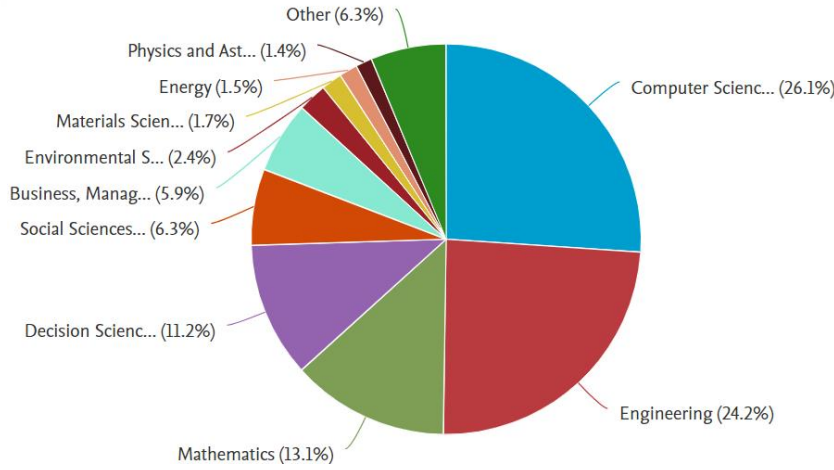
Tedarik zincirlerinde teslimat ana iş süreçlerinden biridir. Bundan dolayı, doğru planlanabilmesi hem taktiksel hem de operasyonel düzeyde önemlidir (Adulyasak ve ark., 2015). Teslimatın optimizasyonu farklı türlerde yapılmaktadır. Bazı durumlarda, işler partiler halinde üretilmekte ve araca yüklenip teslimat için gönderilmektedir. Bu durumda, işlere ortak teslim tarihleri verilmekte ve verilen teslim tarihleri ürünlerin araca yüklenmeye hazır oldukları tarihi ifade etmektedir ve o ana kadar problem ele alınmaktadır (Ullrich, 2013). Bir diğer durum, teslimat için dış kaynaklı firmalar ile anlaşılması durumudur. Bu tür teslimatta, üçüncü parti lojistik (3PL) firmaları ürünleri üreticiden teslim alıp tüketiciye ulaştırmaktadır. Bu tür teslimatta optimizasyon ürünlerin 3PL firmalarına teslim edildiği ana kadar yapılmaktadır (Fu ve ark., 2017). Teslimat optimizasyonunda katedilen mesafenin minimizasyonu, yakıt minimizasyonu, toplam teslimat süresi ya da toplam ulaşım maliyetinin minimizasyonu olabilir (Karaoğlu ve Kesen, 2017).

ARP konusunda yapılan ilk çalışmanın Dantzig ve Ramser (1959) tarafından yapıldığı kabul edilmektedir. Bu çalışmada, tek bir dağıtım noktasından müşterilerin ihtiyaçlarını karşılayacak araç filosunun minimum maliyet ile rotalanması amaçlanmıştır. Dantzig ve Ramser, benzin dağıtım problemi ile ilgilenmişler ve bu problemi matematiksel olarak ifade etmişlerdir (Büyükyılmaz, 2017). ARP, NP-hard

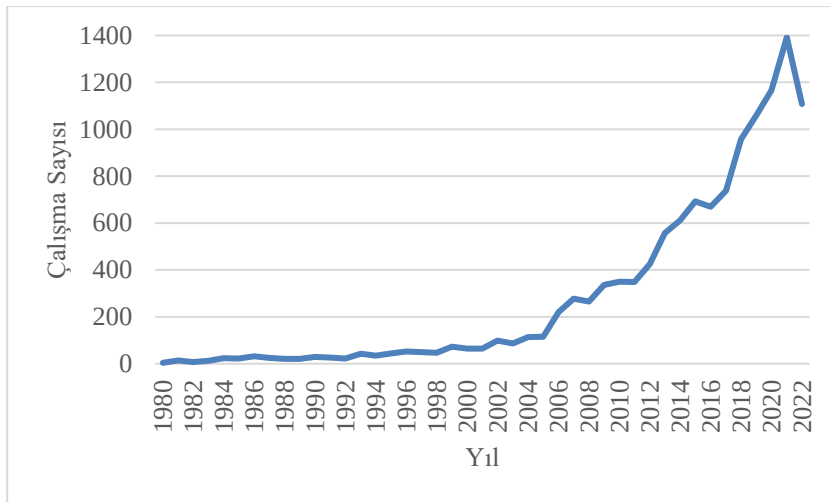
bir problem çeşididir (Bent ve Van Hentenryck, 2004). Literatürde, ARP ile ilgili geliştirilen ve farklı alanlarda yer alan çok sayıda matematiksel model ve çözüm yöntemi bulunmaktadır (Toth ve Vigo, 2002).

Klasik ARP, kapasite kısıtlı ARP olarak da geçmektedir ve bu problem türünde, eş araçlardan oluşan bir filo, konumları ve talepleri belli olan müşterilerin taleplerini karşılamak üzere, merkezi bir depodan başlayan ve teslimat sonunda tekrar bu depoya dönen bir rotada hareket etmektedir. Bu şartlar altında taşıma maliyetini minimize eden rotaların oluşturulması hedeflenmektedir (Büyükyılmaz, 2017).

ARP, çok sayıda türü ile geniş bir alandır ve özellikle son yıllarda çalışma sayısını giderek artıran bir problem türüdür (Vidal ve ark., 2020). Literatürde ARP ile ilgili yapılan çalışma sayılarına ait grafikler Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. ARP probleminin çalışma alanları.

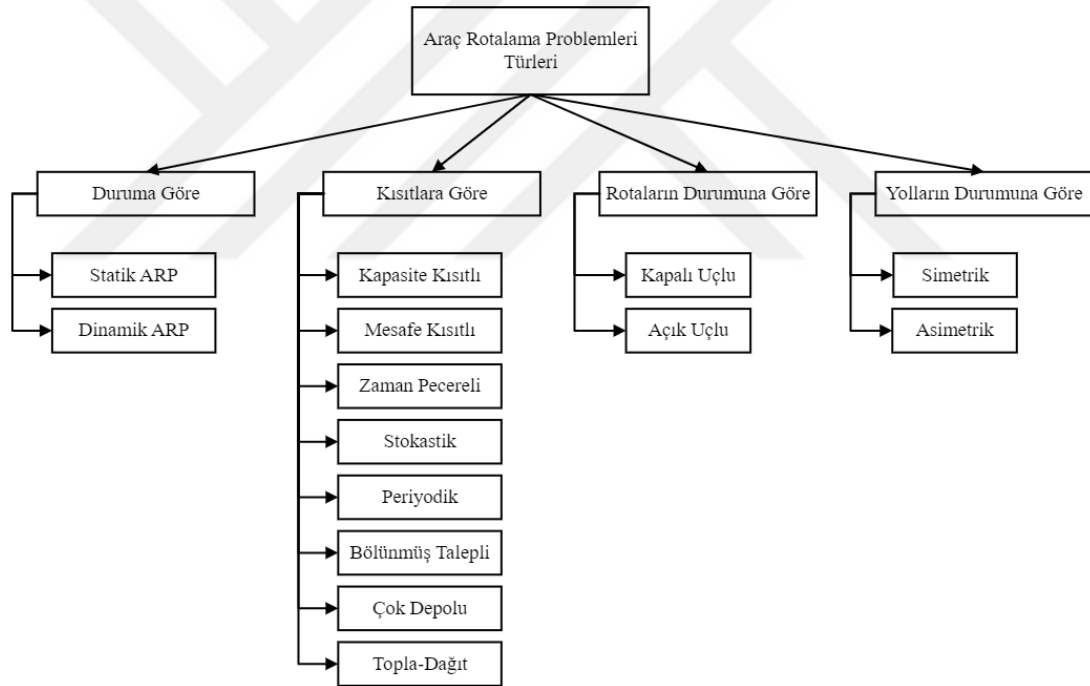


Şekil 2.2. ARP konusunda yıllara göre çalışma sayıları.

Toth ve Vigo (2002), araç rotalama problemleri için geçerli olabilecek bazı amaç fonksiyonlarını şöyle sıralamışlardır:

- Toplam mesafeyi minimize etmek
- Toplam seyahat süresini minimize etmek
- Toplam taşıma maliyetini en aza indirmek
- Araçların yüklerini dengelemek
- Müşteri taleplerinin tamamını minimum sayıda araçla karşılamak
- Ceza maliyetlerini minimize etmek

Klasik ARP'nin geliştirilmesinin ardından farklı alanlarda yapılan ve gündelik hayatta var olan daha gerçekçi problemlere ait çalışmalar, bir süre sonra ARP'nin farklı problem türlerine ayrılmasına sebep olmuştur. ARP türlerine ait bilgiler Şekil 2.3'te sunulmuştur (Can Atasagun, 2015).



Şekil 2.3. ARP türleri.

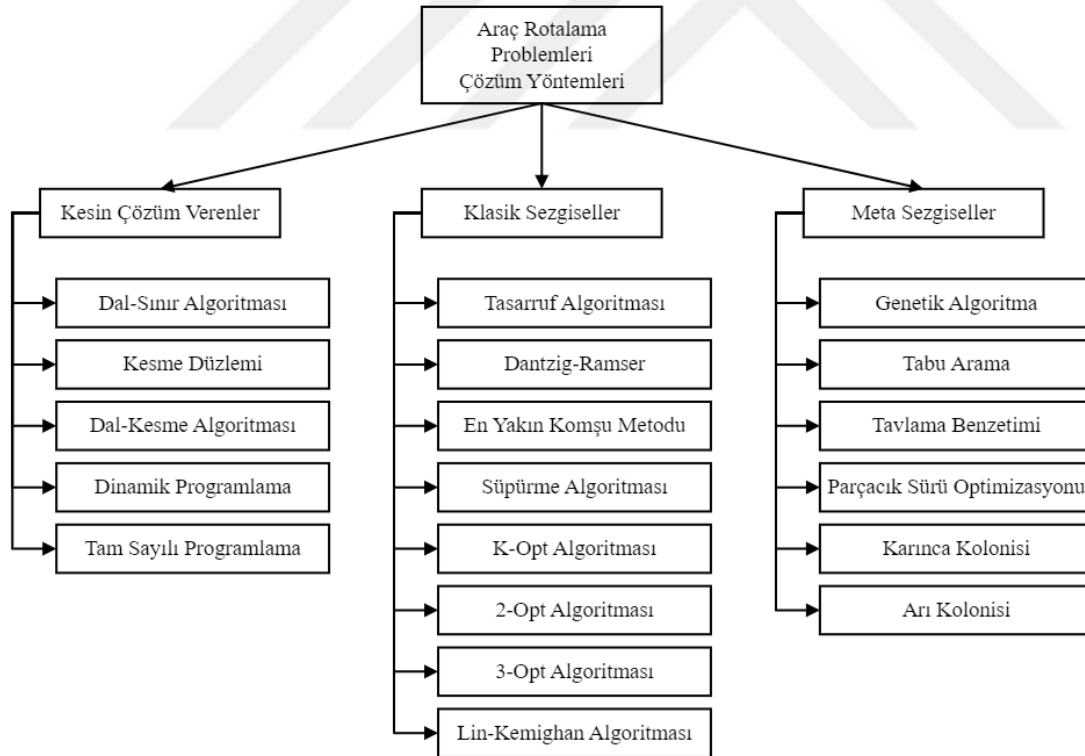
Problem türlerine göre literatürde ARP ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, Toth ve Vigo (1999), Bent ve Van Hentenryck (2004), Laporte ve ark. (2000), Nagy ve Salhi (2005), Nanry ve Wesley Barnes (2000) ve Meng ve ark. (2005) gibi bazı çalışmalar rota üzerinde kaç noktada durulacağını önceden belli olduğu çalışmalar gerçekleştirmişlerdir.

Lee ve Ueng (1999), Brandão ve Mercer (1997), Angelelli ve Grazia Speranza (2002), Cordeau ve Laporte (2001), Archetti ve ark. (2005), Fu (2002), Bard ve ark. (1998) ve Süral ve Bookbinder (2003) gibi bazı çalışmalarda ise müşteri talepleri önceden bellidir.

Fleischmann ve ark. (2004), Angelelli ve Grazia Speranza (2002), Kim ve ark. (2005) ve Malandraki ve Daskin (1992) gibi çalışmalarda dağıtım ağı önceden tasarlanmıştır. Ichoua ve ark. (2000), Gendreau ve ark. (1996), Letchford ve Eglese (1998), Chuah ve Yingling (2005), Zografos ve Androutsopoulos (2004) ve Ahn ve Shin (1991) gibi bazı çalışmalarda ise tek depo ve tek merkez kullanılmaktadır.

2.4.1. Araç rotalama problemleri çözüm yöntemleri

Araç rotalama problemlerinin çözümünde 3 grup yöntem türünden bahsetmek mümkündür. Bunlar; kesin çözüm veren yöntemler, klasik sezgisel algoritmalar ve meta sezgisel algoritmalar. Her yöntem grubunun altında pek çok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler Şekil 2.4'te sunulmuştur (Can Atasagun, 2015).



Şekil 2.4. ARP çözüm yöntemleri.

Kesin çözüm veren yöntemler daha çok, nispeten küçük ve kolay problemlerde kesin çözüm yöntemleri kullanılmaktadır. Kesin çözüm yöntemleri ile optimum çözüme ulaşabilmek mümkündür. Ancak, topla-dağıt, zaman pencereli ya da değişken

kapasiteli gibi daha karmaşık ARP çeşitlerinde kesin çözüm yöntemleri ile ya çözüme ulaşamaz ya da çözüme ulaşmak oldukça ciddi zaman alır. Dolayısıyla, kesin çözüm yöntemlerinin en büyük avantajı optimum çözüme ulaşmak iken, en büyük dezavantajı ise makul zamanda çözüm ürettiği problem sayısının oldukça sınırlı olmasıdır. Bu gruptaki dal-sınır algoritması gibi yöntemlerin büyük problemlerde optimum çözüme ulaşması için geçen zaman, küçük problemlere oranla üstel olarak artmaktadır (Küçüköğlü, 2010).

Klasik bir ARP’de müşteri sayısının, iş sayısının, operasyon sayısının, araç sayısının artması ya da müşterilerin büyük bir bölgede dağınık şekilde yer alması problemin büyüklüğünü ciddi şekilde arttırmaktadır. Dolayısıyla, her bir araç için oluşturulması gereken rota ihtimalleri de artmaktadır. Bu nedenle, büyüyen çözüm uzayında optimum sonucu aramak pek mantıklı bir çerçevede yer almamaya başlamaktadır. Bu noktada, klasik sezgisel yöntemler kullanılmaya başlamıştır.

Sezgisel yöntemler, geniş çözüm uzayında belirli aramalar yaparak çok kısa bir sürede en iyi çözüme son derece yakın çözümler üretebilme yeteneğine sahiptirler (Santos ve ark., 2009). Klasik sezgisellerin meta sezgisellere göre farkı, çözümün maliyetini minimize edebilmek adına adım adım ilerlemeleridir.

Klasik sezgiseller, üç farklı grupta incelenebilir. İlk grup olan sezgiseller yapısal sezgiseller olarak adlandırılırlar ve belirli bir kriteri kullanarak işleri rotalara atarlar. Genellikle, önce sırala sonra rotala mantığıyla çalışmaktadırlar. Tasarruf algoritması yapısal sezgisellerin en çok kullanılanlarından biridir. İkinci grupta ise bir tane başlangıç rotası ile çözüme başlayıp daha sonra bu rota üzerinde değişikliklere giderek yeni rotalar oluşturan geliştirici sezgiseller yer almaktadır. Bu tip sezgiseller, bir performans kriteri üzerinden mevcut rotayı ve değişen rotayı inceler ve daha iyi olanı seçerek iterasyonlara devam eder.

Üçüncü grupta iki aşamalı sezgiseller adını alan yöntemler yer alır (Büyükyılmaz, 2017). Bu sezgiseller, bir problemi iki alt probleme dönüştürerek çözüme giderler. Bu grup önce rotala sonra sırala mantığıyla çalışmaktadır. Önce her bir iş için rotalar oluşturulur daha sonra rota içerisindeki işler sıralanır. Tasarruf, süpürme ve en yakın komşu algoritmaları klasik sezgisellere örnek olarak verilebilir.

2.4.1.1. Tasarruf algoritması

1964 yılında klasik ARP için bir çözüm yöntemi olması adına geliştirilen tasarruf algoritması, günümüzde hala araç rotalama alanında yaygın olarak kullanılan algoritmalarından biridir. Bu algoritma, her bir müşteri çiftini ayrı ayrı ele alarak aralarındaki maliyet tasarrufunu hesaplar. Algoritma müşteri çiftini ele alırken, eğer her bir müşteri için atölyeye geri dönmektense, iki müşteriye arka arkaya gittikten sonra atölyeye dönülürse ne kadar tasarruf sağlanmış olur düşüncesiyle hareket etmektedir. Tüm müşteri çiftleri için tasarruflar hesaplandıktan sonra büyükten küçüğe doğru tasarruflar ele alınarak müşterileri sıralar ve rotaları bu sırayı baz alarak oluşturmaya çalışır. Rotayı oluştururken ele aldığı bir diğer kısıt ise araç kapasitesidir.

2.4.1.2. Süpürme algoritması

Gillet ve Miller tarafından 1974'te geliştirilen bu algoritma, başlangıç noktasına atölyeyi almaktadır. Müşterilerin doğrusal bir zeminde atölyeye göre konumlarından hareketle her bir müşterinin polar açıları hesaplanır ve açısı en dar olan müşteri teslimat sırasında ilk sıraya konur. Bu şekilde tüm bölgeyi tarar ve rotayı oluşturmaya devam eder. Araç kapasitesinin aşılması durumunda, diğer araç için yeni bir rota oluşturarak çalışmaktadır.

2.4.1.3. En yakın komşu algoritması

En yakın komşu algoritması, gezgin satıcı problemini çözebilmek için geliştirilmiş ve bu algoritma zamanla genelleştirilerek ARP'lerin pek çok farklı çeşidinde uygulanmaya başlamıştır. Her bir adıma, mevcut bulunduğu noktaya en yakındaki komşu noktaya ilerleyen bu algorithmada başlangıç noktası olarak depo ya da atölye alınmaktadır. Tüm noktalar rotalanıncaya kadar algoritma bu mantıkla çalışmasını sürdürür. Herhangi bir noktada en yakın komşu sayısı birden fazla ise, alternatif rotaları ayrı ayrı ele alır (Büyükyılmaz, 2017).

Meta sezgisel yöntemler, ARP'lerin en karmaşık problemlerinin çözümünde sıklıkla kullanılmaktadır. Günümüzde, gerçek hayat koşullarına uygun olarak ele alınan, dinamik talep, farklı türde ve kapasitede araçlar, belirli zaman aralığında teslimat gerçekleştirilmesi gibi problemleri çözümünde pek çok farklı meta sezgisel algoritmanın kullanıldığına rastlanmaktadır. Meta sezgisel yöntemlerin en büyük avantajı, problem ne kadar büyük olursa olsun en iyiye yakın çözümleri makul zaman

aralığında bulabilmesidir. Ancak, özellikle yöntemlerin içerisinde bulunan rassallığın fazla olması nedeniyle bu yöntemler kesin çözüm garantisi vermez. Buna rağmen, çok geniş çözüm uzaylarındaki verimlilikleri nedeniyle sıklıkla kullanılan yöntemlerdir. Tavlama benzetimi, evrimsel strateji, tabu arama, genetik algoritma, yapay sinir ağları, karınca kolonisi, parçacık sürü optimizasyonu gibi algoritmalar meta sezgisellere örnek olarak verilebilir.





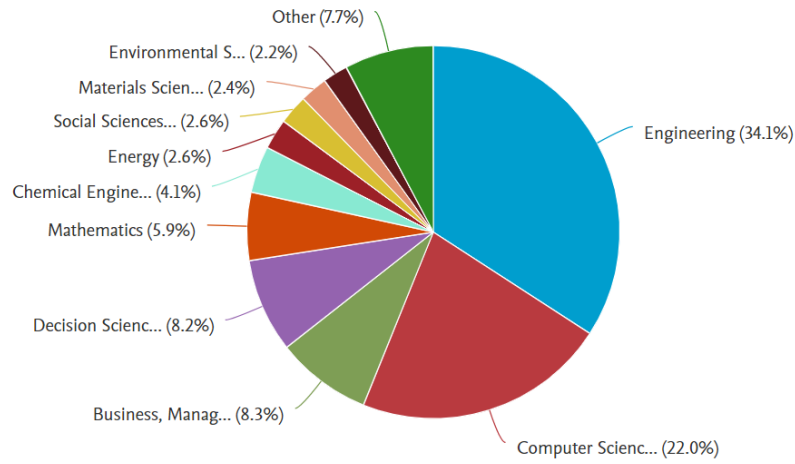
3. BÜTÜNLEŞİK ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, tez çalışmasında entegre edilmesi hedeflenen fonksiyonların daha önceden yapılan entegrasyonları ya da buna benzer çalışmalar hakkında bilgiler verilmektedir.

3.1. Bütünleşik Proses Planlama ve Çizelgeleme

IPPS problemi üzerine çok fazla sayıda makale bulunabilmektedir. Bu problem NP-hard olduğundan dolayı kesin çözüm sadece çok çok küçük problemler için mümkündür. Literatürde bu problemler için sezgisel çözümlerin kullanıldığı görülmektedir. Bazı çalışmalar ise problemi yükleme ve çizelgeleme olmak üzere alt problemlere ayırarak bir nebze kolaylaştırmayı düşünmüşlerdir. Bu durumda önce alternatif proses planlar arasından biri seçilmekte sonra yükleme bölümü hallolduktan sonra ortaya çıkan problemin çizelgelemesi yapılmaktadır.

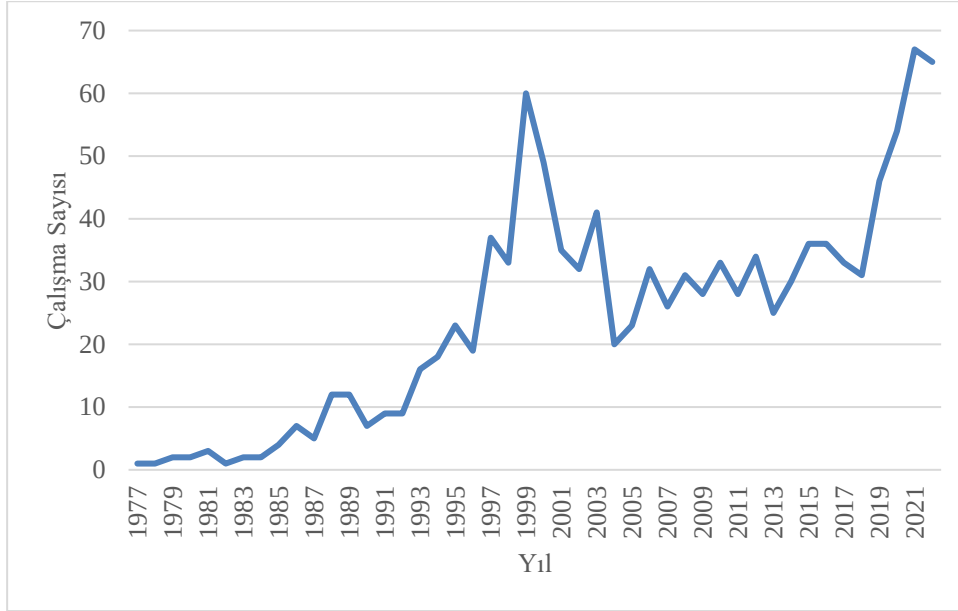
IPPS probleminde gecikme, erken tamamlanma, ortalama yarı-mamul ve ortalama makine kullanımı gibi performans ölçüleri optimize edilmeye çalışılmıştır. IPPS çalışmalarının alanlarına göre dağılımı Şekil 3.1’de sunulmuştur.



Şekil 3.1. IPPS probleminin çalışma alanları.

IPPS alanında yapılan makale taramalarına bakıldığında; bu konuda yapılan ilk makalelere örnek olarak Meenakshi Sundaram ve Fu (1988), Nasr ve Elsayed (1990), Khoshnevis ve Chen (1991), Hutchison ve ark. (1991), Zhang ve Mallur (1994) gibi

çalışmalar gösterilebilir. Tan ve Khoshnevis (2000), IPPS konusunda güzel bir makale taraması hazırlamışlardır. Ayrıca Li ve ark. (2010d) ve Phanden ve ark. (2011) bu konuda diğer makale taramalarıdır. IPPS konusunda her yıl çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Şekil 3.2’de görülebileceği üzere IPPS, özellikle 2005 yılından beri belirli bir ortalamanın üzerinde çalışmaya konu olmuş bir alandır.



Şekil 3.2. IPPS konusunda yıllara göre çalışma sayıları.

Wilhelm ve Shin (1985), esnek imalat sistemleri yapısı içerisinde alternatif operasyonları hesaba katmak için üç plan geliştirmişlerdir. Operasyon esnekliği olmadığı durumu bu durumlarla karşılaştırmışlar ve operasyon esnekliğinin akış zamanını azalttığını gözlemlemişlerdir. Meenakshi Sundaram ve Fu (1988), IPPS probleminin çözümü için sistemli bir metot önermişlerdir. Önce operasyonları makinelere atamışlar ve en yüklü makineyi anahtar makine olarak almışlar ve bu makinenin yükünü azaltmaya çalışmışlardır. Çalıştıkları problemlerde yaklaşımlarının iyi çalıştığını görmüşlerdir.

Nasr ve Elsayed (1990), alternatif makine aletlerinin olduğu genel atölye tipi makine sisteminde akış zamanlarını minimize etmeyi çalışmışlardır. Demir ve Wu (1996), IPPS problemini yükleme ve çizelgeleme alt problemlerine ayırmışlar ve karışık tamsayılı programlama problemini çözerek işlerin rotalarını seçmişler ve çizelgeleme bölümünde güçlü bir sezgisel gönderme kuralı olan ATC (Apparent Tardiness Cost, Açık Gecikme Maliyeti) sezgiseli ile işleri çizelgelemişlerdir. Morad ve Zalzal (1999), entegre proses planlama ve çizelgelemeyi genetik algoritma tabanlı bir

yöntemle çalışmışlardır. Çalışmada, erken ve geç tamamlanmalardan oluşan maliyetleri minimize etmeyi amaçlamışlardır. Lee ve Kim (2001), genetik algoritma ile entegre proses planlama ve çizelgeleme çalışması gerçekleştirmişlerdir.

Jiang ve Chen (1993), alternatif proses planlarının çizelgeleme performansı üzerinde etkilerini araştırmışlardır. Khoshnevis ve Chen (1991), planlama ve çizelgelemenin entegre edilmesinin potansiyel etkisini göstermek için sezgisel geliştirmişlerdir. Chen ve Khoshnevis (1993), IPPS problemini alternatif proses planları ile çizelgeleme olarak çalışmışlardır. Weintraub ve ark. (1999), atölye ortamında entegre proses planlama ve çizelgelemeyi alternatif rotalar kullanılan problemler için bir prosedür önermiştir.

Hutchison ve ark. (1991), iki tane çevrim dışı ve bir tane gerçek zamanlı çizelgeleme planlarını önermişlerdir. Plan genel optimum çözümü verse de ancak çok çok küçük problemler için uygulanabilmektedir. Jiang ve Hsiao (1994), probleme analitik çözüm önermişler fakat geliştirdikleri 0-1 ikili programlama sadece küçük problemler için uygulanabilmektedir.

Zhang ve Wong (2015), esnek imalat sistemlerinde çalışan bir işyerinde IPPS problemlerini çözmek için nesne kodlama genetik algoritması (OCGA) önermişlerdir. Bu yöntemde operasyon sıralarını doğrudan kromozom olarak kullanmışlardır. Huang ve ark. (1995), proses planlama ve çizelgeleme problemini aşamalı hale dönüştürüp çözmeye çalışmışlardır. Zhang ve Mallur (1994), üç modülden oluşan bir entegre model geliştirmişlerdir. Bu modüller, proses planlama, üretim çizelgeleme ve karar verme modülüdür.

Brandimarte (1999), çizelgelemede proses plan esnekliğinden faydalanırken çok amaçlı bir yaklaşım kullanmıştır. Kim ve Egbelu (1999), alternatif proses plan içeren çizelgeleme problemini çalışmışlardır. Shen ve Yao (2015), dinamik esnek atölye proses planlama ve çizelgelemesi problemi için yeni bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Matematiksel teknikler sadece çok küçük problemlerde kullanılabildiğinden literatürde makul sürede çözüm üretebilecek yöntemler kullanılmıştır. Yapay zekâ tekniklerinden genetik algoritmalar, evrimsel algoritmalar, çoklu etmenler ve yapay sinir ağları yaygın şekilde kullanılan tekniklerdir. IPPS ile ilgili bazı çalışmalar ve problemin çözümünde kullanılan yöntemler Tablo 3.1’de gösterilmektedir.

Tablo 3.1. IPPS problem çözümünde kullanılan yöntemler.

Yazar	Uygulanan Metot
Morad ve Zalzal (1999)	Genetik algoritma
Moon ve ark. (2002)	Matematiksel model + Genetik algoritma
Kim ve ark. (2003)	Evrimsel algoritma
Lee ve Kim (2001)	Simülasyon + Genetik algoritma
Leung ve ark. (2010)	Karınca kolonisi algoritması
Moon ve Seo (2005)	Evrimsel algoritma
Ueda ve ark. (2007)	Yapay sinir ağları
Shao ve ark. (2009)	Modifiye genetik algoritma
Li ve ark. (2010a)	Hibrit algoritma
Li ve ark. (2010b)	Evrimsel algoritma
Zhang ve ark. (2003)	Holonik mimari
Moon ve ark. (2008)	Karışık tam sayılı programlama
Guo ve ark. (2009)	Parçacık sürü optimizasyonu
Özgüven ve ark. (2010)	Matematiksel modelleme
Li ve ark. (2012)	Nash dengesi + Hibrit algoritma

IPPS konusunda özellikle son on yılda yapılmış güncel çalışmaların bazıları incelendiğinde; Zhang ve Wong (2018), atölye ortamında IPPS gerçekleştirebilmek için sezgisel yaklaşımlardan karınca kolonisi algoritmasını kullanmışlardır. Normal karınca kolonisi algoritmasından ziyade, probleme özgü olarak değiştirilmiş ve alternatif rota ve alternatif makineleri de ele alan bir algoritma söz konusudur. Ba ve ark. (2018), üretim süresini en aza indirebilmek amacıyla araç sınırlı kitlesel imalat ile

ilgili parçacık sürü optimizasyonu algoritmasını kullanarak çok katmanlı ve modüllü bir program hazırlamışlardır. Yaptıkları çalışmanın diğerlerinden farkı olarak, parti bölme işleminin uygulanmasını göstermişlerdir.

Sobeyko ve Mönch (2017), büyük ölçekli esnek atölye tipi üretim ortamında, farklı ürün ağaçlarının ve rotaların olabildiği bir IPPS uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Performans ölçütü olarak ağırlıklı toplam gecikmeyi ele almış ve problemin çözümünde karışık tam sayılı programlamadan yararlanmışlardır. Chaudhry (2012) çalışmasında, atölye ortamında en iyi proses planının ve işlerin programlanmasını eş zamanlı olarak dikkate almıştır. Bu problem sınıfını çözmek için elektronik tablo tabanlı bir genetik algoritma önermiştir. Luo ve ark. (2017), bir üretim sisteminde daha gerçekçi karar alma sürecinde dikkat edilmesi gereken çoklu hedeflere ihtiyaç olduğu düşüncesiyle çok amaçlı entegre proses planlama ve çizelgeleme (MOIPPS) problemini ele almışlardır. Çalışmada genetik algorithmadan yararlanılmıştır.

Zhang ve Wong (2016a), IPPS problemlerinde genellikle kurulum ve hazırlık zamanlarının göz ardı edildiğini düşünerek, bu sürenin ayrı ele alındığı, işlem sürelerinin içine dâhil edildiği ve tamamen yok sayıldığı üç farklı modeli çalışmışlardır. Çalışmalarında karınca kolonisi algoritmasının özelleştirilmiş bir halinden yararlanmaktadırlar. Zhang ve Wong (2016b), mevcut IPPS çözümlerinin bazı alternatif planların bulunmasının önüne geçtiğini ve katı yaklaşımlar olduğunu düşünerek kendi geliştirdikleri yapısal karınca kolonisi algoritması ile daha iyi sonuçlar aldıklarını göstermişlerdir.

Petrović ve ark. (2016a), IPPS problemlerinde çözüm uzayını daha kapsamlı bir şekilde araştırmak ve yerel optimuma sıkışmaktan kaçınmak için, parçacık sürü optimizasyonu algoritması ve kaos teorisine (cPSO) dayanan bir yöntemi kullanmaya odaklanmışlardır. Sonuçların genetik ve tavlama benzetimi ile yapılan çalışmalardan daha iyi olduğunu iddia etmektedirler. Petrović ve ark. (2016b), IPPS problemi için yeni bir sezgisel algoritma olan karınca aslanı algoritmasını (antlion optimization) denemişlerdir ve uygulanabilirliğini göstermişlerdir. Petrović ve ark. (2016c), parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritması ve kaos teorisinin kullanımına dayalı esnek proses planlarının optimizasyonu için yeni bir algoritma sunmaktadırlar. Çalışmanın ana fikri, arama alanını genişleten ve çeşitliliğini sağlayan on farklı kaotik haritayı uygulayarak, PSO'nun optimizasyon sürecinin kolaylaşmasını sağlamaktır.

Manupati ve ark. (2016) çalışmalarında, proses planı ve çizelgelemenin bütünleştirilmesi için mobil-etmen tabanlı bir yaklaşımı ele almışlardır. “Ağa bağlı üretim, ürün tasarımı ve üretime kadar bilgi ve bilginin dolaşımını ve entegrasyonunu sağlar ve coğrafi olarak dağıtılan işletmeler arasında kaynak paylaşımını mümkün kılar, böylece işletmelere pazara hızlı bir şekilde cevap verme yeteneği kazandırır” diyerek ağa bağlı üretim ortamında çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Liu ve ark. (2018), dinamik üretim sistemlerinde entegre proses planlaması ve çizelgeleme problemlerini çözmeyi amaçlayan, minimum üretim süresi hedefi ile kuantumdan esinlenmiş bir evrimsel strateji algoritması önermişlerdir. Liu ve ark. (2016), bir üretim ortamında araya acil işlerin alınması gibi acil durumları da ele alan bir IPPS problemini ele almışlardır. Bu problem için geliştirdikleri optimizasyon modelini karınca kolonisi algoritması yardımıyla çözmüşlerdir.

Márquez ve Ribeiro (2022), 2000 ile 2022 yılları arasında atölye tipi ve akış tipi imalat ortamlarındaki problemlerle ilgili bir araştırma makalesi hazırlamışlardır. Wen ve ark. (2022), makine arızasını temel alan bir dinamik IPPS problemini ele alırken, çözüm yöntemi olarak genetik algoritma tabanlı 2 farklı hibrit algoritma kullanmışlardır. Yang ve ark. (2022), birbirinden farklı iş ailelerine sahip tek makineli bir paralel partileştirme için toplam tamamlanma süresini minimize etmeyi amaçlayan bir IPPS problemini ele almışlardır.

Jin ve ark. (2016), gerçek üretim ortamlarında aynı anda gerçekleşmesi gereken birden fazla amacın var olabileceği düşüncesinden yola çıkarak, IPPS için 3 amaçlı bir matematiksel model ortaya koymuşlardır. Amaçlar sırasıyla, genel bitiş süresi, maksimum makine yükü ve makinelerdeki toplam iş yükü olmaktadır. Bu modeli çözebilmek için bir memetic (taklitçi - memetik) algoritma önermişlerdir. Yu ve ark. (2015), iki faz içeren yeni bir IPPS yöntemi önermektedir: statik faz ve dinamik faz. Statik fazda, her bir işin proses ağı, statik atölye durumuna göre üretilir ve dinamik fazda, her bir işin proses ve çizelgeleme planı mevcut atölye durumuna göre oluşturulur. Hem proses planlama hem de çizelgelemenin optimizasyon kriterleri göz önünde bulundurularak, IPPS problemini eniyilemek için genetik algoritma (GA) ve parçacık sürüsü optimizasyonunu (PSO) temel alan bir melez algoritma sunmaktadırlar. Mohapatra ve ark. (2015), çalışmaların çoğunun tek bir amaca yönelik olduğunu vurgulayarak IPPS problemini çözmek için çok amaçlı bir yaklaşım kullanmaktadır. Bu çalışmadaki üç farklı amaç, üretim süresinin, işleme maliyetinin

ve boŖta kalma sũresinin en aza indirilmesidir. Bu problemi cõzebilmek için özel olarak geliŖtirilmiŖ bir genetik algoritma kullanmıŖlardır.

Chu ve ark. (2015), üretimdeki belirsizlikler altında planlama ve çizelgeleme problemini entegre etmek için yeni bir yöntem önermektedirler. Entegre problem iki seviyeli bir program Ŗeklinde formũle edilmiŖtir. Planlama problemi st seviyede cõzũlũrken, planlama dönemlerindeki çizelgeleme problemleri alt dũzeydeki belirsizliklerin altında cõzũlmektedir. Problemin cõzũmũnde karıŖık tam sayılı programlama kullanılmıŖtır. Wang ve ark. (2014), IPPS probleminde geliŖtirilmiŖ bir karınca kolonisi optimizasyonu (ACO) algoritmasının uygulanmasını önermektedir; bu, çizelgeleme girdisi olarak alternatif proses yolunu kullanmaktadır ve üretim sistemlerinin gerçek durumuna göre uygun iŖlemleri ve iŖlem yollarını belirlemektedir.

Lv ve Qiao (2014) yaptıkları alıŖmada, sũrekli takip edilen ve eŖitli belirsizliklere sahip bir üretim ortamında IPPS problemini ele almıŖlardır. Bir retim sisteminde karŖılaŖılabilecek 3 farklı durum üzerinden IPPS problemini cõzũp yeniden çizelgeleme yapabilen dinamik bir model oluŖturmuŖlardır. Bu sayede, hem IPPS için iyi bir cõzũm belirlemiŖ hem de 3 farklı belirsizlikle entegre bir yeniden çizelgeleme yaklaŖımı ortaya koymuŖlardır. Haddadzade ve ark. (2014), pek çok IPPS alıŖmasında iŖlerin deterministik kısıtlar altında incelendiğinden hareketle gerçek hayata daha yakın sonuçlar alabilmek adına stokastik parametreler ele almıŖlardır. nce tũm olası proses planlarını üretilip ardından Dijkstra algoritması kullanarak dört adet optimale yakın proses planını belirlemiŖlerdir. Daha sonra Monte Carlo ile on senaryo oluŖturmuŖlardır. Bu modeli melez bir tavlama-tabu algoritması ile cõzmũŖlerdir. Bensmaine ve ark. (2014), her biri birden fazla konfigũrasyona sahip, yeniden yapılandırılabilen ve farklı kapasitelerde farklı iŖlemler gerekleŖtirebilen takım tezgahlarından oluŖan yeniden yapılandırılabilir bir imalat ortamında IPPS problemine cõzũm olabilecek yeni bir sezgisel yaklaŖım nermiŖlerdir.

Wan ve ark. (2013), IPPS problemini optimize etmek için yeni iki seviyeli bir genetik algoritma akıŖ Ŗeması nermiŖlerdir. alıŖmada, her bir iŖin operasyon esnekliğı, sıralama esnekliğı ve iŖlem esnekliğı eŖ zamanlı olarak değerdendirilmektedir. Phanden ve ark. (2013), bir Ŗirkette uygulanabilir ve IPPS'nin her iki iŖlevini hızla entegre edebilecek bir yaklaŖımı nermiŖlerdir. OluŖturdukları program makalede ayrıntılı olarak tanıtılan dört ana modũlden oluŖmaktadır. Proses planı Ŗeim modũlũ, programlama modũlũ, program analiz modũlũ ve sũre planı zelleŖtirme modũlũdũr.

Nourali ve ark. (2012), esnek montaj atölyesinde sıraya bağlı kurulum ve hazırlık sürelerini de ele alan eş zamanlı IPPS problemini ele almışlardır. Ana amaç, nihai ürünlerin tamamlanma sürelerini minimize etmektir ve karışık tam sayılı modelleme yaklaşımını kullanmışlardır. Lihong ve Lv (2012), planlama sisteminin esnekliğini geliştirmek ve bir üretim sisteminin performansı için global bir iyileşme sağlamak amacıyla, IPPS entegrasyonunu kolaylaştırmak ve her iki proses planını optimize etmek için bir matematik model ve geliştirilmiş bir genetik algoritma önermişlerdir.

Lian ve ark. (2012), IPPS için yeni bir optimizasyon stratejisi önermişlerdir. Mevcut stratejilerle karşılaştırıldığında, bu makalede önerilen optimizasyon stratejisi proses planlaması ve çizelgelemeyi daha sıkı bir şekilde entegre etmekte ve dolayısıyla optimal çözümler elde etme şansını arttırmaktadır. Öte yandan, makul bir hesaplama zamanında geniş çözüm alanını keşfetmek için emperyalist rekabetçi algoritma (ICA) adlı yeni bir sezgisel algoritma kullanılmaktadır. Li ve ark. (2012a), IPPS probleminin son derece karmaşık olması ve geleneksel algoritmaların da bu yeni sorunu etkili bir şekilde çözebilmek için değiştirilmeleri ve geliştirilmeleri gerektiğinden hareketle IPPS sorununun entegrasyonunu ve optimizasyonunu kolaylaştırmak için yeni bir aktif öğrenmeli genetik algoritması (ALGA) temelli bir yaklaşım geliştirmişlerdir.

Li ve ark. (2012b), son zamanlarda, performansı ve üretkenliği daha da yükseltebilmek için proses planlamasını ve çizelgelemeyi daha iyi entegre etmeye yöneldiğine dikkat çekmiştir. Proses planlama ve çizelgelemenin tamamlayıcılığı ve gerçek dünya üretiminin çoklu hedef gereksinimi nedeniyle, çalışmalarında çok amaçlı IPPS problemine odaklanmaktadır. Bu çalışmada, oyun teorisi tabanlı Nash dengesi hibrit algoritmasını çoklu hedefleri gerçekleştirebilmek amacıyla kullanmışlardır. Amin-Naseri ve Afshari (2012), mevcut IPPS problemleri için geliştirilen algoritmaların çoğunun, gerçek üretim ortamlarının çoğunda olan, bir siparişin operasyonları arasındaki öncelik ilişkilerine dayanarak oluşturulan alternatif operasyon sıralarını görmezden geldiğini öne sürerek, öncelikli operasyon sıralarını öncelik sırasına göre değerlendiren ve toplam işlem süresini minimize etmeye çalışan bir algoritma geliştirmişlerdir. Problemin çözümünde geliştirilmiş bir genetik algoritma kullanılmaktadır. Zhang ve Gen (2010), farklı coğrafi bölgelerdeki çeşitli makineler ve araçlara sahip fabrikaların, genellikle farklı kaynak kısıtlamalarına sahip çeşitli parçalar ürettiği dağıtık üretim ortamlarındaki IPPS problemlerinin çözülebilmesi amacıyla çok amaçlı genetik algoritma modeli önermişlerdir. Wang ve ark. (2010) da

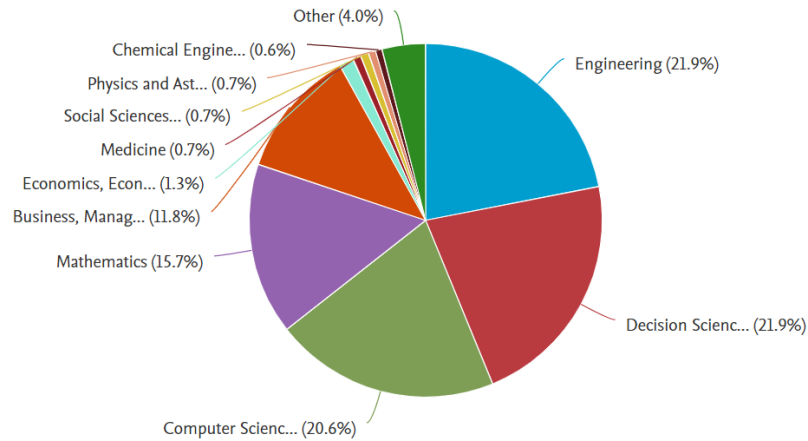
çalışmalarında parçacık sürü optimizasyonu kullanarak çok amaçlı IPPS problemini çözmeye çalışmışlardır. Rajkumar ve ark. (2010), esnek imalat atölye ortamında IPPS problemini ele almışlardır. Problemin çözümünde GRASP algoritmasından yararlanılmıştır.

3.2. Bütünleşik Çizelgeleme ve Teslim Tarihi Belirleme

Teslim tarihleri içerden ve dışardan belirlenebilmektedir. Bazen teslim tarihleri müşteri ile yapılan pazarlık sonucunda belirlenebilmekte olup böylece artık teslim tarih belirleme de problemin bir parçası olmuştur. Dışarıdan belirlenen teslim tarihlerine müdahale edilemese de içeriden belirlenen teslim tarihlerinin en karlı şekilde belirlenmesi amaçlanır.

Literatürdeki çalışmalara bakıldığında teslim tarihlerinin proses zamanları ve operasyon sayıları ile alakalı verildiğini fakat müşteri ağırlıklarının hesaba katılmadığı görülebilir. Bu çalışmada, müşterilere önemine göre teslim tarihi verilmiş olup ağırlığı fazla olan müşteriler göreceli olarak daha yakın teslim tarihleri almaktadırlar.

SWDDA (ÇTTB) (Scheduling with due date assignment, Çizelgeleme ve teslim tarihi belirleme) farklı akademik alanlarda sıklıkla çalışılan bir konudur ve bu konuda yapılan çalışma sayısı her geçen gün artmaktadır. 1975-2022 tarihleri arasında bu konuda çalışma yapılan alanlar Şekil 3.3'te sunulmuştur.

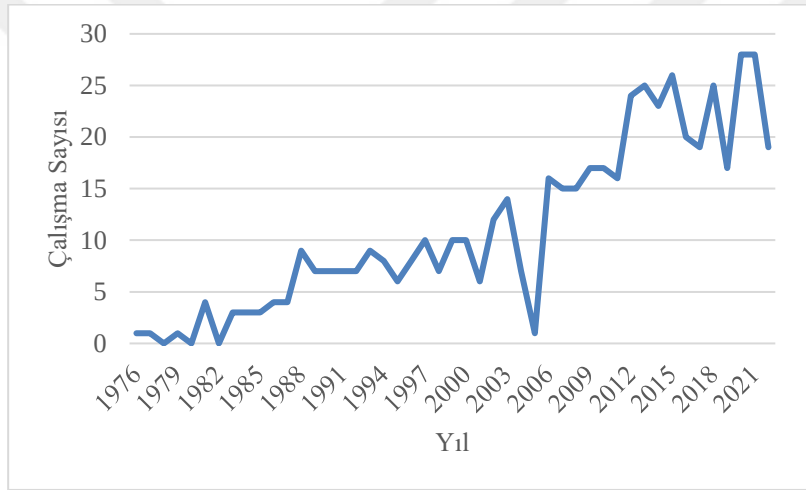


Şekil 3.3. SWDDA probleminin çalışma alanları.

SWDDA çalışmalarında çizelgeleme fonksiyonu ile entegre bir şekilde verilen teslim tarihlerinin daha isabetli olduğu ve performansı artırdığı görülmüştür. Gordon ve ark. (2002), SWDDA alanında güzel bir literatür taraması yapmışlardır ve çalışmalarında SWDDA çalışmalarına ilginin sürekli olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, tam

zamanında üretim (Just in Time – JIT) ortamında işlerin geleneksel üretim ortamının aksine teslim tarihinden önce değil, teslim tarihinde bitirilmesinin beklendiğini çünkü, işlerin çok erken ve çok geç bitirilmesinin gecikme ve erken tamamlanma maliyetlerine neden olacağından söz etmişlerdir. Bu konuda pek çok araştırma yapmış Cheng ve ark. (1997)’e göre işlerin erken tamamlanması gereksiz stok tutmaya ve geç tamamlanması müşteri memnuniyetsizliği ve sözleşmeye uymama maliyetlerine sebep olur.

SWDDA, uzun yıllardır literatürde sıklıkla çalışılan bir konudur. Tam zamanında üretim ve tedarik zinciri yönetimi gibi yeni operasyon yönetimi kavramlarının ortaya çıkmasından sonra SWDDA konusunda yapılan çalışmalar ciddi bir artış göstermiştir. 2022 yılına kadar bu alanda yapılan çalışma sayıları Şekil 3.4’te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. SWDDA konusunda yıllara göre çalışma sayıları.

Geçmişten bugüne yapılan bazı önemli çalışmalardan Panwalkar ve ark. (1982), ortak teslim tarihine sahip n işin olduğu tek makineli bir SWDDA problemini çalışmışlardır. Amaç, teslimat, erken tamamlama ve gecikme cezalarının toplamını en aza indirmektir. Chen (1996), tek makineli süreç çizelgeleme ve teslimat çizelgelemeyi ele almıştır. Tamamlanan işlerin toplu teslim edildiği, işlere ortak teslim tarihi verildiği bir modeli düşünerek teslimat, erken tamamlama ve gecikme cezalarını ve teslimat maliyetini minimize etmeyi amaçlamaktadır.

Cheng (1990), tek bir üretim tesisinde ortak teslim tarihi belirleme ve çizelgeleme konusunda çalışmıştır. Çalışmanın amacı, optimum ortak teslim tarihini ve iş sırasını belirlerken teslim tarihi cezasını ve geciken işlerin sayısını minimize etmektir. De ve ark. (1991), Cheng (1990)’in çalışmasında tüm çizelgeler için başlangıç zamanını sıfır

aldığını bunun da optimalliği sağlamadığını iddia etmiş ve kendi çalışmasında bu kusurları düzelterek daha iyi sonuçlar elde ettiğini ifade etmiştir.

Gordon ve Strusevich (2009), bir işin işlem zamanının o işin sıradaki konumuna bağlı olduğu tek makineli SWDDA problemini ele almışlardır. Teslim tarihini değiştirmenin maliyeti, ıskartaya ayrılan işlerin maliyeti ve erken biten işlerin toplamını içeren bir amaç fonksiyonuna sahiplerdir. Zhao ve Tang (2014) de çalışmalarında, bir işin işlem zamanının o işin sıradaki konumuna bağlı olduğu tek makineli çizelgeleme problemini ele almışlardır. Teslim tarihini değiştirmenin maliyeti, ıskartaya ayrılan işlerin maliyeti ve erken biten işlerin toplamını içeren bir amaç fonksiyonuna sahiplerdir. Üç farklı teslim tarihi belirleme kuralından faydalanmışlardır. Bu çalışmanın farkı, Gordon ve Strusevich (2009)'in çalışmalarının sadece konumsal bozulma modellerini ele aldığını ve genel olarak, sonuçlarının, konumsal öğrenme modeline genişletilemeyeceğini göstererek bu modeli konumsal bozulma ve öğrenmeye genişletmeleridir.

Yin ve ark. (2012a), tek makineli toplu teslimat için çizelgeleme ve teslim tarihi belirleme çalışması yapmışlardır. Çalışmada işlerin sıralanması, teslim tarihlerinin belirlenmesi, teslimatın çizelgelenmesi gerçekleştirilmekte, bununla birlikte makinenin hızını değiştirici bir aktiviteye de yer verilmektedir. Toplam teslim maliyetinin minimizasyonu hedeflenmektedir. Shabtay (2010), toplu teslimatın olduğu tek makineli bir ortamda teslim tarihlerinin kontrol edilebilir olduğu bir çizelgeleme problemi çalışmıştır. Erken-geç tamamlanma, bekletme, teslim tarihi belirleme ve teslimat maliyetlerinin minimizasyonu amaçlanmaktadır. Müşterinin aklına yatan ve kabul edilebilir olan bir teslim tarihi vardır ve bunun üzerinde teslim tarihi belirlenmedikçe ceza maliyeti olmadığı varsayılmıştır. Chen ve ark. (2007), çalışmalarında, işlerin tek bir makinede işlendiği ve tek bir araçla tek bir müşteri alanına teslim edildiği durumu ele almaktadır. Üretim süresini minimize etmek için işlerin sırasını ve teslim tarihlerini belirlemeyi amaçlamaktadır. İki aşamalı tamsayılı programlama modeli ile çözülmeye çalışılmıştır.

Cheng ve ark. (2004), tek makineli SWDDA problemi çalışmışlardır. İşlerin işlem süresi, işe başlangıç zamanının artan bir doğrusal fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Teslim, geç ve erken tamamlanmanın toplamını minimize etmeyi amaçlamaktadır. Zhao ve ark. (2014) çalışmalarında, bir işin başlangıç zamanının doğrusal bir artış fonksiyonunu o işin işlem süresi olarak ele aldıkları tek makineli çizelgeleme

problemini araştırmışlardır. Eş zamanlı SWDDA yaparken, geciken işlerin sayısını ve teslim tarihinden kaynaklı maliyetlerin minimize edilmesini amaçlamışlardır. Cheng ve ark. (2004)'ün çalışmasından farkı, geciken işlerin sayısını da hesaba katmaları ve problemi çözerken dinamik programlama kullanmalarıdır.

Li ve Chen (2017), bir işin gerçek proses süresinin hali hazırda prosesi tamamlanmış işlerin toplam proses zamanlarının doğrusal artış fonksiyonu olarak tanımlandığı bir SWDDA problemini ele almışlardır. Amaç, eş zamanlı olarak teslim tarihi belirleme ve çizelgelemeyi sağlarken içerisinde teslim tarihi belirleme maliyeti, toplam erken bitirme maliyeti, toplam geç bitirme maliyeti ve geciken işlerin ağırlıklı sayısından oluşan bir ceza puanını minimize etmektir.

Yin ve ark. (2014a), çizelgeleme çalışmalarının çoğunda teslimat maliyetlerinin göz önüne alınmadığını öne sürerek, işlerin teslim probleminin de göz önüne alınması gerekliliğinden hareketle tek makineli bir SWDDA çalışması gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, tüm işlere ortak teslim tarihi verilmekte, ancak makinenin hızını değiştirebilen bir aktiviteye de yer verilmektedir. İşlerin makinede geçireceği zaman bu aktiviteden önce ya da sonra işlenmesine göre değişiklik göstermektedir.

Zhang ve Wu (2012), çok sayıda siparişi kabul eden ve siparişlerden bazılarının önemli müşteri vb. nedenlerle önceden kesinleşmiş teslim tarihlerinin olduğu bir firma tasarlamış ve bu firmada SWDDA çalışması gerçekleştirmişlerdir. Bu modeli çift katmanlı sezgisel algoritma yöntemi ile çözmektedirler. Li ve ark. (2015a), çalışmalarında proses zamanının belirsiz olduğu ve normal dağıldığı, çok aşamalı bir montaj yapılan bir ortamda dinamik çizelgeleme ve teslim tarihi belirleme gerçekleştirmişlerdir. Ürünler rastgele gelmekte ve her ürünün kendine ait rotası bulunmaktadır. Çalışmanın özgünlüğü çok aşamalı ve tamamen müşteri isteğine göre yapılan bir montaj üretim sistemi için tasarlanmış olmasıdır.

Vinod ve Sridharan (2011), dinamik atölye imalat ortamında teslim tarihi belirleme metotları ile çizelgeleme kurallarının arasındaki etkileşimi incelemek için gerçekleştirilen bir simülasyon çalışmasından bahsetmektedirler. Li ve ark. (2011), müşteri siparişlerinin önceden üretim süreçlerinin benzerliklerine göre gruplara ayrıldığı bir grup teknolojisi ortamında SWDDA çalışması gerçekleştirmişlerdir. CON, SLK ve DIF metotları kullanılmıştır.

Yuan (1996), erken-geç tamamlanma ve parti teslim maliyetini minimize etmek için yapılan ortak teslim tarihi ile tek makineli çizelgelemenin NP-hard olduğunu ispatlamıştır. Li ve ark. (2010c), belirsiz işlem süreleri ve işlerin genel öncelik kısıtlaması ile tek makineli SWDDA problemini ele almışlardır. Çalışmada işlerin işlem sürelerini bulanık sayılarla göstermişlerdir. Shabtay ve ark. (2022), toplam erken tamamlanmayı ve toplam geç tamamlanmayı minimize etmeyi amaç fonksiyonu olarak ele alan, tüm işlere ortak teslim tarihi veren ve tek makineli bir ortamı ele alan bir SWDDA çalışması gerçekleştirmişlerdir.

Chen ve Vairaktarakis (2005), çalışmalarını yaparken araştırdıkları modellerin hiçbirinin, doğrudan sipariş ve teslimat sistemlerinde karşılaşılan çizelgeleme problemlerine uygulanmadığını görerek, online sipariş alan bir gıda işletmesi için çizelgeleme ve dağıtım modeli geliştirmişlerdir. Cheng (1989), aynı anda gelebilen bir dizi işin çeşitli paralel ve eş makinelerde işlenme durumlarına ait çizelgeleme ve teslim tarihi belirleme modelini çalışmıştır. Bu durumun tüm işler için aynı olduğunu varsaymıştır. Ceza puanını minimize edecek iş sırasını belirlemek istemektedir. Çalışmada tek makineli çizelgeleme probleminin optimal sonuçlarının paralel makineli problemlere genelleştirilebileceği ispatlanmıştır.

Kim ve ark. (2012), paralel makineli SWDDA problemini ele almışlardır. Problemin üç karar değişkeni vardır: ortak-bitiş tarihini atamak, işleri paralel makinelere ayırmak ve her bir makineye atanan işleri sıralamak. Amaç, teslimat, erken tamamlama ve gecikme cezalarının toplamını en aza indirmektir.

Zhao ve ark. (2018), bir işin işleme süresinin hem başlangıç zamanına hem de bir sıradaki konumuna bağlı olduğu, tek bir makine çizelgelemesi ve teslim tarihi belirlemesini incelemişlerdir. Xiong ve ark. (2018), belirli bir zamanda rastgele olarak belirli bir olasılıkla makinenin bozularak işleri aksattığı bir ortamda tek makineli SWDDA problemi ele alınmıştır. Optimum iş sırasını ve teslim tarihlerini ortaklaşa belirlerken maliyetleri minimize etmek amaçlanmıştır. Yin ve ark. (2017), çeşitli etmenler ile n tane yeniden başlatılamayan ve eş zamanlı olarak mevcut olan işin olduğu tek makineli bir ortamda SWDDA çalışması gerçekleştirmişlerdir. Her bir iş, kendi çizelgeleme kriterlerini karşılamak amacıyla önce kendi işlerini işlemek üzere makinenin kullanımı için yarışan etmenlerden birine aittir. Genel amaç, diğer etmenlerin her bir kriter değerini belirli bir limitin altında tutarken son etmenin kriterini en aza indirmektir.

Liu ve ark. (2017), tüm işlerin gecikme sürelerinin olması gibi yaygın kısıtlar altında her işe bireysel teslim tarihinin atanması şeklinde gerçekleştirilen bir tek makineli çizelgeleme problemi ele almışlardır. Amaç, ağırlığın bir konuma bağlı ağırlık olduğu, toplam ağırlıklı mutlak gecikme değerini ve ortak akış izni maliyetini içeren normal olmayan bir kriteri minimize eden işlerin sırasını belirlemektir. Zhang ve ark. (2022), gecikme maliyetini minimize etmeye çalışırken makine yerleşimlerini de sürece dahil eden bir SWDDA çalışması hazırlamışlardır. Çalışma, tesis yerleşimini çizelgelemeye dahil etmesi açısından yenilikçi bir çalışmadır.

Wang ve ark. (2016), her birinin kendi performansını optimize etmeyi amaçladığı iki etmeden oluşan tek makineli SWDDA problemini ele almışlardır. Ortak teslim tarihi, pay (slack) ve sınırsız (unrestricted) teslim tarihi belirleme yöntemlerini kullanmışlardır. Çalışmanın farkı olarak, çoklu etmen çizelgeleme ve teslim tarihi belirlemenin aynı anda yapıldığı başka bir çalışmayla karşılaşmadıklarını ifade etmişlerdir. Yin ve ark. (2015), her biri bir dizi işe sahip olan iki etmenin ortak bir makinede işlerini tamamlamaya çalışırken A etmeninin işlerinin teslim tarihlerinin çizelgeleyen tarafından karar değişkeni olarak ele alındığı bir ortamda SWDDA problemini ele almışlardır. Toplam maliyeti minimize ederken aynı zamanda A etmeninin işlerinin optimal teslim tarihlerini belirlemeyi hedeflemektedir.

Yin ve ark. (2013)'e göre pek çok çalışma teslim tarihi belirlemeyi çizelgelemenin bir parçası olarak almış ve firmanın teslim tarihini belirleyebilmesinin performans ölçüsünde önemli gelişmeye sebep olabilecek bir faktör olduğunu göstermişlerdir. Bazı araştırmacılar tek makine çizelgeleme ve teslim tarihi belirleme (SMSWDDA) problemini çalışırken bazı araştırmalar çoklu makine çizelgeleme ve teslim tarihi belirleme (MMSWDDA) problemini çalışmışlardır. Çoklu makine ortamları, akış tipi atölye, iki makineli ortam, benzer makineler, farklı makineler ve m makine ortamları olabilmektedir. Tek makine ortamını çalışmaları şöyle listeleyebiliriz. Panwalkar ve ark. (1982), Gordon ve Kubiak (1998), Liu ve ark. (2017), Wang ve ark. (2016) ve Zhao ve Tang (2014) bu çalışmalara örnek olarak verilebilir. Çoklu makine ortamı üzerine çalışan bazı yazarlar ise, Li ve ark. (2015b), Li ve ark. (2010b), Kim ve ark. (2012), Cheng (1989), Adamopoulos ve Pappis (1998), Cheng ve Kovalyov (1999), Mosheiov (2001), Birman ve Mosheiov (2004) ve Lauff ve Werner (2004)'dir.

SWDDA alanında son zamanlarda daha yeni bir kavram olan çizelgeleme ve teslim aralığı belirleme (SWDWA - Scheduling with due window assignment) probleminin

de çalışıldığı görülmektedir. SWDDA'da uygun bir teslim tarihi belirlenmeye çalışılırken SWDWA'da ise uygun bir teslim aralığı (penceresi) verilmeye çalışılmaktadır. Bu çalışmalarda teslim aralığının başlangıcı ve genişliği en uygun şekilde belirlenmeye çalışılmaktadır. Yue ve Zhou (2021), iki farklı istatistiksel dağılıma uyan işlem sürelerinden hareketle dinamik bir SWDDA çalışması sunmuşlardır. Çalışmalarında teslim aralığı penceresi kullanmışlardır. SWDDA ve SWDWA problemlerinde amaç fonksiyonları erken tamamlanma, gecikme, geciken iş sayısı, teslim tarihi ile ilgili maliyetler ve teslim aralığı ile ilgili maliyetler gibi faktörlerden oluşabilmektedir.

IPPS, SWDDA ve SWDWA problemleri çalışılırken farklı amaç fonksiyonları kullanılabilir de literatürdeki pek çok çalışmada zamanla ilgili maliyetler minimize edilmeye çalışılmıştır. Erken tamamlanma, gecikme ve en son iş bitiş zamanı, teslim tarihi ile ilgili maliyetler zamanla ilgili kullanılan maliyetlerdir. Bazı çalışmalarda zaman ile ilgili maliyetlerden başka örneğin üretim maliyeti, teslim etme maliyeti, elde bulundurma maliyeti, geciken iş sayısı maliyeti, toplam iade edilen üretim gibi maliyetler kullanılmıştır.

Morad ve Zalzal (1999), çoklu amaç fonksiyonu kullanarak en son iş bitiş zamanı, toplam iade edilen üretim ve toplam üretme maliyeti minimize edilmeye çalışılmıştır. Weintraub ve ark. (1999) teslim tarihlerini yakalamaya çalışırken imalat maliyetlerini minimize etmeye çalışmışlardır. SWDWA problemlerinde bu maliyetlere ek olarak teslim aralığı maliyeti aralık başlangıcı ve aralığın genişliğine bağlı olarak kullanılmıştır.

SWDDA ve SWDWA problemlerinde bazı farklılıklar bulunmaktadır ve bu konuda araştırma yapmak isteyenler için Yang ve ark. (2014), Ji ve ark. (2013), Wang ve ark. (2013), Yin ve ark. (2013a), Iranpoor ve ark. (2013), Yin ve ark. (2013b), Yin ve ark. (2012a), Zhao ve Tang (2012), Cheng ve ark. (2012), Mor ve Mosheiov (2012), Huynh Tuong ve Soukhal (2010), Yang ve ark. (2010), Allaoua ve Osmane (2010) gibi çalışmalar önerilebilir.

3.3. Bütünleşik Proses Planlama, Çizelgeleme ve Teslim Tarihi Belirleme

Üç fonksiyonun entegrasyonu çok verimli sonuçlar doğurma potansiyeline sahip olmasına karşın muhtemeldir ki zor ve karmaşık bir konu olmasından kaynaklı olarak

literatürde henüz geniş bir yer bulamamıştır. Literatüre IPPSDDA (Entegre proses planlama, çizelgeleme ve teslim tarihi belirleme) problemine yönelik sadece birkaç çalışma olduğu görülmektedir.

Demir ve Taskin (2005), bu konuyu doktora tezi olarak çalışmışlardır. Sonra ise Çeven ve Demir (2007) teslim tarihini IPPS problemi ile entegre etmenin sağlayacağı performans artışını yüksek lisans tezinde çalışmışlardır. Bu iki çalışmada da erken tamamlanma ve gecikme cezalandırılırken, bu çalışmada, erken tamamlanma, gecikme ve teslim tarihinin üçü birden müşteri ağırlıkları da hesaba katılarak cezalandırılmaktadır. Yine bahsedilen doktora ve yüksek lisans tezlerinde teslim tarihleri müşteri ağırlığından bağımsız belirlenirken, bu çalışmada önemli müşterilere göreceli olarak daha yakın teslim tarihi verilmekte ve önemli müşteriler göreceli olarak daha önce çizelgelenmektedir. Sonralarda Demir ve ark. (2016a), Demir ve ark. (2017) ve Demir ve ark. (2016b), gibi çalışmalarda konu yer almaya devam etmektedir.

Demir ve ark. (2016a), çizelgelemede WMS kuralını, teslim tarihi belirlemede ise WPPW kuralını kullanarak üç fonksiyonu entegre etmiştir. Genetik algoritma ve rastgele arama tekniklerini kullanmışlardır. Demir ve ark. (2017), WATC çizelgeleme kuralı ve WPPW teslim tarihi belirleme kuralını kullanarak 6 farklı sezgisel algoritma ile üç fonksiyonun entegrasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Demir ve ark. (2016b), yine üç fonksiyonun entegrasyonunu hibrit algoritma kullanarak sağlamışlardır.

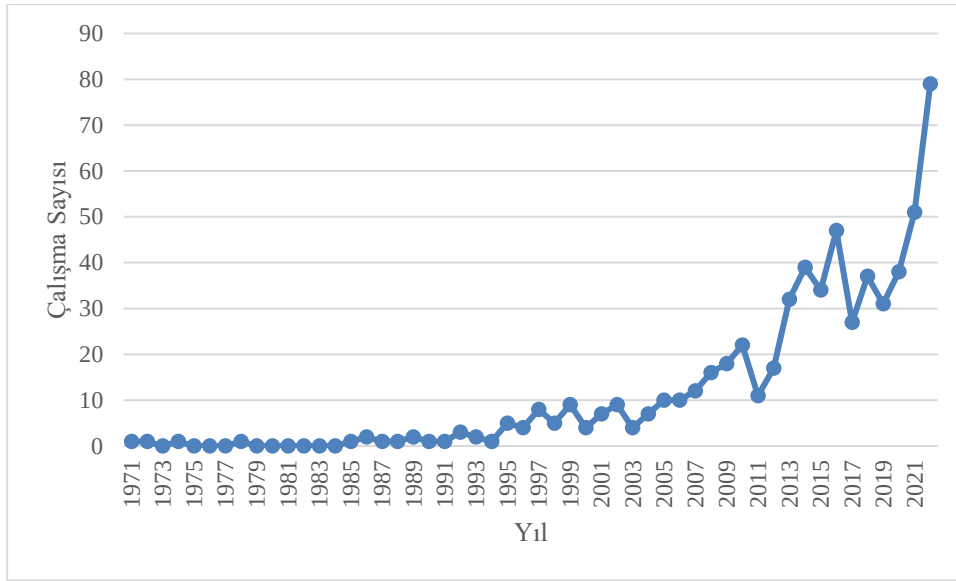
2019 yılında Erden (2019), üç fonksiyonun entegrasyonunu rassal ve dinamik işe gelişlerini hesaba katarak dinamikleştirmişlerdir. Bu tezde, işler üstel dağılıma göre atölyeye herhangi bir zamanda gelebilmektedir. Demir ve Erden (2020), dinamik IPPSDDA problemini karınca kolonisi algoritmasıyla çözmüşlerdir. Erden ve ark. (2019), Demir ve ark. (2015), Demir ve Phanden (2019), Demir ve ark. (2021a) ve Demir ve ark. (2021b) çalışmalarında hibrit evrimsel strateji, tabu arama ve tavlama benzetimi, parçacık sürü optimizasyonu gibi yöntemlerden faydalanılarak IPPSDDA problemi çözülmüştür.

3.4. Bütünleşik Çizelgeleme ve Araç Rotalama

Özellikle son yıllarda tüketim toplumundaki artan talep ve buna bağlı olarak işletmelerin siparişe göre üretim felsefelerini benimsemeleri ile birlikte teslimatın imalat fonksiyonları ile entegrasyonu ciddi derecede önemli hale gelmiştir. Üretim ve

teslimatın birbirine entegre edilmesi ve bunun gerekliliği literatürde pek çok farklı çalışmanın ortaya çıkmasına neden olmuştur. Entegrasyonun teslimat ayağı temelde bir araç rotalama problemi olarak ele alınmış ve zamanla farklı yönlerde gelişim göstermiştir. Bu nedenle, bu entegrasyonun teslimat bölümü çalışmalarda zaman zaman araç rotalama, teslimat, dağıtım ve taşıma gibi farklı kelimeler ile ifade edilmiştir. IPDS (entegre üretim ve dağıtım çizelgeleme), IPODS (entegre dışa yönelik üretim ve dağıtım çizelgeleme), IPTS (entegre üretim ve taşıma çizelgeleme) ve PTSP (üretim ve taşıma çizelgeleme problemi) gibi farklı isimlerde çalışmalarla literatürde karşılaşılabılır. Bu çalışmalarda teslimatın farklı farklı ele alınarak optimize edilmeye çalışıldığı da görülmektedir. Örneğin, bazı çalışmalarda teslimat üretici tarafından yapılmakta ve müşterinin kapısına kadar ürünleri sevk etmektedir (Tonizza Pereira ve Seido Nagano, 2022; Garcia ve Lozano, 2004). Bazı çalışmalarda ise teslimat optimizasyonu, ürünlerin araca yüklendiği ana kadar yapılır ve aracın yolu incelenmeye alınmaz (Li ve ark., 2017). Bazı çalışmalarda ise teslimatın planlanması için üçüncü parti lojistik (3PL) firmalarından destek alınmaktadır (Han ve ark., 2019).

Çizelgeleme ve araç rotalama entegrasyonu, son yıllarda ortaya çıkarak hızla geniş bir çalışma alanına yayılan önemli bir konudur. Önceden yapılan çalışmaların çoğunda, çizelgeleme yapılırken ürünlerin teslimatında geçen zaman dikkate alınmadan planlamalar yapılmıştır. Ancak, günümüz şartlarında ürünlerin hangi makinelerde ne zaman işleme alınacağı planlanırken, ürünlerin atölyede imalatı tamamlandıktan sonra ne kadar sürede müşteriye ulaşacağını da planlamak, müşteri memnuniyetini sağlamak ve rekabette avantaj elde etmek isteyen işletmelerin yapmak zorunda olduğu bir işe dönüşmüştür. Çizelgeleme ve araç rotalamanın birlikte kullanıldığı çalışma sayıları Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Entegre çizelgeleme ve araç rotalama konusundaki çalışma sayıları.

IPODS, IPDS, IPTS ve PTSP gibi farklı aramalar yapılarak benzer alanda yapılan çalışma sayılarına ulaşılmıştır. Görüldüğü gibi, çalışmaların yoğunlaşmaya başladığı dönem son 15-20 yıla denk gelmektedir. 2022 yılında yapılan çalışma sayısı ise neredeyse son 10 yıldaki en yüksek çalışma sayısının iki katına ulaşmıştır. Çalışma alanının yeni keşfedilen ve üzerinde yoğunlaşılan bir alan olduğu açıkça görülmektedir.

Chen ve Vairaktarakis (2005) ve Chen (2010), entegre üretim-dağıtım problemleriyle ilgili mevcut araştırmaların çoğunun, stratejik ya da taktiksel karar seviyesini dikkate aldığını belirtmektedir. Stratejik düzeyde, tesis yeri ve tesis kapasitesi ile ilgili kararlar alınır. Taktik seviye, üretim lotları, stok seviyeleri ve teslimat miktarları ile ilgilidir.

Operasyonel seviye üretim ve teslimat problemlerini entegre etmek için klasik ARP'nin üretim çizelgeleme konularına entegre edilmesi gerekir. Klasik ARP'de, malların bir ağ boyunca tüm gereksinimlerin yerine getirilebileceği şekilde bir yol boyunca inşa edilerek bir ya da daha fazla depoda bulunan bir araç seti tarafından coğrafi olarak dağılmış bir dizi müşteriye dağıtılması gerekir (Desrochers ve ark., 1990).

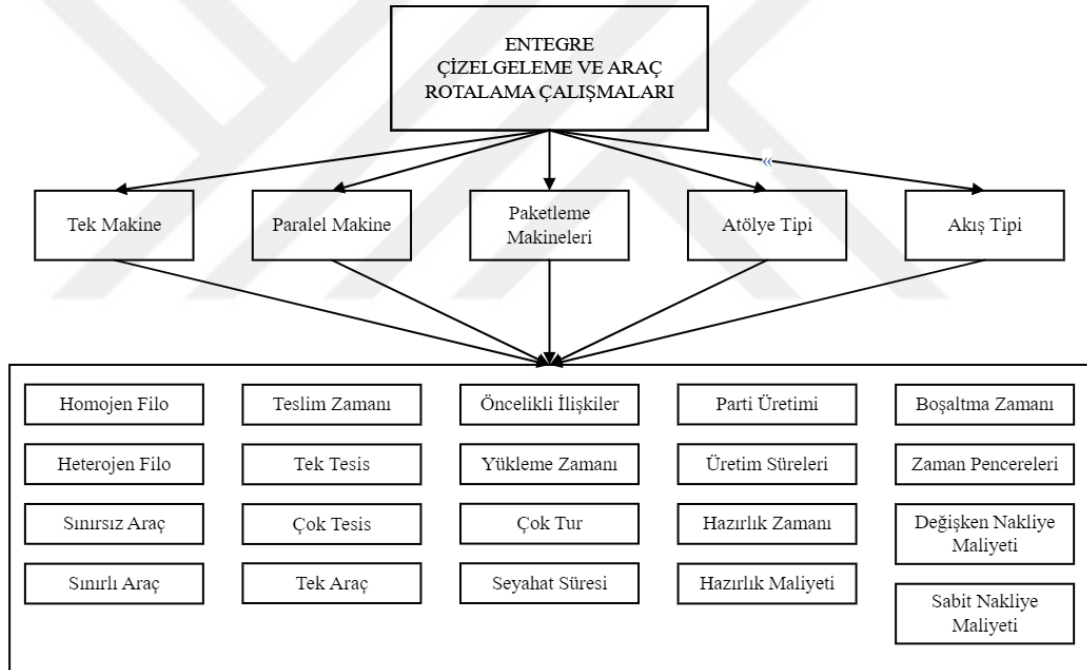
Çizelgeleme ve araç rotalamanın birlikte kullanıldığı çalışmalar incelendiğinde; Moons ve ark. (2017), iki fonksiyonu birlikte kullanan çalışmaları detaylı şekilde incelemişlerdir. Bu çalışmada görülmektedir ki, bilimsel literatürde, operasyonel seviye kararları dikkate alınarak yapılan entegre çalışmaların büyük bir kısmı nispeten

basit teslimat işlemlerine, örneğin müşterilere doğrudan gönderilere odaklanmaktadır. Önceden belirlenmiş rotalara göre çalışan ya da sabit müşteri rotasına göre çalışan çalışmalar da mevcuttur. Hiçbir çalışma bölünmüş teslimat yapılmasına izin vermez ve tüm çalışmalarda nakliye süreleri belirleyici bir unsur olarak görünmektedir.

Literatürde, entegre çizelgeleme araç rotalama çalışmalarının;

- Tek bir makine bulunan makine ortamları,
- Paralel makineler bulunan makine ortamları,
- Paketleme makineleri bulunan makine ortamları,
- Akış atölyeleri (flow shop) ve
- İş atölyeleri (job shop)

ortamlarında çalışıldığı gözlemlenmektedir. Bu durum Şekil 3.6’da gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Entegre çizelgeleme ve araç rotalama çalışmalarının içeriği.

Tek ve paralel makine ortamları, tek bir işlemten oluşan işler için kullanılır. En basit makine ortamıdır ve tüm işleri işlemek için tek bir makine ($\alpha = 1$) mevcuttur. Paralel bir makine ortamında, bir iş m makinelerinden birinde işlenir. İşlem süresi makineden bağımsız (aynı paralel makineler, $\alpha = P_m$), makineye bağlı (tek biçimli paralel makineler, $\alpha = Q_m$) veya makineye ve işe bağlı (alakasız paralel makineler, $\alpha = R_m$) olabilir.

Tek makine çalışmalarına bakıldığında, tek bir makine ortamının tek bir araçla veya homojen bir dağıtım aracı filosuyla birleştirildiği görülebilir. İncelenen çalışmaların üçte ikisinde, birden fazla araç kullanılmıştır. Çalışmaların yaklaşık yarısında nakliye maliyetleri söz konusudur. Buna karşılık, üretim maliyetleri genel olarak düşünülmemiştir. Tek bir makine ile yapılan çalışmaların tamamında üretim ve seyahat süreleri dikkate alınmaktadır. Çalışmaların önemli çoğunluğunda değişken maliyetler, bir kısmında ise sabit maliyetlerin dikkate alındığı görülmektedir.

Entegre çalışmaların neredeyse tamamında parti işleme (batch processing) görülmektedir. Çalışmaların yarısında hem homojen hem de heterojen bir araç filosu kullanılmıştır. Paralel makineler ile birlikte tek araç hiç kullanılmamıştır. Zaman pencereleri kavramı genellikle dahil edilmiştir.

Tek makine çalışmalarının çoğunda siparişler partiler halinde birleştirilmektedir. Çalışmaların çoğunda yığın-parti (batch) kavramı bulunmaktadır ancak hiçbirinde hazırlık süreci (setup operations) ele alınmamıştır. Bu çalışmalarda, harici şirketlerden daha fazla araç kiralanabilmesi mümkündür. Tek bir tur yapan veya birden fazla tur yapılmasına izin veren çalışmalar mevcuttur. Teslim aralığı veren ya da teslim tarihi veren çalışmalar bulunmaktadır. Genellikle çalışmalarda araç rotası belirli ve sabittir, siparişler bu aracın rotasına göre peş peşe üretilmektedir.

Entegre çizelgeleme araç rotalama üzerine yapılan çalışmaların yaklaşık üçte biri paralel makine ortamı düşünmektedir. Bu çalışmaların çoğu aynı (eş) paralel makineleri kullanmaktadır. Amorim ve ark. (2013), Lee ve ark. (2014) ve Belo-Filho ve ark. (2015) eş paralel makinelerle bütünsel sorunları incelemektedir. İlişkili olmayan paralel makineler sadece Chang ve ark. (2014) çalışmasında göz önünde bulundurulmaktadır. Tek bir makine ortamındaki çalışmalara benzer olarak, çoğu çalışma, partiler halinde işleme vardır ve çoğunlukla kurulum işlemleri göz ardı edilmektedir. Tek bir araç tarafından teslim edilebilecek bölge sayısında bir sınırlama vardır. Müşterileri bölgelere ayırıp her bölgeye bir araç gönderimi sağlanmıştır.

Chang ve ark. (2014) çalışmalarında, ilişkisiz paralel makinelerde farklı müşterilerin farklı siparişlerinin işlenmesi gerekir. Müşteri siparişlerinin tamamı bir seri halinde ardışık olarak üretilir ve aynı araç tarafından teslim edilir.

Moons ve ark. (2017), çalışmalarında gelecekte uygulanabilirlik açısından yararlı olacağını düşündükleri entegre çizelgeleme araç rotalama çalışmalarından

bahsederken, değerlendirdikleri üretim sistemlerinin özelliklerine daha yakından bakıldığında, önceki çalışmaların genel olarak her bir siparişin tek bir işlemden oluştuğu nispeten basit bir ortam düşündüğü sonucuna varmışlardır. Çoğu çalışmada tek bir makine ortamı veya paralel bir makine ortamı kullanıldığı ve paralel makine ortamında, çoğunlukla aynı paralel makineler göz önünde bulundurulduğunu gözlemlemişlerdir. Bundan dolayı, atölye tipi veya akış tipi gibi çoklu üretim seviyelerine sahip üretim ortamlarının günümüzde yaygın olarak seri üretim için kullanıldığından, bunları araç rotalama ile entegre etmenin faydalı bir gelecek araştırma yönü olabileceğini ifade etmişlerdir. Bu çalışmada da atölye tipi imalat ortamında çizelgeleme ve araç rotalama entegre edildiği gibi, bu iki fonksiyona ayrıca proses planlama ve teslim tarihi belirleme fonksiyonları da entegre edilmiştir.

Desrochers ve ark. (1990), uygulamadaki çok çeşitli araç rotalama ve çizelgeleme problemleri ve mevcut algoritmaların çokluğu, tecrübesiz bir dağıtım yöneticisinin ve hatta deneyimli bir kişinin kendi özel durumu için uygun olan bir yöntemi seçmesini zorlaştırmaktadır. Bu karar sürecini kolaylaştırmak için, problemlerin modellenmesinde destek sağlayan ve ortaya çıkan modellere uygulanabilecek algoritmalar öneren bir sistem geliştirmeyi önermişlerdir. Hazırladıkları sınıflandırma şeması bu alandaki ilk çalışmalardan biridir.

Zografos ve Androustopoulos (2004), tehlikeli madde taşıyan kamyonların rotalanması ve çizelgelenmesi üzerine sezgisel algoritmalar kullanarak bir metot önerisinde bulunmuşlardır. Chen ve ark. (2009) bozulabilen gıda ürünlerinin üretiminin çizelgelenmesini ve götürececek araçların rotalanması amacıyla doğrusal olmayan bir matematiksel model sunmuşlardır. Ullrich (2013) de iki aşamalı bir problemi çözmek için genetik algoritma yaklaşımı kullanmıştır. Problemin birinci aşamasında, paralel makinelerde bir dizi işi çizelgelemek, ikinci aşamasında da biten işlerin hazırlık zamanları ve kapasiteleri farklı bir araç filosuyla teslimatı amaçlanmaktadır. Reiter ve ark. (2011), bir ekipman üreticisi için entegre üretim ve nakliye çizelgeleme problemini, karışık bir tam sayılı programlama ile ifade etmişlerdir. Tedarik zincirindeki ilişkilerin entegre rotalama ve çizelgeleme konusuyla daha verimli yönetilebilmesi için kavramsal bir çatı oluşturmuşlardır. Fu ve ark. (2017), metal ambalaj sektöründeki bir şirkette çizelgeleme ve araç rotalamayı entegre eden iki aşamalı bir sezgisel algoritma geliştirmişlerdir. Zou ve ark. (2018), üretim için tek bir makineye ve taşıma için kapasite kısıtlamalarına sahip sınırlı araçlara sahip

sipariş üzerine üretim yapan bir imalatçı için entegre üretim çizelgesi ve araç yönlendirme problemi için genetik algoritma tabanlı bir model önermişlerdir.

Zhan ve Wan (2018), ev hizmetlerinde (evde bakım gibi), bir servis ekibi ile coğrafi olarak dağıtılmış bir grup müşteriye hizmet verildiği bir servisi ele almaktadırlar. Bu tür servislerde kritik bir operasyon kararı, hizmet ekiplerini görevlendirmek ve yönlendirmek, aynı zamanda hizmetleri verimli bir şekilde sunabilmek için müşteriler için randevu saatleri oluşturmaktır. Bu amaçla, ekip ataması için eşzamanlı bir rotalama ve çizelgeleme problemini çalışmışlardır. Problemi çözmek için Tabu arama algoritmasından yararlanmışlardır.

Solina ve Mirabelli (2021), gıda sektöründe faaliyet gösteren bir firmada üretim çizelgelemesini ve dağıtımını; enerjiyi, stoklama ve dağıtım maliyetlerini minimize etmeyi amaçlayan bir şekilde planlamışlardır. Hou ve ark. (2022), akış tipi imalat ortamında zaman pencereli dağıtım aralıklarını göz önünde bulunduran bir çizelgeleme ve dağıtım entegrasyonu üzerine çalışmışlardır. Karma tamsayılı model kullanmış ve gecikmeyi ve erken tamamlamayı amaçladıkları sonuçları CPLEX ile karşılaştırmışlardır. Tonizza Pereira ve Seido Nagano (2022), akış tipi imalat ortamında imalat çizelgelemesi ve dağıtım planlamasının entegre edilmesi problemini başta tavlama benzetimi olmak üzere çeşitli sezgisel algoritmalar kullanarak ele almışlardır.

Sousa Matos ve ark. (2018), bir lojistik sistemindeki karbondioksit emisyonunu minimize etmeyi amaçlayan yeşil araç rotalama ve çizelgeleme problemini ele almışlardır. Bu problem için üç farklı sezgisel yöntemi içine alan melez bir algoritma geliştirmişlerdir. Ghannadpour ve Zarrabi (2018), enerji minimizasyonu amaçlı çok amaçlı heterojen (şirketin filosu yeterli olmadığında dışardan araç kiralınması) bir araç için çizelgeleme ve araç rotalama çalışması gerçekleştirmişlerdir. Çalışma hem seyahat mesafesini minimize etmeyi hem de yeşil lojistik için gerekli olan enerjiyi minimize etmeyi amaçlamaktadır. Geliştirilmiş bir genetik algoritma tabanlı bir çözüm önermektedirler. Xiao ve Konak (2017), zamana bağlı araç rotalama ve çizelgeleme problemini karbondioksit emisyon optimizasyonu açısından da inceleyerek, karayolu bazlı bir dağıtım şirketi için araç rotalama ve çizelgeleme problemini incelemişlerdir. Dinamik programlama yöntemini kullanmışlardır. Xiao ve Konak (2016), çalışmalarında yeşil araç rotalama ve çizelgeleme problemini (GVRSP) ele alarak, bir araç filosu tarafından yapılan teslimatların daha iyi planlanması yoluyla lojistik

sistemlerdeki sera gazı emisyonlarını minimize etmeyi amaçlayan karışık tam sayılı programlama önermişlerdir. Problemden araç, zaman kısıtı, anlık trafik yoğunluğu vb. parametreler de ele alınmıştır.

Moons ve ark. (2017), dağıtım işlemlerinin araç rotaları kullanılarak yürütüldüğü çalışmalara odaklanmaktadır. Üretim ve dağıtımın ilişkili olduğu entegre rotalama ve çizelgeleme çalışmalarının yer aldığı ve sınıflandırıldığı bir araştırma makalesidir. Gladkov ve ark. (2017), araç rotalama problemleri için bioinspired adı verilen bir yöntem geliştirmişlerdir. Androustopoulos ve Zografos (2017), gerçekçi olarak değişen zamana bağlı trafik koşullarını temsil eden iki kriterli bir araç rotalama ve çizelgeleme problemini ele almışlardır. Özelleştirdikleri bir karınca kolonisi algoritmasından yararlanmışlardır.

Yin ve ark. (2016), çapraz sevkiyat teknolojisi, depoyu, depolama ve geri alma yeri yerine geçici bir istasyon olarak kullanarak gelen araçlardan doğrudan giden araçlara aktarır diyerek, farklı zorluklarla oluşturulmuş çapraz sevkiyat için iki amaçlı bir matematiksel formülasyon önermişlerdir.

Lacomme ve ark. (2016), kapasite kısıtları olan çeşitli araçlarla raf ömrü kısa olan ürünler için üretim çizelgeleme ve araç rotalama çalışması gerçekleştirmişlerdir. Modelde, ürünler raf ömrü kısıtlılarından dolayı teslim edilmeden hemen önce üretilmelidir. Bu çalışmada, ELS ve GRASP'tan yararlanmışlardır. Chen ve ark. (2009), bozulabilen gıda ürünleri için zaman pencereleri ile üretim çizelgeleme ve araç rotalamayı dikkate alan için doğrusal olmayan bir matematiksel model önermektedirler. Talepler stokastiktir ve gıdalar üretildikten belli bir süre sonra bozulmaktadır. Bu modelin amacı, tedarikçinin beklenen toplam karını maksimize etmektir.

Shahin Moghadam ve ark. (2014), tedarikçiler, müşteriler ve çapraz platformdan oluşan bir ortamda araç rotalama ve çizelgeleme problemini ele almışlardır. Bu problemde, bir takım homojen araçlar tedarikçilerden müşterilere çapraz platform aracılığıyla ürün aktarmaktadır. Her aracın sınırlı bir kapasitesi vardır ve her tedarikçinin ve müşterinin kendi zaman aralıklarında ziyaret edilmesi gerekir, ayrıca bir müşteri farklı araçlarla birden fazla kez ziyaret edilebilir. Karışık tamsayılı programlama modeli kurulan bu problemi çözebilmek için karınca kolonisi ve tavlama benzetiminin hibrit bir çözümü ele alınmıştır.

Fu ve ark. (2012), üretim aralığı kısıtı ve teslimat kapasitesi kısıtlı bir rotalama ve çizelgeleme problemini ele almışlardır. Problemden araçların her biri farklı kapasiteye sahiptir. Üretimde ise bir veya daha fazla teslimat süresi verilmektedir. Bu durumlar ayrı ayrı ele alınmıştır. Brandão ve Mercer (1997), her gün bir aracın birden fazla seyahat yapabildiği çok yollu araç rotalama ve çizelgeleme problemini ele almışlardır. Araç kapasiteleri farklı, teslimatta ise teslim aralığı verilmektedir. Bu problemi tabu arama algoritması kullanarak çözmüşlerdir. Solomon (1987), zaman aralığı kısıtları altında araç rotalama ve çizelgeleme problemleri için algoritma tasarlanması ve çeşitli sezgisellerin analiz edilmesini çalışmıştır.

3.5. Bütünleşik Proses Planlama, Çizelgeleme, Teslim tarihi Belirleme ve Araç Rotalama

Tez çalışmasındaki en yüksek entegrasyon seviyesi olan dört fonksiyonun entegre edilmesi ile ilgili başlık, anahtar kelimeler ve özet dahil bir literatür taramasında 59 adet çalışma ile karşılaşılacaktır. Bunların pek çoğu, entegre bir yöntem ile ilgili bir çalışma olmamakla birlikte, çalışmaların içeriğinde kelime olarak geçtikleri için arama sonuçlarında karşılaşılacaktır. Sadece başlıkta geçmesi ile ilgili bir araştırma yapıldığında ise herhangi bir sonuca rastlanmamaktadır.

4. KULLANILAN YÖNTEMLER

Bu bölümde, tez çalışmasında yer alan çözüm yöntemlerinin neler olduklarından detaylı bir şekilde bahsedilmektedir.

4.1. Genetik Algoritma

Genetik algoritma (GA), biyoloji ve bilgisayar bilimlerinin bir araya getirilmesi sonucu geliştirilen bir optimizasyon tekniğidir. Evrim teorisini taklit ederek, şartlara iyi uyum sağlayan bireylerin hayatlarına devam etmesi, kötü uyum sağlayan bireylerin ise yok olması esasına dayanan bu teknik Holland (1992) tarafından geliştirilmiştir. GA, son derece büyük çözüm kümesine sahip, sürekli olmayan ve matematiksel yöntemlerle çözümü zor olan karmaşık modellerin çözümünde iyi sonuçlar veren ve bu nedenle sıklıkla kullanılan bir algoritmadır.

GA, bütün bir çözüm uzayını araştırmak yerine, var olan çözümlerden bazılarını deneyerek daha kısa sürede uygun çözümler sunmaktadır. Var olan çözümler içerisinden seçim yaparken evrim sürecindeki gibi iyi bireyleri seçme eğilimindedir. GA, çok sayıda kromozom arasından en iyi kromozomların seçilmesini uygunluk fonksiyonu adı verilen çözüm değerlerinden faydalananarak gerçekleştirmektedir (Atagün, 2020). Uygunluk fonksiyonu, bireyler arasından hangilerinin iyi olduğunun belirlenmesinde kullanılmaktadır (Erpik, 2019). İyi bireyleri de önceki bireylerin çaprazlanması ve rastgele mutasyona uğraması sonucunda elde etmektedir. Böylece, daha iyi sonuç veren bireyler hem yaşamaya devam eder hem de bir sonraki aşama için daha iyi sonuç veren bireylerin oluşmasına olanak sağlar.

GA, en iyi çözümü vermese de en iyi çözüme yakın uygun bir çözüm sunmaktadır. Bunu yaparken kullandığı bazı kavram ve operatörlere sahiptir. Bunlar, kodlama, gen, kromozom, popülasyon, uygunluk fonksiyonu, çaprazlama, mutasyon ve iterasyon sayısı gibi kavramlardır. Kodlama, problemin bilgilerinin yazılım diline uygun bir şekilde tanımlanmasıdır. Genlerin kaç tane olacağı ve içerikleri, kromozomlara ait bilgiler ve kromozomun yapısı kodlama aşamasında gerçekleştirilen işlemlerdir.

Kodlamanın probleme uygunluğu, çözümün başarısını doğrudan etkilemektedir (Atagün, 2020). Genler GA'daki en küçük yapı taşlarıdır ve bir araya gelerek kromozomları oluşturur (Kaya, 2020). Birden fazla kromozomun bir araya gelmesiyle ise popülasyonlar oluşur. Popülasyon büyüklüğü, kromozom sayısı ve bir kromozomdaki gen adedi probleme göre değişkenlik gösterebilir. Genetik algoritmanın adımları Şekil 4.1'de sunulmaktadır.

Algoritma 1 Genetik Algoritma	
1 :	Başla
2 :	<i>Değişkenleri ve parametreleri tanımla</i>
3 :	<i>Değişkenlerin başlangıç değerlerini belirle</i>
4 :	<i>Başlangıç popülasyonunu üret (10 kromozom)</i>
5 :	<i>Popülasyonu değerlendir ve sırala</i>
6 :	<i>Kuralına göre teslim tarihlerini belirle</i>
7 :	<i>Çizelgeleme kuralına göre çizelgeleme yap</i>
8 :	<i>Araç rotalama kuralına göre rotalama yap</i>
9 :	<i>Popülasyonu değerlendir</i>
10:	<i>Popülasyonu sırala</i>
11:	While (<i>iterasyon sayısı ≤ 100</i>) or (<i>zaman ≤ 2000</i>)
12:	<i>Çaprazlama ve mutasyon uygula</i>
13:	<i>Çaprazlanan popülasyonu değerlendir</i>
14:	<i>Kuralına göre teslim tarihlerini belirle</i>
15:	<i>Çizelgeleme kuralına göre çizelgeleme yap</i>
16:	<i>Araç rotalama kuralına göre rotalama yap</i>
17:	<i>Popülasyonu değerlendir</i>
18:	<i>Popülasyonu sırala</i>
19:	<i>Mutasyon popülasyonunu değerlendir</i>
20:	<i>Kuralına göre teslim tarihlerini belirle</i>
21:	<i>Çizelgeleme kuralına göre çizelgeleme yap</i>
22:	<i>Araç rotalama kuralına göre rotalama yap</i>
23:	<i>Popülasyonu değerlendir</i>
24:	<i>Popülasyonu sırala</i>
25:	<i>Ana popülasyonu güncelle</i>
26:	<i>İterasyon sayısı = iterasyon sayısı + 1</i>
27:	Bitir

Şekil 4.1. Genetik algoritma adımları.

Uygunluk fonksiyonu, kromozomların her birinin verdiği çözüm değerini ifade etmektedir. Problemin yapısına uygun olarak belirlenir ve problemde değişiklik gösterebilir. Benzer şekilde, iterasyon sayısı da probleme özgüdür ve genellikle durdurma kriteri olarak kullanılmaktadır. Durdurma kriteri olarak, çalışma süresi, uygunluk değerinin belirli bir seviyeye ulaşması ya da birkaç kez çözümün değişmemesi gibi seçenekler de tercih edilebilir. Çalışmada kullanılan N adet kromozomdan oluşan popülasyona ait bir örnek Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

DD ₁	DR ₁	VR ₁	R _{11j}	R _{12j}	R _{13j}	.	.	.	R _{1nj}
DD ₂	DR ₂	VR ₂	R _{21j}	R _{22j}	R _{23j}	.	.	.	R _{2nj}
			.	.					
			.	.					
			.	.					
DD _N	DR _N	VR _N	R _{N1j}	R _{N2j}	R _{N3j}	.	.	.	R _{Nnj}

Şekil 4.2. Popülasyon örneği.

4.1.1. Genetik algoritma operatörleri

GA'da çözüm bir başlangıç popülasyonu ile başlar. Popülasyondaki her bir kromozomun uygunluk fonksiyonu değeri belirlendikten sonra daha iyi özelliklere sahip yeni nesiller üretmek ve arama alanını büyütmek amacıyla kromozomlara birtakım operatörlerle işlemler yapılır. Genel olarak 3 farklı operatörden bahsetmek mümkündür. Bunlar, seçim, çaprazlama ve mutasyon operatörleridir.

4.1.2. Uygunluk fonksiyonu

Uygunluk fonksiyonu, problemin ulaşılması istenen çözümü ve amacı olarak adlandırılabilir. Problemin karar vericileri tarafından belirlenmektedir. Bireylerin değerlendirilmesinde kullanıldığı için doğru belirlenmesi son derece önemlidir. Hatalı belirlenmiş uygunluk fonksiyonları, problemin çözüme ulaşmamasına sebep olacaktır. Uygunluk fonksiyonu, kromozomların problemin amacına hangi oranda uyduğunu görmeye ve buna göre sıralama yapmaya yaradığı gibi seçim, çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin çalışması için de gereklidir (Ayhan, 2021).

4.1.3. Seçim

Uygunluk fonksiyonu değerleri belirlenmiş olan kromozomlar arasından bir sonraki iterasyon için yeni bireyler seçilmesi için kullanılan operatördür. Bu operatörün kullanılmasının amacı, daha iyi sonuçlara ulaşabilmek için uygunluk fonksiyonu değeri daha yüksek bireyler elde edebilmektir (Timuçin ve Biroğul, 2020).

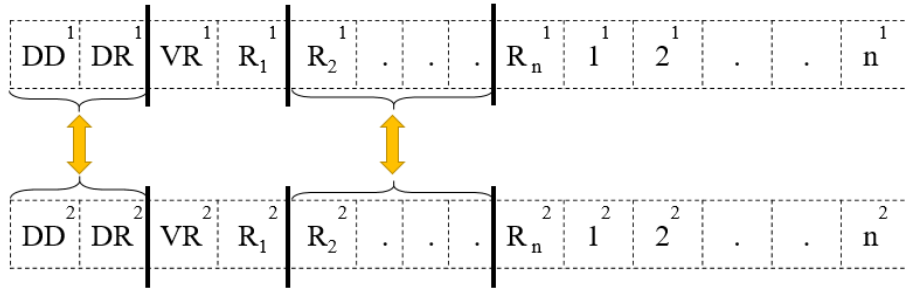
Çalışmada mevcut çözüm havuzu içerisinde rastgele 10 kromozom seçilerek başlangıç çözümü oluşturulmuştur. Sonraki iterasyonlar için yapılacak seçimlerde ise, ana popülasyondan, çaprazlamadan ve mutasyondan gelen kromozomların

uygunluk fonksiyonu değerleri hesaplanmış ve en iyi 10 kromozomun seçilimi gerçekleştirilmiştir.

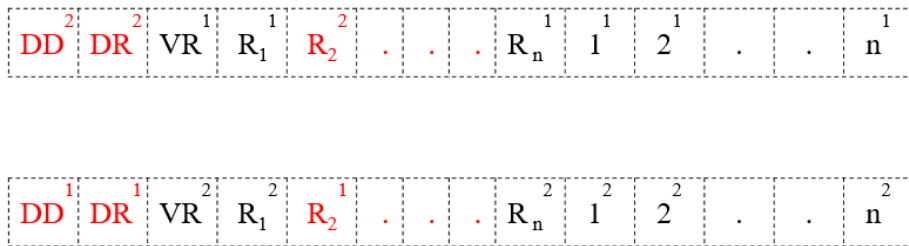
4.1.4. Çaprazlama

Genetik algoritmanın performansının geliştirilmesinde kilit rollerden biri çaprazlama operatörüne aittir. Çaprazlama operatörü, seçilen bireylerin belirli genlerinde değişiklikler yapılarak daha iyi bireylerin oluşturulmasını hedeflemektedir. Hangi bireylerin seçileceği konusunda tek noktalı, 2 noktalı ya da 3 noktalı gibi farklı çaprazlama yöntemleri uygulanabilmektedir. Mevcut popülasyon dâhilinde ne kadar bireye çaprazlama yapılacağı ve kaç noktadan çaprazlama yapılacağı problemin karar vericileri tarafından önceden belirlenmelidir. Literatürde çaprazlama oranı olarak mevcut popülasyonun yüzde 50'si ile yüzde 95'i aralığı öne çıkmaktadır (Ayhan, 2021).

Çalışmada, her iterasyonda popülasyona ait 10 kromozomun 6'sı çaprazlama için tekrarlanmayacak şekilde rastgele seçilmektedir. Seçilen kromozomun tekrar seçilmesini engellemek amacıyla tekrarlanmanın önüne geçilmiştir. Ayrıca çalışmada, tek, iki ve üç noktalı çaprazlama gerçekleştirilmiştir. Üç noktalı çaprazlama uygulaması Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Çaprazlama öncesi kromozomlar.



Şekil 4.4. Çaprazlama sonrası kromozomlar.

4.1.5. Mutasyon

Çaprazlama operatörü uygulandıkça ilerleyen iterasyonlarda gen çeşitliliğinde düşüşler görülebilmektedir. Bu durum, kromozomların belirli bir iterasyon sonra neredeyse aynılaşmasına ve dolayısıyla çözüm uzayının daralmasına sebebiyet verecektir. Mutasyon operatörü, daha iyi sonuçlar elde edebilmek adına çözüm uzayının genişletilerek kromozom ve gen çeşitliliğinin artırılmasını amaçlayan bir GA operatörüdür. Çeşitliliği artırmak amacıyla belirli sayıda birey seçilerek bu bireylerin bazı genlerinin değiştirilmesi suretiyle işlem yapılır. Genlerin değişmesi aslında bireyler arasında bilginin alışverişi olarak da düşünülebilir (Atagün, 2020). Mutasyon operatörü çaprazlama operatöründen sonra kullanılmaktadır. Çalışmada her iterasyonda 10 kromozomun 4 tanesi seçilerek mutasyona uğratılmıştır. Mutasyona uğratılacak her kromozomda belirli sayıda gen değişikliğe uğratılmaktadır. Çalışmada yapılan mutasyon işlemine dair bir örnek Şekil 4.5'te sunulmuştur.

1	3	2	1	1	0	0	.	.	1
1	6	2	0	1	0	1	.	.	1

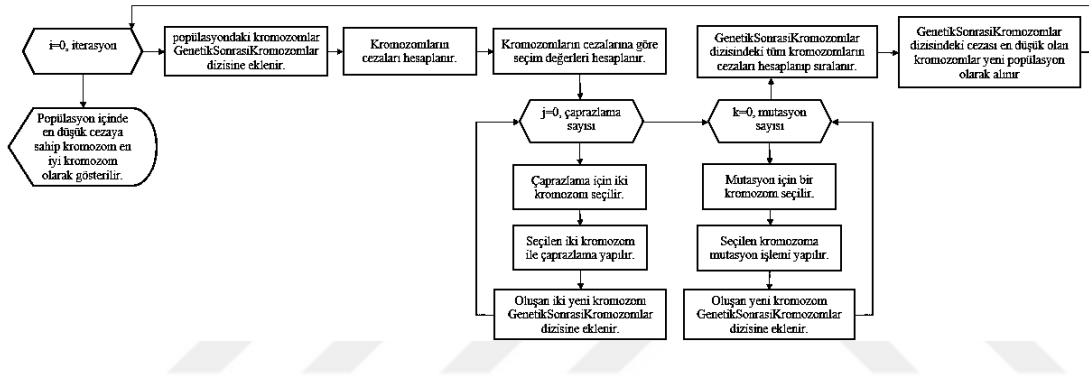
Şekil 4.5. Mutasyon işlemi.

Mutasyon uygulanırken iki farklı şekilde uygulanmıştır. Bunun sebebi, kromozomun ilk üç geni dışında kalan genlerin 1 veya 0 değerlerini alan genlerden oluşması, ilk üç genin ise kendi içerisinde farklı sayılardan oluşmasıdır. Örneğin, 2. Sıradaki gen çizelgeleme genidir ve içerisinde bulunan 10 farklı çizelgeleme yöntemine ait değerden birini alır. Çizelgeleme geni mutasyona uğrayacak gen olarak seçilirse, bu genin sahip olabileceği değerlerden biri rastgele seçilerek (mevcut değer gelemeyecek şekilde) gen mutasyona uğratılmaktadır. Diğer genlerde mutasyon operatörü genin değeri 0 ise 1, 1 ise 0 olarak değişecek şekilde çalışmaktadır.

4.1.6. Yeni popülasyon ve durdurma kriteri

Mevcut popülasyon içerisinde seçim ile belirlenen bazı bireylere çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin uygulanmasının ardından sonraki iterasyon için yeni popülasyonun belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için mevcut popülasyondaki bireyler, çaprazlama sonucunda oluşan bireyler ve mutasyon sonucunda oluşan

bireylerin uygunluk fonksiyonu değerlerine bakılmaktadır. Uygunluk fonksiyonu değerlerine göre popülasyon büyüklüğü kadar birey seçilerek yeni popülasyonun oluşturulması gerçekleştirilmektedir. Ancak, bu durumun sonsuza kadar devam etmesinin engellenmesi için bir durdurma kriteri belirlenmesi şarttır. Genellikle GA'da üç farklı durdurma kriteri kullanılmaktadır. Bunlar; bir zaman belirlemek ve o zaman kadar yazılımın çalışmasını sağlamak, belirli bir iterasyon sayısı kadar yazılımı ilerletmek ya da performansın iyileşmesinin çok azaldığı durumlarda durdurmak olarak tanımlanabilir (Timuçin ve Biroğul, 2020). Durdurma kriterleri yalnız başına uygulanabilecekleri gibi, birden fazla kriter bir arada da kullanılabilir. Çalışmada kullanılan GA algoritmasının akış şeması Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. GA akış şeması.

Şekil 4.6'daki akış şemasına göre, ilk olarak mevcut (ilk aşamada başlangıç) popülasyondaki kromozomlar dizi olarak eklenir. Daha sonra, popülasyon büyüklüğü kadar olan bu kromozomların uygunluk fonksiyonu (ceza) değerleri hesaplanarak tutulur. Ceza değerleri küçükten büyüğe sıralanır ve bu sıraya göre her bir kromozomun seçilme olasılıkları belirlenir.

Seçilme olasılıkları da dikkate alınarak çaprazlama için rastgele iki kromozom seçilir. Seçilen iki kromozom birbiriyle çaprazlanır. Çaprazlamada 3 noktalı çaprazlama gerçekleştirilmiştir. Oluşan yeni 2 kromozom çaprazlama dizisinde tutulur. Toplamda 3 çift (6 adet) kromozom için çaprazlama gerçekleştirilmektedir. Ardından, yine seçilme olasılıkları dikkate alınarak mutasyon için rastgele bir kromozom seçilir ve mutasyona uğratılır.

Mutasyon işlemi toplamda 4 kromozoma yapılmaktadır. 28 genden oluşan bir kromozomun rastgele belirlenen 7 noktası seçilerek mutasyon işlemi uygulanmaktadır.

bu kromozomların uygunluk fonksiyonu (ceza) değerleri hesaplanarak tutulur. Daha sonra, ceza değerleri küçükten büyüğe sıralanır ve bu sıraya göre her bir kromozomun seçilme olasılıkları belirlenir. Ardından, seçilme olasılıkları dikkate alınarak mutasyon için rastgele bir kromozom seçilir ve mutasyona uğratılır.

Mutasyon işlemi toplamda 10 kromozoma yapılmaktadır. Daha kaliteli kromozomlara daha çok şans vermek için kaliteli kromozomların birden fazla sayıda mutasyona uğramasına imkân verebilmek amacıyla seçilme olasılıklarına göre aynı kromozomun tekrar seçilebilmesi ES'de mümkündür. 28 genden oluşan bir kromozomun rastgele belirlenen 7 noktası seçilerek mutasyon işlemi uygulanmaktadır. Mutasyon sonucunda oluşan kromozomlar mutasyon dizisinde tutulur. Mevcut popülasyon ve mutasyon popülasyonu dizilerinde bulunan kromozomların uygunluk fonksiyonu değerleri hesaplanır. Uygunluk fonksiyonu değerlerine göre küçükten büyüğe sıralanan bu kromozomlar değerlendirilerek en iyi kromozomlar (popülasyon büyüklüğü kadar) sonraki iterasyona aktarılır. Bu işlemler iterasyon sayısı kadar devam etmektedir.

4.3. Tavlama Benzetimi

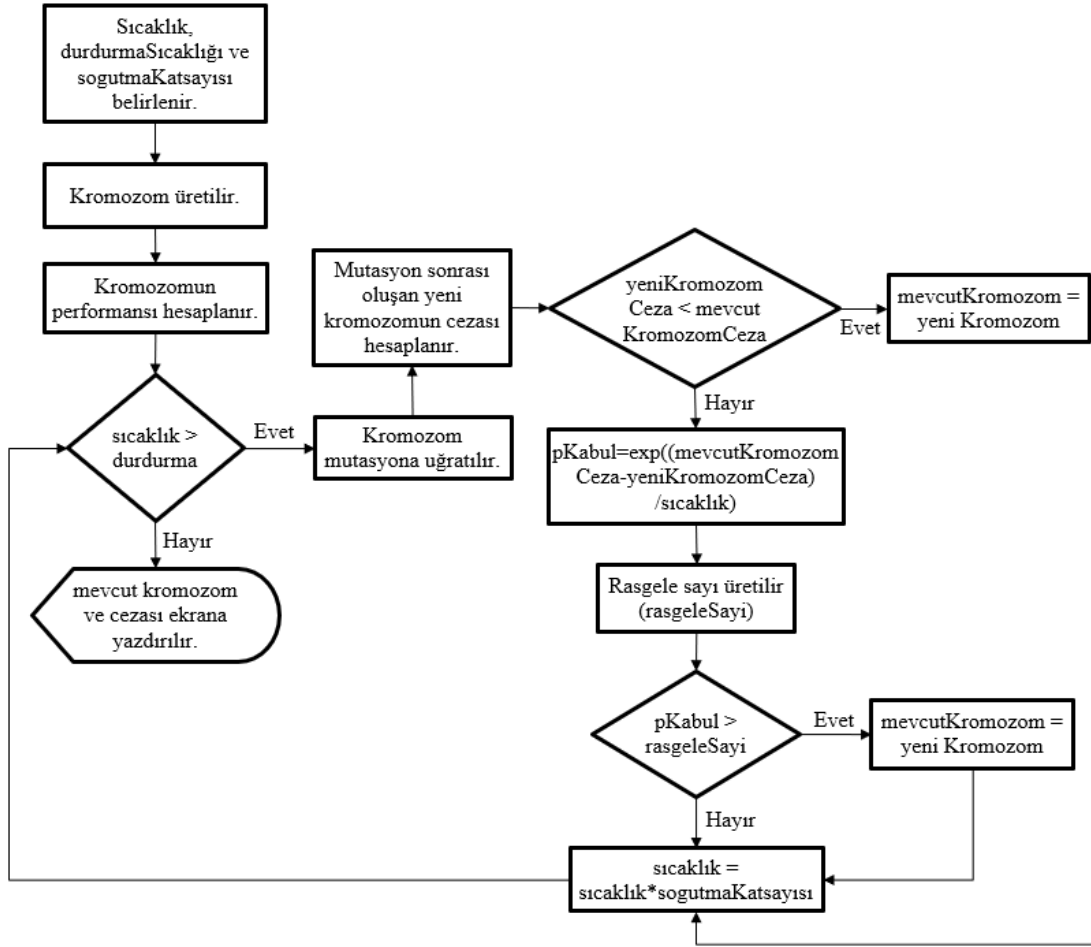
Kirkpatrick ve ark. (1983) tarafından 1980'li yılların başlarında geliştirilen tavlama benzetimi (TB), içerdiği rassallık neticesinde yerel optimuma takılmayı engelleyen ve bunun sonucunda daha geniş bir arama uzayında çözüm arayan bir sezgisel algoritmadır (Uysal ve Özcan, 2019). Kombinasyonel NP-hard problemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Kuo, 2010).

TB, metallere uygulanan fiziki tavlama işleminden esinlenilerek geliştirilmiştir. Fiziki tavlama, metaller ilk olarak ısıtılarak sıvı forma sokulur. Ardından, sıcaklık kademeli olarak düşürülerek metal soğutulmaya başlar. Soğutulma işlemindeki amaç, metalin molekülleri arasında sıklaşma yaratarak daha sağlam bir yapı almasını sağlamaktır. Ancak, soğutma işleminde hangi hızda soğutma yapılacağı büyük önem taşımaktadır. Örneğin, metalin aşırı hızlı soğutulması moleküler yapısının bozulmasına ve üzerinde çatlaklıklar oluşmasına sebebiyet verecektir. Bu da elbette metali istenen sağlamlıktan uzaklaştırmaktadır. Dolayısıyla, metali istenen kararlı ve sağlam yapıda tutabilmek için tavlama işlemini doğru bir biçimde uygulamak önemlidir.

Metaller, düşük enerji düzeyinde kararlı yapıya ulaştıkları için yeterli miktarda ısıtılıp sıvı hale getirilmesi de tavlamanın önemli adımlarından biridir. Çünkü, metalin atomları arasındaki kimyasal bağların kırılması ve hareket enerjisi elde edebilmeleri için metali yeteri kadar ısıtmak gerekmektedir. Yeterince ısıtılan ve sıvı hale gelen metal artık yavaşça soğutmaya ve kararlı ve bütünlüklü bir yapıya kavuşmaya hazırdır. Tavlama benzetimi algoritması, bu işlemi esas alarak optimizasyon problemlerinde global minimum değerinin bulunmasını amaçlayan bir algoritmadır.

Fiziki tavlama sürecinde sistemin durumu, TB algoritmasında uygun çözüm değerine karşılık gelmektedir. Algoritmadaki amaç fonksiyonu, fiziki tavlamanın enerji düzeyidir. Katı halden sıvı hale geçiş, algoritmada yeni komşu çözümün bulunması işlemine denk gelmektedir. Sıcaklık ise kontrol parametresi olarak düşünülebilir (Çakır, 2006).

TB, ilk olarak bir başlangıç çözümünü ele alarak başlar ve ilk sıcaklıktan itibaren belirli bir soğutma kuralı ile yeni çözümler üretir ve bu çözümü değerlendirmeye alır. Elde edilen yeni çözümler mevcut çözümle karşılaştırılarak değerlendirilmektedir. Değerlendirme sonucunda, yeni çözümün daha iyi olması sonucu ile karşılaşırsa yeni çözüme geçiş yapılır (Cura, 2008). Ancak, yerel optimum noktalara takılı kalmamak için bazen yeni çözüm mevcut çözümden daha iyi olmasa bile kabul edilmelidir. Kötü çözümlerden hangilerinin kabul edileceğine bir olasılık fonksiyonu üzerinden rassal olarak karar verilmektedir. TB'yi diğer komşu arama algoritmalarından ayıran en büyük özellik, TB'nin yerel minimumdan kaçınabilme kabiliyetidir. Bu kabiliyeti, tamamen algoritmanın kötü çözümleri de belli bir oranda kabul etmesine borçludur (Ayhan, 2021). Tavlama benzetimi algoritmasının akış şeması Şekil 4.8'de gösterilmektedir.



Şekil 4.8. TB akış şeması.

TB algoritmasında ilk olarak bir başlangıç ve bitiş sıcaklığı ile soğutma katsayısı belirlenir. Daha sonra başlangıç çözümü olarak bir kromozom belirlenir. Belirlenen kromozomun performansı hesaplanır ve hem mevcut çözüm hem de optimum çözüm olarak kaydedilir. Ardından, bu kromozom mutasyona uğratarak komşu çözüm üretilir ve yeni çözüm olarak kaydedilir. Yeni çözümün de performansı hesaplandıktan sonra mevcut çözüm ile yeni çözüm karşılaştırılır. Çözümde iyileşme gerçekleştiyse yeni çözüm, mevcut çözüm olarak kabul edilir. Eğer çözümde iyileşme olmadıysa, yeni çözümün kabul edilip edilmeyeceği, kabul olasılığının sonucuna bağlı olarak belirlenir. Kabul olasılığı (p_{kabul}) denklem 4.1'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$p_{kabul} = e^{(P_m - P_y)/T} \quad (4.1)$$

Burada, P_m , mevcut çözümün performansını, P_y , yeni çözümün performansını, T ise sıcaklık değerini temsil etmektedir. p_{kabul} hesaplandıktan sonra bir rassal sayı

belirlenir ve p_{kabul} , rassal sayıdan büyükse yeni çözüm kabul edilir. Aksi halde mevcut çözüm ile devam edilir ve sıcaklık düşürülerek sonraki iterasyona geçilir. Bu döngü, sıcaklık değeri belirlenen son sıcaklık değerinin altına düşünceye kadar devam eder. Tavlama benzetimine ait kaba kod Şekil 4.9’da gösterilmiştir.

Algoritma 2 Tavlama Benzetimi

```

1: Begin
2: Sıcaklık, durdurma sıcaklığı ve soğutma katsayısını belirle
3: Kromozom üret
4: Kromozom cezası hesapla
5: Repeat
6: if sıcaklık > durdurma sıcaklığı
7:   Kromozomu mutasyona uğrat
8:   Mutasyon sonrası yeni kromozomun cezasını hesapla
9:   if yeni kromozom ceza < mevcut kromozom ceza
10:    Mevcut kromozom = yeni kromozom
11:  Else
12:     $p_{Kabul} = \exp((\text{mevcutKromozomCeza} - \text{yeniKromozomCeza}) / \text{sıcaklık})$ 
13:    Rasgele sayı üret
14:    if  $p_{Kabul} > \text{rasgele sayı}$ 
15:      Mevcut kromozom = yeni kromozom
16:     $\text{sıcaklık} = \text{sıcaklık} * \text{soğutmaKatsayısı}$ 
17:  Ekrana mevcut kromozom ve cezasını yaz
18: End

```

Şekil 4.9. Tavlama benzetimi adımları.

4.4. Rassal Arama

Rassal arama algoritmasında, çözüm yöntemleri arasında daha adil bir değerlendirme yapabilmek adına mevcut popülasyon büyüklüğü kadar bir popülasyon ile başlanmaktadır. Genetik algorithmada başlangıç popülasyon büyüklüğü 10 kromozom olduğu için, rassal arama algoritmasında da 10 kromozom ile başlanır. Bu 10 kromozom rastgele üretilmektedir. Ardından, üretilen kromozomların performansları hesaplanmaktadır ve en iyi 10 kromozom bir sonraki iterasyona geçmektedir. Dolayısıyla, ilk iterasyonda üretilen 10 kromozom doğrudan ikinci iterasyona aktarılmaktadır. İkinci ve sonraki iterasyonlarda ise mevcut 10 kromozoma yeni üretilen 10 kromozom daha eklenmektedir. Bu iterasyonlarda oluşan toplam 20 kromozomdan en iyi 10 tanesi sonraki iterasyonlara aktarılmaktadır. Rassal arama algoritması, genetik algoritmanın çalıştığı iterasyon sayısı kadar çalışmaktadır.

4.5. Hibrit Arama

Rassal aramalar başlangıçta çözüm kümesinin her tarafından örnekler aldığı için özellikle ilk iterasyonlarda çok faydalıdır. İlk iterasyonlardan sonra rassal aramada beklenen marjinal kazanım hızla düşer ve verimsiz sonuçlar verebilir. Rassal arama o zamana kadar elde edilen iyi çözümlerden faydalanmadığı için yönlendirilmemiş bir algoritmadır. Rassal aramanın aksine genetik algoritma, evrimsel strateji ve tavlama benzetimi o zamana kadar bulunan en iyi çözümden ve iyi çözümlerden faydalandığı için yönlendirilmiş algoritmalarlardır. Hibrit arama algoritması, genetik algoritma ile rassal arama algoritmasının entegre edilmesi ile oluşturulmuş bir algoritmadır. Yine adil değerlendirme adına eşit sayıda iterasyon ile çalıştırılmaktadır (100). Bu algortmada, 100 iterasyonun 5 tanesi rassal arama algoritmasının kullanılması ile, 95 iterasyon ise genetik algoritmanın kullanılması ile çalıştırılmaktadır. İlk 5 iterasyonda, 10'ar kromozom üretilerek performansı hesaplanır ve 6. iterasyonda rassal arama algoritmasından gelen en iyi 10 kromozom genetik algoritmanın başlangıç popülasyonuna dönüşür. Bu popülasyon ile başlayan ve 95 iterasyon süren bir genetik algoritma uygulamasının ardından en iyi performansa sahip kromozom belirlenmiş olur. 100 iterasyon için tanımlanan 5-95 dengesi, arzu edildiği gibi değiştirilebilmektedir.

5. BENZETİM

Atölye tipi çizelgeleme problemlerinde hangi işin hangi rotayı kullanarak hangi makinede işleneceği belirlenir. Çizelgeleme problemlerinde, işlerin geliş zamanları, operasyon süreleri, makine sayıları ve rota sayıları gibi bilgiler önceden belirlenmiş olabileceği gibi, bu bilgilerin tamamı ya da bir kısmı zamana bağlı bir fonksiyon ile değişken de olabilir.

Proses planlama, çizelgeleme ve teslim tarihi belirleme fonksiyonlarının birbirine entegre edildiği çalışma sayısı son derece azdır. Bu üç fonksiyon sıklıkla ikili kombinasyonlar halinde çalışılmıştır. Yalnızca atölye çizelgeleme problemi bile NP-hard sınıfına giren bir problem türüdür (Erden, 2019). Üretilen ürünlerin zamanında ve doğru bir şekilde teslim edilmesi işletmeler için son derece önemlidir. Ancak, teslimat fonksiyonunun çizelgeleme fonksiyonuna entegre edildiği çalışmalarda amaç fonksiyonları genelde teslimat süresi değil, toplam kat edilen mesafe ya da toplam maliyet olarak öne çıkmaktadır. Teslimatı tam olarak bu fonksiyonlara entegre edebilmek için ürünlerin müşterilerin kapısına bırakıldığı anı, teslimat zamanı olarak kabul etmek ve bu duruma göre gecikme veya erken teslim etme performansını hesaba katmak gerekmektedir. Çalışmanın üçüncü bölümünde konu ile ilgili kapsamlı literatüre yer verilmiştir.

5.1. Problemin Tanımı

Çalışmada, tek araçlı atölye tipi imalat yapılan bir ortam ele alınmaktadır. Bu atölye ortamında proses planlama, çizelgeleme, teslim tarihi belirleme ve teslimat operasyonlarının birbiriyle bütünleşik bir biçimde çalışması amaçlanmaktadır. Bir sipariş geldiğinde, bu siparişe ait müşteri, operasyon ve rota bilgileri ele alınarak teslim tarihi belirlenmekte, ardından bu sipariş makine yoğunluklarına göre çizelgelenmekte, üretim tamamlandıktan sonra ise araca yüklenerek müşteriye teslimatı sağlanmaktadır.

Çalışmada ele alınan problemde çok sayıda müşteri bulunmaktadır. Her işe ait 2 farklı üretim rotası mevcuttur. Her iş 3 operasyondan geçerek işlem görmektedir. Her müşterinin belirli bir önemi vardır. Daha önemli bir müşteri hem teslim tarihi

belirlenirken hem çizelgeleme yapılırken hem de teslimatta öncelikli olmaktadır. Müşterilerin önem dereceleri örnek olarak Tablo 5.1’de sunulmaktadır.

Tablo 5.1. Müşteri önemleri.

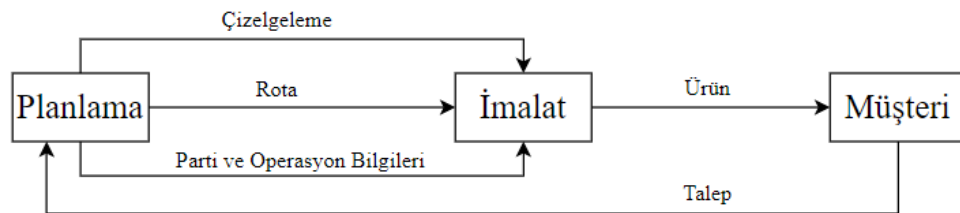
Önem	Ağırlık
Çok Önemli	2,5
Önemli	1
Orta Önemli	0,5
Az Önemli	0,33

Problemin çözümünde hem tek tek teslimat hem de parti (batch) tipi teslimat incelenmektedir. Müşteri önemleri, iş sayısı, operasyon sayısı, rota sayısı, makine sayısı gibi değişkenler istenildiği gibi değiştirilebilir. Hazırlanan yazılım bu konuda son derece esnek ve tüm değişikliklere kolayca adapte olabilecek yapıda tasarlanmıştır. Problem belirli varsayımlar altında ele alınmıştır. Bu varsayımlar şunlardır;

- Her siparişin farklı bir müşteriye ait olduğu varsayılmaktadır.
- Müşterilerin eşit derecede önemli olmadığı varsayılmaktadır. Her müşterinin farklı bir önemi ve buna dayalı olarak bir ağırlığı bulunmaktadır.
- Bir çalışma günü içerisinde yetişmeyen işlerin ertesi güne bırakıldığı varsayılmaktadır.
- Makinelerin farklı olduğu ve her makinenin belli işleri yapabildiği varsayılmaktadır.
- Teslimatta aracın ürünleri tek tek teslim etmekte olduğu yani müşteriye bırakıp atölyeye geri döndüğü varsayılmaktadır (parti değilse).
- Atölyeye hangi işin hangi zamanda geleceğinin önceden belli olduğu (deterministik) varsayılmaktadır.
- Atölyenin tek bir araca sahip olduğu varsayılmaktadır. Ancak aynı araç birden fazla tur gerçekleştirebilir.
- Ayrık teslim tarihi yerine ortak teslim tarihi kullanılmaktadır.
- Her bir işe ait rotaların eşit sayıda operasyon içerdiği varsayılmıştır.
- Birbirinden bağımsız n adet iş ve m adet makine bulunmaktadır.

- Her işin kendi çalışma sırası vardır.
- Her bir işlem sırası, sıralı bir işlemler dizisidir.
- Her işlem için, bunu gerçekleştirebilecek bir dizi makine vardır.
- Alternatif makinelerde bir operasyonun işlem süresi önceden tanımlanmıştır.
- Her işlem, yürütülürken kesintiye uğratılamaz.
- Her makine herhangi bir zamanda en fazla bir işlem gerçekleştirebilir.
- Parti (batch) teslimatta aracın belirli sayıda siparişin altında ya da üzerinde yola çıkmadığı varsayılmaktadır.
- Parti teslimatta araç sayısının yeterli miktarda olduğu varsayılmaktadır.
- Teslimat aşamasında atölyede ürünlerin yüklenmesinin ve müşteriye ulaştığında araçtan boşaltılmasının teslimat zamanı içerisinde olduğu varsayılmaktadır.
- Ayrıca, işler partilere ayrıldıktan sonra son parti araç kapasitesini doldurmuyorsa, bir sonraki gruptan kalan kısım kadar ürün aktarıldığı varsayılmaktadır.
- Aracın kapasitesi dolmadan atölyeden ayrılmadığı varsayılmaktadır.
- Her rota atölyede başlayıp tamamlanmaktadır.

Ürünlerin teslim tarihleri işleyişin en başında rotalamaya baştan karar verilerek belirlenmektedir. Önce teslim tarihi verip daha sonra nasıl teslim edileceğinin belirlenmesi gibi bir yapı kurulmamıştır. Çalışmada amaç mesafe minimizasyonu değil, erken, geç ve zamanında teslimat ile birlikte belirlenen ceza değerini minimize etmek olduğu için çalışma bu amaca uygun şekilde hazırlanmıştır. Problemi tanımlayan ve planlama ile müşteri arasında gerçekleşen akışı gösteren şema Şekil 5.1’de sunulmuştur.



Şekil 5.1. Problemin akışı.

5.2. Problemin Modellenmesi

Çalışmada 4 farklı atölye ele alınmaktadır. Atölyelere ait bilgiler Tablo 5.2’de gösterildiği gibidir.

Tablo 5.2. Atölyelere ait bilgiler.

Atölye No	1	2	3	4
İş Sayısı	25	50	75	100
Rota Sayısı	2	2	2	2
Operasyon Sayısı	3	3	3	3
Makine Sayısı	2	2	2	2
Kromozom Uzunluğu	28	53	78	103

Çalışmanın daha iyi açıklanabilmesi adına detaylı bilgiler 50 işten oluşan 2 numaralı atölye baz alınarak verilmeye çalışılmıştır. Bir atölyede entegrasyonun yapılabilmesi için öncelikle proses planlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Proses planı, atölyede yer alan işleri, işlerin operasyonlarını ve bu operasyonların hangi makinelerde gerçekleşeceğini, operasyon sürelerini vb. bilgileri içermektedir. 2 numaralı atölyeye ait proses planı Tablo 5.3'te gösterildiği gibidir.

Tablo 5.3. Örnek proses planı.

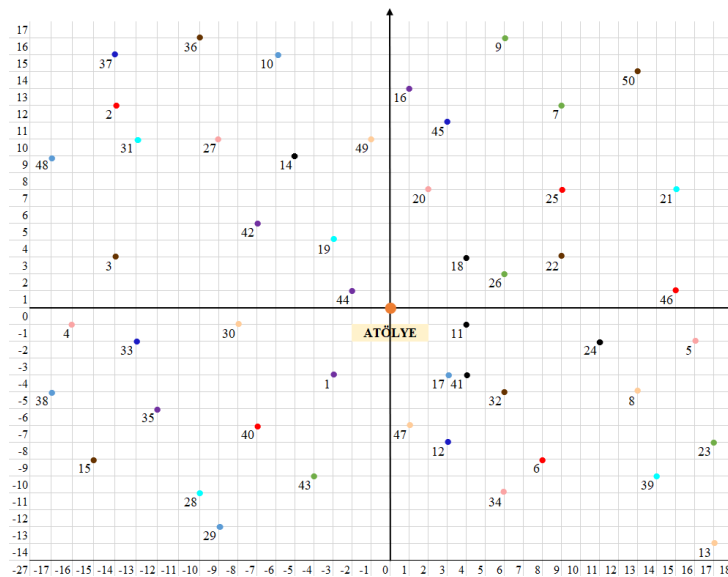
İş	Rota	Op. 1 (Makine)	Op. 2 (Makine)	Op. 3 (Makine)	Müşteri Önemi
J1	R0	6	1	5	2,50
	R1	8	2	6	
J2	R0	9	2	8	0,50
	R1	8	1	4	
J3	R0	3	1	3	2,50
	R1	4	1	7	
J4	R0	9	2	5	1,00
	R1	6	2	7	
J5	R0	6	2	4	0,33
	R1	3	1	6	
J6	R0	5	2	7	2,50
	R1	5	2	8	
J7	R0	8	1	5	0,33
	R1	2	2	8	

Tablo 5.3'te 1 numaralı işin R0 ve R1 olmak üzere iki farklı rota ile üretilebildiği görülmektedir. R0 rotasında, ilk operasyonun Makine 1'de, ikinci ve üçüncü operasyonların ise Makine 2'de yapılacağı bilgisine ulaşılmaktadır. Benzer şekilde örneğin 7 numaralı işin R1 rotasında ilk operasyonunun süresi 5 birim, ikinci operasyonunun süresi 8 ve üçüncü operasyonunun süresi de 6 birimdir. En sağ sütunda müşteri önemleri bulunmaktadır. İşlere ait bilgilerin belirlenmesinin ardından, işlerin partilere atamalarının gerçekleştirilmesi yapılır. Her bir iş yalnızca bir partiye aittir ve her bir partide 5 iş (müşteri) bulunmaktadır. İşler partilere ayrılırken atölyede geçirecekleri zaman, işi talep eden müşterinin önemi ve müşterinin atölyeye olan mesafesi dikkate alınmaktadır. Bu bilgiler ışığında her bir işin partilere atanma değeri denklem 5.1 kullanılarak belirlenmektedir.

$$Atama\ değeri = (\sum p_j + d_{0j}) * \frac{1}{w_j} \quad (5.1)$$

İşlerin atama değerleri belirlendikten sonra atama değerleri küçükten büyüğe sıralanır. Çünkü atama değeri daha küçük olan iş atölyeye yakın, daha önemli bir müşteriye ait ya da daha kısa sürede üretileceği için daha önemli bir iştir. Ardından, işler beşer beşer parti gruplarına ayrılır.

Teslimat için hangi müşterinin nerede bulunduğu bilgisi son derece önemlidir. Çalışmada, müşterilerin konumları düzlemsel bir koordinat sistemi üzerinde belirlenen rastgele noktalar olarak tanımlanmıştır. 2 nolu atölye için örnek müşteri konumları Şekil 5.2'de gösterilmektedir. Şekilde her bir parti ayrı bir renk ile temsil edilmektedir.



Şekil 5.2. Müşteri konumları.

Müşteri konumları bilindikten sonra, her bir müşterinin atölyeye olan uzaklığının belirlenmesi gerekir. Atölye koordinat sisteminde merkez (0,0) olarak kabul edilmiştir. Tüm müşterilerin konumlarından hareketle hem birbirlerine hem de atölyeye olan uzaklıkları denklem 5.2 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$d_{ij} = |(y_j - y_i)| + |(x_j - x_i)| \quad (5.2)$$

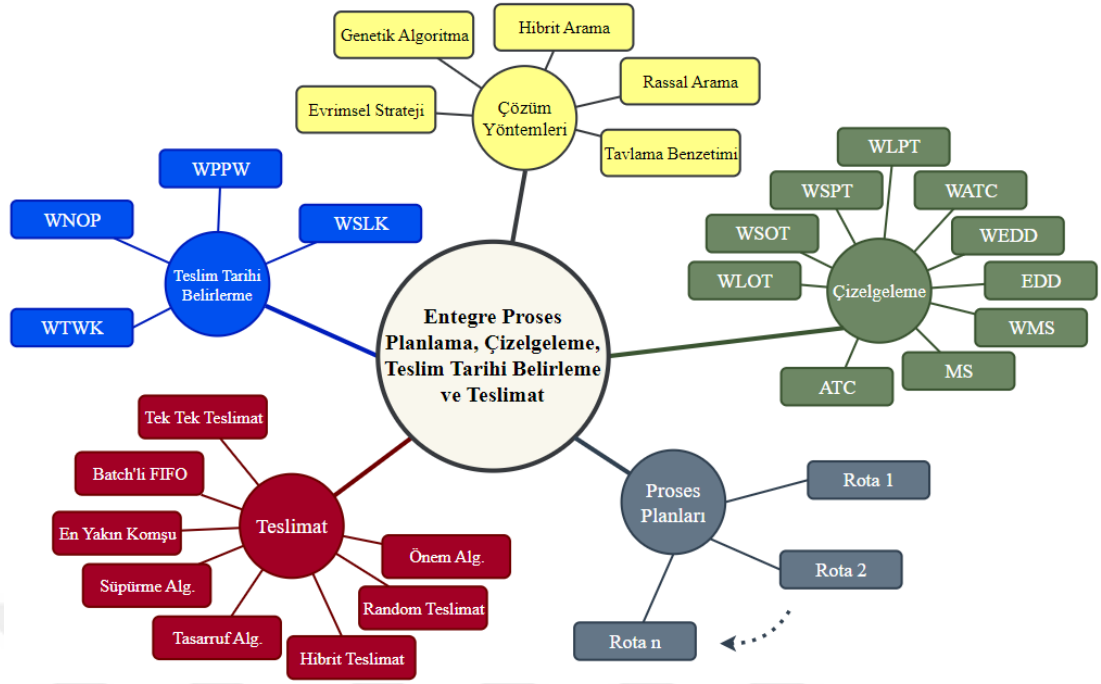
Burada, d_{ij} iki nokta arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. Mesafesi hesaplanacak iki noktanın Y ve X koordinat değerleri arasındaki farklar alınır ve toplanarak mesafe belirlenir. Tüm mesafelerin belirlenmesinin ardından oluşan mesafe matrisinin örneği Şekil 5.3'te gösterilmiştir.

Süre	Atölye	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10	J11	J12	J13	J14	J15	J16	J17	J18	J19	J20	J21	J22	J23	J24	J25
Atölye	-1	23	23	23	15	7	5	22	16	11	31	19	26	37	12	31	24	14	9	23	33	10	13	31	25	11
J1	23	-1	46	26	38	24	28	13	35	18	14	16	23	34	11	38	21	9	16	20	30	13	30	34	48	34
J2	23	46	-1	22	14	28	18	45	11	28	54	40	47	58	35	10	47	37	30	44	54	33	34	16	8	24
J3	23	26	22	-1	16	30	18	39	11	12	40	42	49	60	15	14	47	29	32	46	56	19	36	8	24	26
J4	15	38	14	16	-1	14	10	37	9	20	46	30	33	44	27	24	39	29	22	30	40	25	20	24	10	10
J5	7	24	28	30	14	-1	12	23	23	18	32	16	19	30	15	38	25	15	8	16	26	11	6	38	24	10
J6	5	28	18	18	10	12	-1	27	11	10	36	24	31	42	17	26	29	19	14	28	38	15	18	26	20	8
J7	22	13	45	39	37	23	27	-1	34	27	9	7	10	21	24	47	8	10	15	17	17	20	29	47	47	33
J8	16	35	11	11	9	23	11	34	-1	17	43	35	42	53	24	15	40	26	25	39	49	22	29	15	13	19
J9	11	18	28	12	20	18	10	27	17	-1	28	30	37	48	7	20	35	17	20	34	44	7	24	20	30	16
J10	31	14	54	40	46	32	36	9	43	28	-1	16	19	20	25	48	7	17	24	26	16	21	38	48	56	42
J11	19	16	40	42	30	16	24	7	35	30	16	-1	7	18	27	50	9	13	10	10	14	23	22	50	40	26
J12	26	23	47	49	33	19	31	10	42	37	19	7	-1	13	34	57	12	20	17	7	7	30	19	57	39	23
J13	37	34	58	60	44	30	42	21	53	48	20	18	13	-1	45	68	13	31	28	20	8	41	32	68	50	36
J14	12	11	35	15	27	15	17	24	24	7	25	27	34	45	-1	27	32	14	17	31	41	4	21	23	37	23
J15	31	38	10	14	24	38	26	47	15	20	48	50	57	68	27	-1	55	37	40	54	64	27	44	8	18	34
J16	24	21	47	47	39	25	29	8	40	35	7	9	12	13	32	55	-1	18	17	19	9	28	31	55	49	35
J17	14	9	37	29	29	15	19	10	26	17	17	13	20	31	14	37	18	-1	7	17	27	10	21	37	39	25
J18	9	16	30	32	22	8	14	15	25	20	24	10	17	28	17	40	17	7	-1	14	24	13	14	40	32	18
J19	23	20	44	46	30	16	28	17	39	34	26	10	7	20	31	54	19	17	14	-1	12	27	12	54	36	20
J20	33	30	54	56	40	26	38	17	49	44	16	14	7	8	41	64	9	27	24	12	-1	37	24	64	46	30
J21	10	13	33	19	25	11	15	20	22	7	21	23	30	41	4	27	28	10	13	27	37	-1	17	27	35	21
J22	13	30	34	36	20	6	18	29	29	24	38	22	19	32	21	44	31	21	14	12	24	17	-1	44	26	10
J23	31	34	16	8	24	38	26	47	15	20	48	50	57	68	23	8	55	37	40	54	64	27	44	-1	18	34
J24	25	48	8	24	10	24	20	47	13	30	56	40	39	50	37	18	49	39	32	36	46	35	26	18	-1	16
J25	11	34	24	26	10	10	8	33	19	16	42	26	23	36	23	34	35	25	18	20	30	21	10	34	16	-1

Şekil 5.3. Mesafe matrisi.

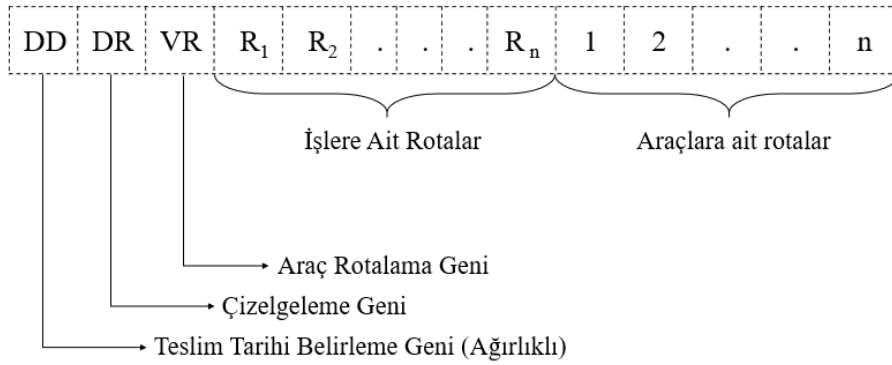
5.2.1. Kromozom yapısı

Teslim tarihi belirleme geni 4 farklı yöntemden, çizelgeleme geni 10 farklı yöntemden, araç rotalama (teslimat) geni ise 9 farklı yöntemden oluşmaktadır. Problemin fonksiyonlarına ait kurallar ve çözümde kullanılan yöntemler Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Fonksiyonlara ait kurallar ve çözüm yöntemleri.

Kromozomda her bir fonksiyon için (teslim tarihi belirleme, çizelgeleme veya teslimat) hangi kural seçilirse problem o kuralların entegrasyonu ile çözülmektedir. Her kural için ilgili gende bir gen değeri bulunmaktadır. Fonksiyonlardan gelen değerler ve rota değerleri ile birleşerek oluşan genler bütünü ile de her bir kromozom oluşmaktadır. Çalışmada kullanılan kromozom yapısı Şekil 5.5'te gösterilmektedir.



Şekil 5.5. Kromozom yapısı.

Şekil 5.6'da örnek bir kromozom sunulmuştur. Kromozomların uzunluğu bağlı olduğu atölyedeki iş sayılarına göre değişim göstermektedir. Her işe ait 2 farklı rota olduğu için rota genler 0 ya da 1 değerini almaktadır.

Kromozom Adı	DD	DR	VR	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10	J11	J12	J13	J14	J15	J16		
Kromozom 1	[	0	5	3	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	]
Kromozom 2	[	1	1	5	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	]
Kromozom 3	[	0	8	7	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	]
Kromozom 4	[	3	3	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	]
Kromozom 5	[	0	9	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	]
Kromozom 6	[	2	5	4	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	]
Kromozom 7	[	1	2	3	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	]
Kromozom 8	[	2	1	2	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	]
Kromozom 9	[	1	7	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	]
Kromozom 10	[	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	]

Şekil 5.6. 2 numaralı atölye için kromozom örneği.

Fonksiyonlara ait genler olan teslim tarihi belirleme geni, çizelgeleme geni ve teslimat (araç rotalama) geni ise her bir yöntem farklı bir rakamla belirtilecek şekilde değerler almaktadır. Hangi yöntemin hangi fonksiyonda hangi değeri aldığı Tablo 5.4'te gösterilmiştir.

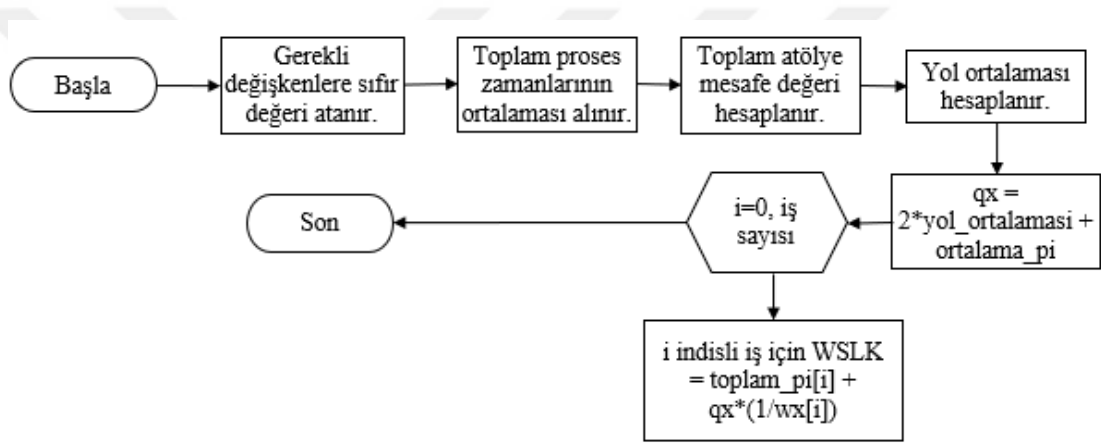
Tablo 5.4. Yöntemlerin kromozomda aldığı değerler.

Gen No	Teslim Tarihi Belirleme	Çizelgeleme	Teslimat
0	WSLK	WSPT	Tekli teslimat
1	WPPW	WSOT	Partili teslimat
2	WNOP	WLOT	En yakın komşu
3	WTWK	WLPT	Tasarruf algoritması
4		WATC	Süpürme algoritması
5		ATC	Random teslimat
6		MS	Hibrit teslimat
7		WMS	Önem algoritması 1
8		EDD	Önem algoritması 2
9		WEDD	

5.2.2. Teslim tarihi belirlemenin modellenmesi

Her bir işe teslim tarihi atanırken, müşteri memnuniyetini sağlamak ana amaçlardan biri olmalıdır. Çok uzun zaman sonraya teslim tarihi vermek işletmeler için olumsuz

bir imaj yaratacak ve hatta müşterilerin kaybedilmesine sebebiyet verebilecektir. Ayrıca teslim tarihi uzunluğu cezası ve erken tamamlanma cezası oluşacak ve erken tamamlanan işler gereksiz stok yığılmasına ve elde bulundurma maliyetine sebep olacaktır. Çok yakın bir zamana teslim tarihi vermek ise tutulması güç bir söz vermek anlamına gelmektedir. Gecikme maliyetlerinin hızla artmasına, verilen sözün tutulamamasından kaynaklı imaj zedelenmesine, müşteriye telafi olarak sunulan fiyat indirme gibi ek maliyetlerin oluşmasına ve müşteri memnuniyetsizliğine yol açmaktadır. Just in Time prensibinde işlerin tam olarak teslim tarihinde bitirilmesi amaçlanmaktadır (Gordon ve ark., 2002). Çalışma için hazırlanan yazılımın teslim tarihlerini nasıl belirlediği WSLK üzerinden Şekil 5.7'deki akış şeması ile gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Teslim tarihi belirleme akış şeması.

Klasik teslim tarihi belirleme kuralları parti teslimata uygun yapıda olmadıklarından dolayı, parti teslimat tipinde çalışırken mevcut teslim tarihi belirleme kuralları üzerinde birtakım değişikliklere gidilmesi gerekmektedir. Bu nedenle parti tipi teslimat için kullanılan teslim tarihi belirleme yöntemleri modifiye edilmiştir.

5.2.2.1. WSLK kuralı

WSLK kuralının literatürde kullanılan şekli denklem 5.3'te ifade edildiği gibidir.

$$WSLK = p_i + q_i * Z \quad (5.3)$$

Partili modelde kullanılacak WSLK formülü için yukarıdaki eşitlik kullanılamamaktadır. Çünkü, yukarıdaki toplam proses zamanı (p_i) ve slack (pay) değeri (q_i) değerleri her bir iş için geçerli değerlerdir. Dolayısıyla, parti için bu değerler kullanılmak istendiğinde ilgili partideki hangi işe ait değerlerin alınacağı

belirlenememektedir. Ayrıca, partili teslimatta ilgili işlerin parti halinde üretildiği kabul edilmektedir. Oysa tek tek teslimatta işler tek tek üretilmektedir. Bu nedenle, parti halinde üretilen ürünler için o partiye ortak teslim tarihi verilmesi gerekmektedir. Bundan dolayı, p_i ve q_i değerlerinin parti sistemine göre düzenlenmesi gerekmektedir. Çalışmada, denklem 5.3'te belirtilen literatürdeki yapıya bağlı kalmak şartıyla, değerlerde birtakım modifikasyonlara gidilmiştir. Partili teslimatta kullanılan WSLK kuralına ait formül denklem 5.4'te gösterilmektedir.

$$WSLK_b = \left(d_b * 1,5 + \frac{bp_i}{m} \right) + \left(d_b * 1,5 + \frac{bp_i}{m} \right) * Z \quad (5.4)$$

Burada; d_b her bir partiye ait işlerin atölyeye olan uzaklıkları toplamı, bp_i , her bir partiye ait işlerin proses zamanlarının toplamı, m ise makine sayısı iken Z değeri müşteri önem derecesi ile ters orantılı bir değeri ifade etmektedir. Orijinal WSLK formülündeki p_i değerinin modifiyeli formülde $\left(d_b * 1,5 + \frac{bp_i}{m} \right)$ olduğu göze çarpmaktadır. Yine q_i değeri için de aynı durum söz konusudur.

Denklem 5.4'te mesafelerin 1,5 katı kullanılmaktadır. Çünkü, tek tek teslimatta araç bir işi teslim ettikten sonra atölyeye dönüp sıradaki işi almaktaydı. Bu nedenle mesafe olarak gidiş-geliş süresini dikkate almak gerekirken, partili teslimatta araç ilgili partiyi teslim etmeden atölyeye dönmediği için işler için gidiş-geliş süre almak, gereksiz yere ürünlerin geç teslim edilmesine sebep olacaktır. Bunu önüne geçebilmek adına, ilgili işe ait mesafenin 1,5 katı alınmaktadır. bp_i değerinin makine sayısına bölünerek kullanılmasının sebebi ise, partili teslimatta partideki işlerin makine sayısı kadar makinenin tamamında eş zamanlı olarak hazırlanmaya başlamasıdır. Aksi takdirde, yine verilmesi gerekenden daha uzun bir teslim tarihi verilmesi kaçınılmazdır.

5.2.2.2. WTWK kuralı

WTWK kuralının literatürde kabul gören hali denklem 5.5'teki gibidir.

$$WTWK = p_i * k * Z \quad (5.5)$$

Bölüm 5.2.2.1'de belirtilen gerekçelerden dolayı standart WTWK formülü partili teslimat için kullanılamamaktadır. Dolayısıyla, denklem 5.5'teki formülün düzenlenmesi gerekmektedir. Literatürdeki WTWK temeline bağlı kalmak koşuluyla, partili yapı için modifiye edilmiş formül denklem 5.6'da gösterilmektedir.

$$WTWK_b = \left(d_b * 1,5 + \frac{bp_i}{m} \right) * k * Z \quad (5.6)$$

Burada; d_b her bir partiye ait işlerin atölyeye olan uzaklıkları toplamı, bp_i , her bir partiye ait işlerin proses zamanlarının toplamı, m ise makine sayısı iken k ifadesi belirlenen sabit değeri ve Z değeri de müşteri önem derecesi ile ters orantılı bir değeri ifade etmektedir. Orijinal WTWK formülündeki p_i değerinin modifiyeli formülde $\left(d_b * 1,5 + \frac{bp_i}{m} \right)$ olduğu göze çarpmaktadır. Düzenlenmiş formül ile ilgili açıklamalar Bölüm 5.2.2.1 ile benzerlik göstermektedir.

5.2.2.3. WPPW kuralı

WPPW kuralının literatürde kabul gören hali denklem 5.7'deki gibidir.

$$WPPW = p_i * k * Z_1 + q_i * Z_2 \quad (5.7)$$

WPPW, açılımı “weighted process plus wait” olan ve çözüm havuzu içerisinde daha uygun çözümleri daha kolay bulabilmek amacıyla toplamda 9 farklı değer üzerinden hareket eden bir yöntemdir. Bu 9 farklı değeri sağlayan, 3 farklı k değeri ve 3 farklı q_i değeri kullanarak programın çalıştırılıyor olmasıdır. Dolayısıyla, yine ana yapıya zarar vermeden orijinal formül üzerinde partili yapıyı doğru ifade edebilecek düzenlemeler yapılmıştır. Bu düzenlemeler sonucunda partili sisteme ait WPPW kuralı denklem 5.8'de gösterildiği gibidir.

$$WPPW_b = \left(d_b * 1,5 + \frac{bp_i}{m} \right) * k * Z_1 + \left(d_b * 1,5 + \frac{bp_i}{m} \right) * Z_2 \quad (5.8)$$

Burada; d_b her bir partiye ait işlerin atölyeye olan uzaklıkları toplamı, bp_i , her bir partiye ait işlerin proses zamanlarının toplamı, m ise makine sayısını ifade etmektedir. Ayrıca, k ifadesi belirlenen sabit değeri ve Z_1 değeri de müşteri önem derecesi ile ters orantılı bir değeri belirtirken, Z_2 değeri ise Z_1 değerinin belirli bir katını ifade eden ikinci bir Z değeridir. Orijinal WPPW formülündeki p_i değerinin modifiyeli formülde $\left(d_b * 1,5 + \frac{bp_i}{m} \right)$ olduğu göze çarpmaktadır.

5.2.2.4. WNOPPT kuralı

WNOPPT kuralının literatürde kabul gören hali denklem 5.9'daki gibidir.

$$WNOPPT = p_i * k_1 * Z_1 + NOP * k_2 * Z_2 \quad (5.9)$$

WNOPPT kuralı, operasyon sayısını da proses zamanları ile beraber dikkate alarak hareket eden bir teslim tarihi belirleme kuralıdır. Denklem 5.9'daki *NOP* ifadesi ilgili işin kaç operasyonunun olduğunu belirten operasyon sayısı değerini gösterir. Bu kuralı da diğer kurallar gibi orijinal yapısının dışına çıkmadan partili teslimata uygun şekilde düzenlemek gerekmektedir. Bu düzenlemeler yapıldıktan sonra ortaya çıkan partili WNOPPT formülü denklem 5.10'da gösterilmektedir.

$$WNOPPT_b = \left(d_b * 1,5 + \frac{bp_i}{m} \right) * k_1 * Z_1 + NOPPB * k_2 * Z_2 \quad (5.10)$$

Burada; d_b her bir partiye ait işlerin atölyeye olan uzaklıkları toplamı, bp_i , her bir partiye ait işlerin proses zamanlarının toplamı, m ise makine sayısını ifade etmektedir. Ayrıca, k_1 ifadesi belirlenen sabit değeri ve Z_1 değeri de müşteri önem derecesi ile ters orantılı bir değeri belirtmektedir. Z_2 değeri, Z_1 değerinin belirli bir katını ifade eden ikinci bir Z değeridir. k_2 değeri, orijinal formülde (denklem 5.9) operasyon sayısı katsayısı iken, modifiye edilmiş formülde her bir partideki toplam operasyon sayısının katsayısını betimlemektedir. Son olarak *NOPPB* ifadesi ise, bir partideki toplam operasyon sayısını gösteren bir değerdir. Örneğin, 3 operasyonlu 4 işten oluşan bir partide bu değer 12 olacaktır.

Teslim tarihi belirleme yöntemlerinin hesaplanmasında yukarıdaki eşitliklere bir ilave daha yapılmaktadır. Bu durum şu şekilde izah edilebilir: birinci parti üretildikten sonra araca yüklenerek teslimat için yola çıktığı sırada bir sonraki partinin üretimi başlamış durumdadır. Birinci partinin üretimi bittiği anda hemen ikinci partinin üretimi başlamaktadır. Dolayısıyla, ilk partiden sonraki her partiye teslim tarihi verirken, kendinden önceki partilerin üretimi için harcanan zamanın da bu süreye dahil edilmesi gerekmektedir. Çünkü bu değer dahil edilmediğinde, sanki ikinci partinin üretimi zaman 0 anında başlamış gibi bir durum oluşmaktadır. Halbuki, ikinci parti birinci parti tamamlandıktan sonra üretilmektedir. Bunu ifade edebilmek amacıyla, ilk partiden sonraki her bir parti için denklem 5.4, denklem 5.6, denklem 5.8 ve denklem 5.10 kullanılarak hesaplanan teslim tarihlerine kendinden önceki partilerin tamamının

$\frac{bp_i}{m}$ değerleri ilave edilmiştir. Partili teslim tarihi yöntemlerinin tamamında bu yaklaşım uygulanmaktadır.

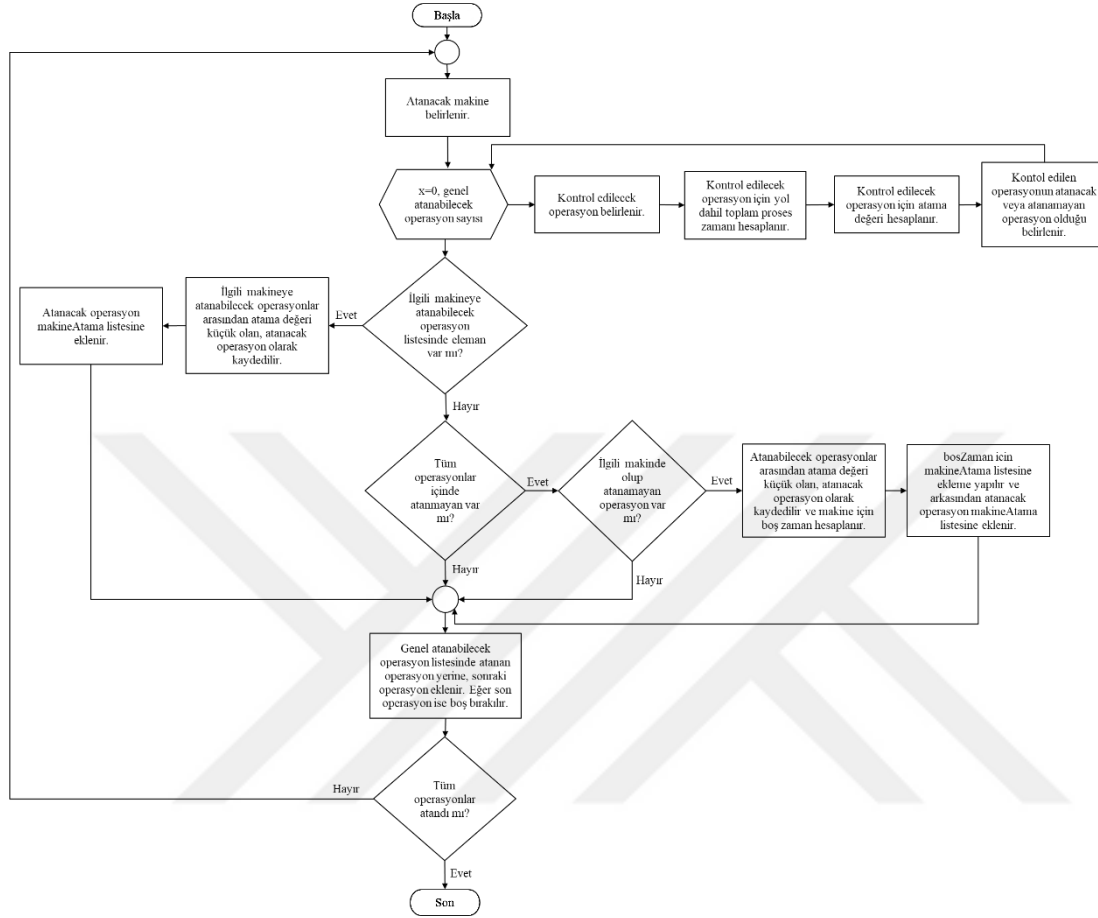
5.2.3. Çizelgelemenin modellenmesi

Çalışmada en karışık imalat ortamı olan atölye tipi imalat ortamı ele alınmıştır. Atölye tipi imalat ortamında birbirinden farklı pek çok iş gerçekleştirilirken her işin birbirinden farklı rotası olabilir. Dolayısıyla, bu durumu matematiksel olarak modelleyebilmek, gecikmeleri ve erken tamamlanmaları belirleyebilmek, en uygun çizelgeyi belirlerken bu sistemi bir de diğer fonksiyonlarla entegre etmek çok zordur. Çizelgeleme yaparken kullanılan bazı kurallar bulunmaktadır. Bu kurallardan bazıları statik bazıları ise dinamik kurallardır. Statik kurallar bir kere belirlendikten sonra çizelgeleme boyunca farklı değer almazken, dinamik kurallar ise zamana bağlı bir şekilde değişim gösterebilir. Çizelgeleme yaparken kullanılan kurallar Tablo 5.5'te gösterilmektedir.

Tablo 5.5. Çizelgeleme kuralları.

Kural	Uzun Adı	Öncelik
SPT	Shortest Processing Time	Toplam işlem süresi en kısa olan iş.
LPT	Longest Processing Time	Toplam işlem süresi en uzun olan iş.
SOT	Shortest Operation Time	Sıradaki operasyon süresi en kısa olan iş.
LOT	Longest Operation Time	Sıradaki operasyon süresi en uzun olan iş.
EDD	Earliest Due Date	Teslim tarihi en erken olan iş.
MS	Minimum Slack	Teslim tarihine kalan süre en az süre olan iş.
ATC	Apparent Tardiness Cost	Teslim tarihi en yakın ve işlem süresi en az olan iş.
WSPT	Weighted Shortest Processing Time	Toplam işlem süresi en kısa olan iş (ağırlıklı).
WLPT	Weighted Longest Processing Time	Toplam işlem süresi en uzun olan iş (ağırlıklı).
WSOT	Weighted Shortest Operation Time	Sıradaki operasyon süresi en kısa olan iş (ağırlıklı).
WLOT	Weighted Longest Operation Time	Sıradaki operasyon süresi en uzun olan iş (ağırlıklı).
WEDD	Weighted Earliest Due Date	Teslim tarihi en erken olan iş (ağırlıklı).
WMS	Weighted Minimum Slack	Teslim tarihine kalan süre en az süre olan iş (ağırlıklı).
WATC	Weighted Apparent Tardiness Cost	Ağırlıklandırılmış ATC
SST	Shortest Setup Time	Hazırlık zamanı en kısa olan iş.
FCFS	First Come First Served	İlk sırada gelen iş.

Çizelgelemede, her bir kromozomun çizelgeleme bölümünde yer alan kural numarasına göre işlem yapılmaktadır. Çalışma kapsamında hazırlanan yazılımın çizelgelemeyi nasıl yaptığını dair akış şeması Şekil 5.8’de gösterilmektedir.



Şekil 5.8. Çizelgeleme akış şeması.

5.2.4. Teslimatın modellenmesi

Atölyede üretilecek olan ürünlerin müşterilere teslim edilecekleri tarihler üretici tarafından önceden belirlenmektedir. Çalışmada tek araçlı bir model ele alınmaktadır ve bu aracın ne zaman hangi müşteriye gideceği konusu bir araç rotalama problemini beraberinde getirir. Teslimatın diğer fonksiyonlarla entegre bir şekilde çalışması NP-hard bir problem olduğundan çözümünde belirli sezgisel algoritmalarından yararlanılmıştır.

5.2.4.1. Süpürme algoritması

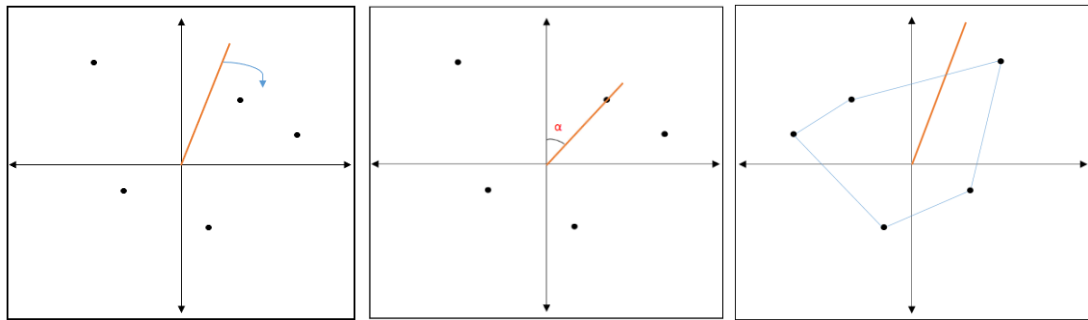
Süpürme algoritmasında, x ve y ekseninde bulunan ve hareketine orijinden başlayan bir ışın varmış gibi düşünülerek, eksende rastgele dağıtılmış olan müşterilere ışının dokunma sırasına göre bir dağıtım sırası belirlenir. Işın saat yönünde hareket

ettirilebileceği gibi tersi de mümkündür. Işının bu hareketine süpürme adı verilmektedir. Çalışmadaki süpürme algoritması uygulamasında müşterilerin atölyeye olan uzaklıklarından faydalanılarak polar açıları hesaplanmaktadır. Atölye bu durumda merkez yani (0,0) noktası olarak kabul edilmektedir. Tüm müşterilerin bu noktaya göre polar açıları denklem 5.11 ile hesaplanmaktadır.

$$\theta(i) = \tan^{-1} \left[\frac{(y(i)-y(0))}{(x(i)-x(0))} \right] \quad (5.11)$$

Denklem 5.11’de $\theta(i)$, i. işin açısını, $x(i)$ ve $y(i)$, i. işin x ve y eksenindeki değerlerini, $x(0)$ ve $y(0)$ ise atölyenin x ve y eksenindeki değerlerini ifade etmektedir. Algoritmada ilk olarak her bir parti için her müşterinin polar açıları hesaplanmaktadır. Ardından, hesaplanan bu değerler küçükten büyüğe sıralanır. En küçük açıya sahip işe ışın daha önce dokunacağından dolayı, ilk gidilecek iş, açısı en küçük iş olarak alınmaktadır. Bu şekilde ilgili partideki tüm işler sıralanana kadar ışın hareketine devam eder ve dağıtım rotası oluşturulur. Çalışmada ışın hem saat yönünde hem de saat yönünün tersinde hareket ettirilerek 2 farklı teslimat rotası oluşturulmuştur. 2 rotanın performansı hesaplanarak daha iyi olan alınmıştır.

Çalışmada ışının hareketine y eksenini üzerinden başladığı kabul edilmiştir. Dolayısıyla, müşterilerin açılarının hesaplanmasında y eksenine göre daha küçük olup olmadığı incelenmiştir. Şekil 5.9’da süpürme algoritmasının çalışma prensibi örnek olarak gösterilmiştir (Göçken ve ark., 2018).

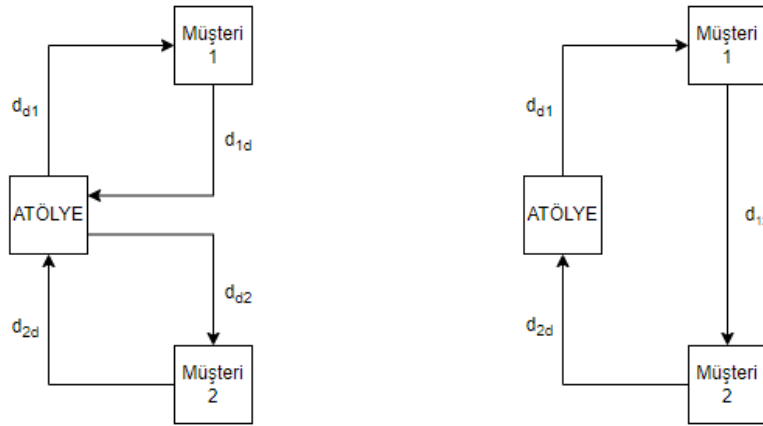


Şekil 5.9. Süpürme algoritması çalışma prensibi.

5.2.4.2. Tasarruf algoritması

Clarke ve Wright (1964) tarafından geliştirilen tasarruf algoritması, araç rotalama problemlerinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu algoritmada, atölye merkez kabul edilerek müşterilere yapılacak dağıtımlar için tasarruf değerleri hesaplanmaktadır. Algoritmanın çıkış mantığında, atölyeden bir müşteriye ürün teslim edip geri

dönme tene, geri dönmeyip bir başka müşteriye gitmenin sağladığı tasarruf baz alınmaktadır. Bu durum Şekil 5.10’da özetlenmiştir.



Şekil 5.10. Tasarruf algoritması.

Şekil 5.10’un ilk kısmında araç önce atölyeden Müşteri 1’e gidip, ürünü teslim ettikten sonra atölyeye dönmektedir. Daha sonra bu kez atölyeden Müşteri 2’ye teslimat için gidip gelmektedir. Bu durumun maliyetinin daha yüksek olacağı son derece açıktır. Dolayısıyla, ikinci kısımda gösterildiği gibi, atölyeden çıkan aracın önce Müşteri 1’e gidip sonrasında doğrudan Müşteri 2’ye giderek atölyeye dönmesi daha verimli bir çözüm sunmaktadır. İlk kısımdaki maliyet denklem 5.12 ile, ikinci kısımdaki maliyet denklem 5.13 ile hesaplanmaktadır. Sağlanan tasarruf ise denklem 5.14’te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$C_1 = d_{d1} + d_{1d} + d_{d2} + d_{2d} \quad (5.12)$$

$$C_2 = d_{d1} + d_{12} + d_{2d} \quad (5.13)$$

$$C_1 - C_2 = d_{1d} + d_{d2} - d_{12} \quad (5.14)$$

Denklem 5.14’teki formül ile her bir müşteri çifti için tasarruflar hesaplandıktan sonra tasarruf değerleri büyükten küçüğe doğru sıralanır. Sonraki adımda, en büyük tasarruf değerine sahip müşteri çifti teslimat sırasına yerleştirilir. Bir sonraki en büyük tasarruf değerine sahip müşteri çifti ile, teslimat sırasında bulunan müşteri çiftinin ortak bir elemanı bulunuyorsa, teslimat sırasına eklenmeye devam edilir. Ancak, ortak bir eleman yoksa, bu müşteri çifti teslimat sıralamasına eklenmeden bekletilir ve sonraki en büyük tasarruf değerine sahip müşteri çiftinde aynı özellikler aranır. Bu şekilde her

bir partideki tüm müşteriler teslimat sıralamasına alınıncaya kadar işlemler devam eder. Örneğin, bir partiye ait tasarruf bilgileri Tablo 5.6'daki gibi olsun.

Tablo 5.6. Örnek tasarruf bilgileri.

Sıra	Tasarruflar	İlk İş	İkinci İş
1	16	J18	J7
2	14	J21	J9
3	12	J21	J7
4	8	J5	J18
5	6	J5	J21
6	6	J21	J18
7	6	J5	J7
8	6	J7	J9
9	0	J5	J9
10	0	J18	J9

Tablo 5.6'daki verilerin kullanıldığı bir örnekte teslimat sırası şu şekilde oluşmaktadır. Algoritma ilk önce en yüksek tasarruf değeri olan 16'ya ait iş çiftini teslimat sırasına yerleştirir (J18-J7). Ardından, ikinci en yüksek tasarruf değeri olan 14'e ait iş çiftini teslimat sırasına yerleştirmeye çalışır (J21-J9) ancak teslimat sırasındaki işlerle (J18-J7) bağlantı yapılabilecek ortak bir eleman bulamadığı için mevcut iş çiftini atamadan sıradaki en yüksek tasarrufa geçer. 12 tasarruf değerine sahip iş çiftini ele alır (J21-J7) ve teslimat sırasındaki işlerle ortak bir bağlantı noktası arar. J7 ortak olduğu için artık yeni teslimat sırası J18-J7-J21 olur. Daha önce yüksek tasarrufa sahip ancak atanamamış iş çiftini bu kez yeni teslimat sırası ile karşılaştırır ve artık ortak eleman olduğu için onu da teslimat sırasına ekler. Yeni teslimat sırası, J18-J7-J21-J9 olur. Bu şekilde partideki tüm işler sıralanıncaya kadar tasarrufu maksimize edecek şekilde teslimat sırasını oluşturur.

5.2.4.3. Hibrit algoritma

Hibrit algoritma tasarruf algoritması ile süpürme algoritmasının bir arada kullanılmasıyla oluşturulmuş bir algoritmadır. Araştırıldığı kadarıyla literatürde böyle bir algoritma entegrasyonu ile karşılaşılmamıştır. Bu algoritmada, normal süpürme algoritmasında Y ekseninden başlayarak hareket eden ışın, müşterilerin dörde bölündüğü bir bölgede, bölgelerin seçilmesinde kullanılmaktadır. Yani, klasik süpürme algoritmasındaki gibi ilk önce hangi işin teslim edileceğine değil, aracın ilk önce hangi bölgeye gitmesi gerektiğine karar vermektedir. Bir bölgenin seçilmesinin ardından bölge içerisinde ilgili partiden birden fazla iş varsa, bu işlerin hangi sırayla teslim edileceğine klasik tasarruf algoritması adımlarına benzer şekilde karar verilmektedir. Örneğin, seçilen bölgede aynı partiden 7 iş olsun. Bu işlerin teslim sırasına, işlerin tasarruflarının hesaplanmasından sonra oluşacak sıralamaya göre karar verilmektedir. Aynı partiye ait tüm işler tamamlanmadan başka bir bölgeye gidilmediği varsayılmaktadır.

5.2.4.4. Random teslimat algoritması

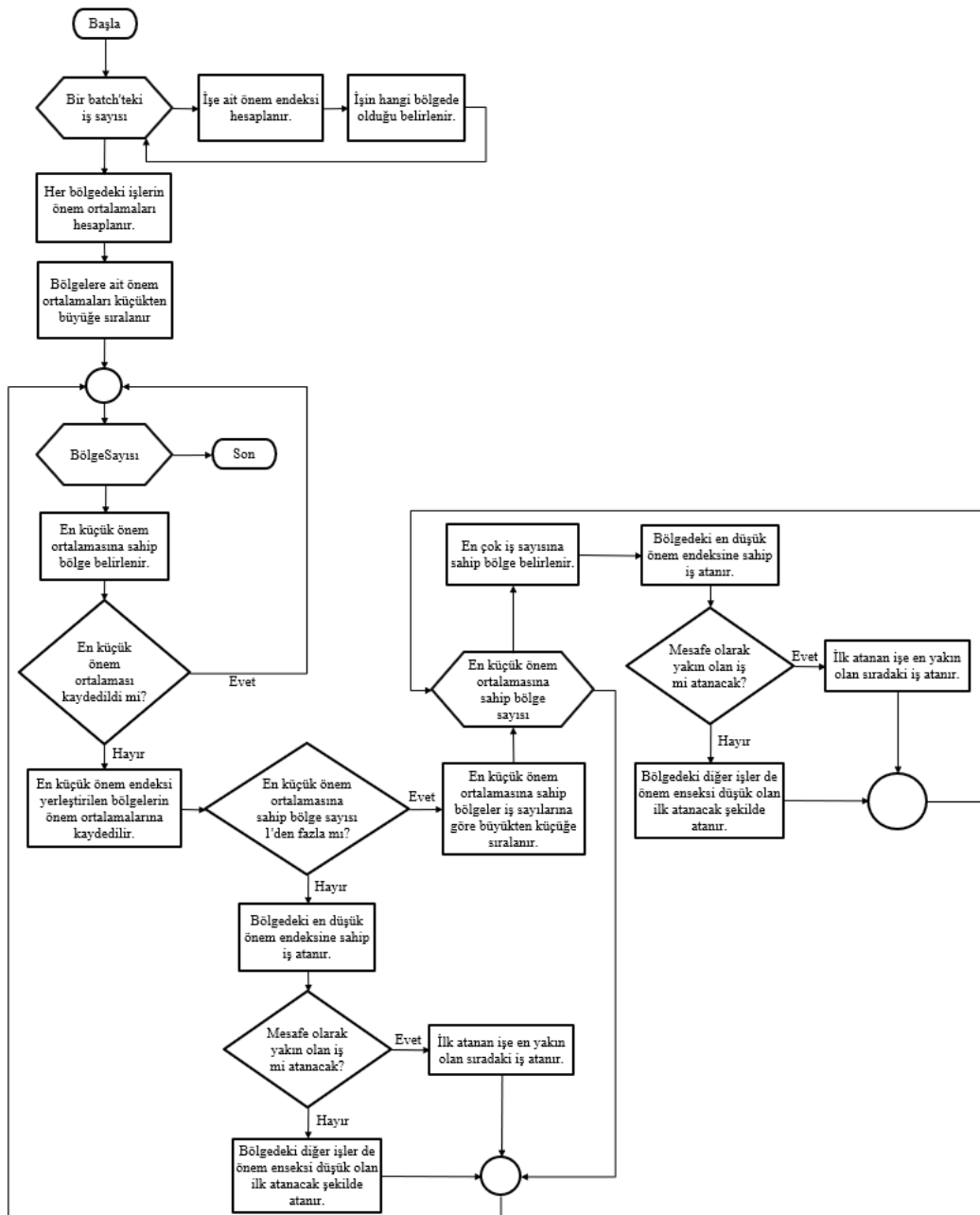
Random teslimat algoritması, çalışmanın amacı olan entegre çözümlerin ne kadar iyi olduğunu görebilmek ve kıyaslayabilmek adına oluşturulan bir algoritmadır. Bu algoritmada herhangi bir teslimat entegrasyonu bulunmamaktadır. Algoritma, proses planlama, çizelgeleme ve teslim tarihi belirleme fonksiyonlarının kromozomdaki değerlerine göre normal bir şekilde çalışmalarının ardından bir partideki işlerin rastgele dağıtılmasına dayanmaktadır. İlgili partideki tüm işler rastgele bir sırada teslim edilmektedir.

5.2.4.5. Önem algoritması

Önem algoritması, müşterilere ait işlerin atölyede geçireceği zaman yani toplam proses zamanı (p_i), müşterilerin atölyeye olan uzaklıkları (d) ve her bir müşterinin ne kadar önemli bir müşteri olduğu (z) göz önüne alınarak hesaplanan bir algoritmadır. Böylece, kapsamlı bir değerlendirme yapılarak teslimat sırasının belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Algoritmada öncelikle her bir iş için denklem 5.15'teki formül yardımıyla öncelik endeksi hesaplanmaktadır.

$$I(i) = p_i * d * z \quad (5.15)$$

Denklem 5.15 ile her işin öncelik endeksi hesaplandıktan sonra, her bir parti için işlerin hangi bölgelerde olduğuna bakılır. Ardından, her bir bölgede bulunan işlerin öncelik endekslerinin ortalaması alınarak önce hangi bölgeye gidileceği belirlenir. Gidilecek bölge belirlendikten sonra o bölgedeki işler, öncelik endeksi en düşükten en yükseğe doğru bir sırayla teslim edilir. Çalışmada iki farklı önem algoritması varyantı uygulanmıştır. İkinci varyantta gidilecek bölge belirlendikten sonra o bölgedeki işler, önce öncelik endeksi en düşük olan iş daha sonra da o işe en yakın olan iş şeklinde bir sırayla teslim edilmektedir. Önem algoritmasına ait akış şeması Şekil 5.11’de gösterilmiştir.



Şekil 5.11. Önem algoritması akış şeması.

Örneğin, hepsi aynı partide bulunan 11 adet iş olduğunu varsayalım. Bu işlere ait öncelik endeksleri hesaplanmış olsun. İşlere ait bilgiler Tablo 5.7’de gösterilmiştir.

Tablo 5.7. Önem algoritması örnek bilgiler.

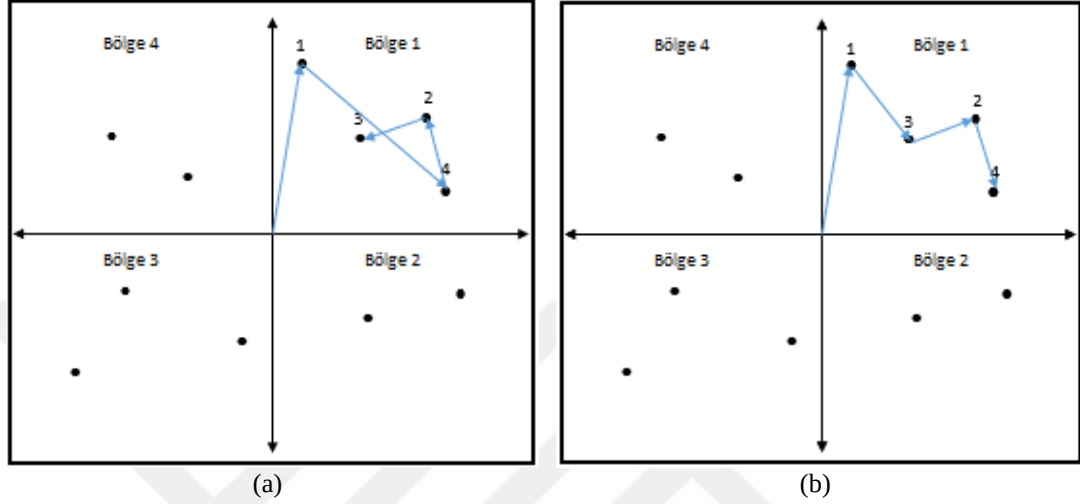
İş	Bölge Numarası	Öncelik Endeksi
1	Bölge 1	14
2	Bölge 1	18
3	Bölge 1	21
4	Bölge 1	16
5	Bölge 2	22
6	Bölge 2	19
7	Bölge 3	23
8	Bölge 3	22
9	Bölge 3	18
10	Bölge 4	20
11	Bölge 4	26

Sıradaki adımda algoritma her bir bölge için öncelik endeksi ortalamalarına bakmaktadır. Tablo 5.7’deki verilere göre Bölge 1’deki işlerin öncelik endeksi ortalaması 17,25 olmaktadır. Bölgelere göre öncelik endeksi ortalamaları Tablo 5.8’de gösterilmektedir.

Tablo 5.8. Bölgelere göre öncelik endeksi ortalamaları.

Bölge	Öncelik Endeksi
Bölge 1	17,25
Bölge 2	20,5
Bölge 3	21
Bölge 4	23

Algoritma Tablo 5.8'deki verilere göre, teslimatın ilk olarak öncelik endeksi en düşük bölge olan Bölge 1'e yapılacağını belirlemektedir. Bölge 1 seçildikten sonra ilk olarak o bölgedeki işlerden öncelik endeksi en düşük iş (1 numaralı iş) önce teslim edilir. Bölge içerisinde kalan işlerin hangi sırada dağıtılacağına ise iki farklı varyant ile karar verilmektedir. Bu varyantlarda teslimatın nasıl yapıldığı Şekil 5.12'de gösterilmiştir.



Şekil 5.12. Teslimat varyantları – (a) öncelik endeksine göre; (b) yakınlığa göre.

Bir bölgede teslim edilmesi gereken işlerin tamamı teslim edildikten sonra, yeni bir bölgeye geçmek için tekrar bölgelerin öncelik endeksi ortalamalarına bakılmaktadır. Bu şekilde tüm işler dağıtılncaya kadar algoritma devam eder.

5.3. Performans Kriteri

Çizelgeleme çalışmalarında çoğu zaman işlerin tamamlanma zamanları minimize edilmeye çalışılır. Bazı çalışmalarda ise amaç, erken tamamlanan ya da geç bitirilen işlerin sayısı gibi bir fonksiyondur. Bu çalışmanın performans kriteri teslimat zamanına bağlı bir fonksiyondur. Bu fonksiyonun içerisinde müşteriye teslim tarihi belirleme aşamasında söz verilen teslim tarihi, varsa geç kalınan süre ve varsa erken tamamlanma süresi bulunmaktadır. Geç kalınan süre denklem 5.16 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$T_j = \max(c_j - d_j, 0) \quad (5.16)$$

Erken tamamlanma süresi ise denklem 5.17 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$E_j = \max (d_j - c_j, 0) \quad (5.17)$$

Herhangi bir sipariş geldiğinde müşteriye bir teslim tarihi verilir. Atölyedeki iş müşteriye teslim edildiğinde, söz verilen teslim tarihi aşılmışsa geç kalınan süre oluşur. Aksine, iş müşteriye söz verilen teslim tarihinden daha erken teslim edilirse bu kez de erken tamamlanma süresi ortaya çıkar. Aşikardır ki, gecikme oluşursa erken tamamlanma, erken tamamlanma oluşursa da gecikme oluşamaz. Dolayısıyla biri varken diğeri 0 olacaktır. Erken tamamlanma süresi ve geç kalınan süre belirlendikten sonra sırasıyla denklem 5.18 ve 5.19 yardımıyla ceza değerleri belirlenmektedir.

$$P_E = w_j * (5 + 4 * (\frac{E}{480})) \quad (5.18)$$

$$P_T = w_j * (10 + 8 * (\frac{T}{480})) \quad (5.19)$$

Denklem 5.18’de E erken tamamlanmayı (earliness) ve denklem 5.19’da T tardiness yani geç tamamlanmayı ifade etmektedir. Erken tamamlanma süresi ve geç kalınan süre dışında müşteriye söz verilen teslim tarihinin de bir ceza değeri bulunmaktadır. Müşterilere çok uzun teslim tarihleri verilmesi, müşterilerin tercihlerini olumsuz anlamda etkileyebilir. Söz verilen teslim tarihinin literatürdeki pek çok modelin aksine çalışmada yer almasının sebebi tam zamanında üretim felsefesine göre işlerin tam zamanında bitirilmesinin arzu edilmesidir (Gordon ve ark., 2002). İşlerin çok erken ya da çok geç tamamlanması bu felsefede istenmemektedir. Bu nedenle, çözüm performansını belirleyen fonksiyonda söz verilen teslim tarihi de yer almaktadır. Bir örnek ile açıklamak gerekirse, müşteriye söz verilen teslim saati 14:00 olsun. Eğer teslimat 15:00’da gerçekleşirse 1 saatlik bir gecikme cezası, 13:00 olursa 1 saatlik erken teslimat cezası oluşur. Söz verilen teslim tarihi ne kadar uzarsa, performans fonksiyonunun değeri de o kadar artar. Problemin yapısı gereği, performans fonksiyonunun değerinin düşük olması daha iyidir. Dolayısıyla, mümkün mertebe sipariş anına yakın zamanlı teslim tarihleri verilmelidir. Söz verilen teslim tarihinin ceza değeri denklem 5.20 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$P_D = w_j * (8 * (\frac{D}{480})) \quad (5.20)$$

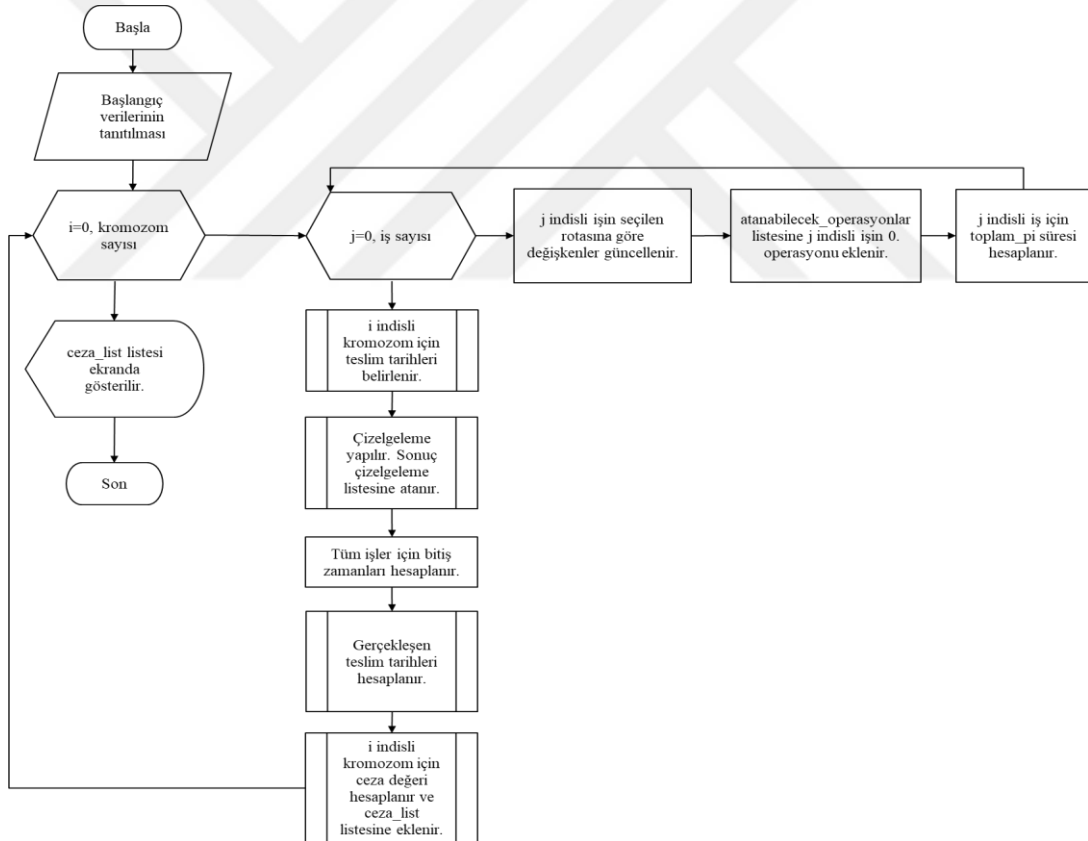
Bir işin toplam cezası (birimi cp), söz verilen teslim tarihine göre cezası, erken tamamlanma cezası ve geç teslim cezasının toplamından oluşmaktadır. Bu durum denklem 5.21’de ifade edilmiştir.

$$P_j = P_D + P_E + P_T \quad (5.21)$$

Bir işin toplam cezası hesaplandıktan sonra bu işlem tüm işler için yapılmaktadır. Çalışmanın performans kriteri tüm işler için hesaplanan cezaların toplamını minimize etmektir. Bu durum denklem 5.22’de gösterilmiştir.

$$Toplam\ Ceza = \sum_{j=1}^n P_j \quad (5.22)$$

Her bir iş için ceza değerlerinin belirlenmesi işlemi ile ilgili akış şeması Şekil 5.13’te sunulmuştur.

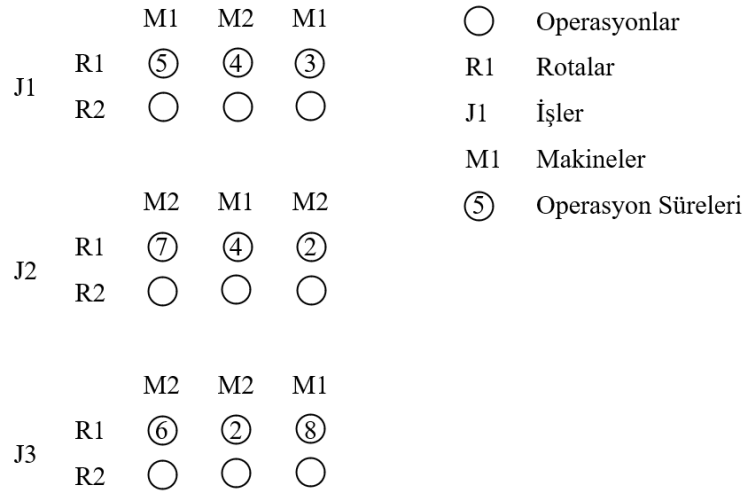


Şekil 5.13. Ceza değerlerinin hesaplanması.

5.4. Mini Atölye Örneği

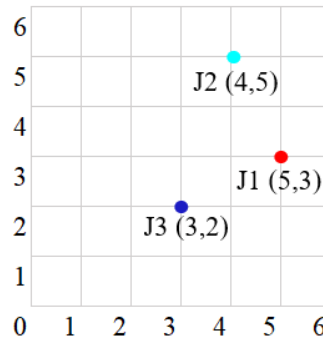
Çalışma kapsamındaki yazılımın doğruluğunu test edebilmek ve aynı zamanda nasıl çalıştığını açıklayabilmek adına küçük bir problem ele alınmıştır. Buna göre bu

problemde 3 adet iş vardır ve her iş 2 farklı rotada gerçekleştirilebilmektedir. Her rotada 3 operasyon bulunmaktadır. Bu operasyonlar 2 farklı makinede yapılabilir. Her iş farklı bir müşteriye ait olduğu için 3 farklı teslimat olacağı düşünülebilir. Bu durum Şekil 5.14'te gösterilmiştir.



Şekil 5.14. Mini atölye notasyonlar.

Problemın çözümü için gereken verilerin bir diğeri ise, teslimat noktalarının konumları ve üretim atölyesine olan uzaklıklarıdır. Bunun belirlenmesi için dik koordinat sisteminde her müşteri için konumlar atanmıştır ve Şekil 5.15'te gösterilmiştir.



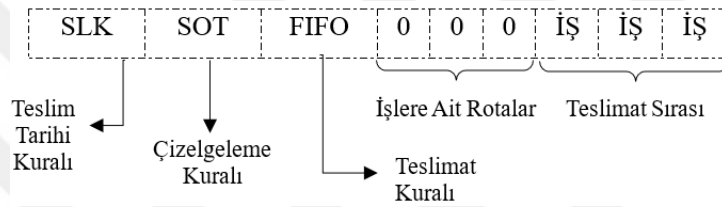
Şekil 5.15. Teslimat noktalarının konumları.

İhtiyaç duyulan bilgilerden bir diğeri ise koordinatlar arası mesafe matrisidir. Bundan dolayı, yukarıdaki şekilden yararlanarak atölye ve müşteriler arası mesafe matrisi hazırlanmıştır. Atölyenin (0;0) noktasında olduğu kabul edilmektedir. Bu matris Tablo 5.9'da gösterildiği gibidir.

Tablo 5.9. Koordinatlar arası mesafe matrisi.

	A	J1	J2	J3
A	-	8	9	5
J1	8	-	3	4
J2	9	3	-	4
J3	5	4	4	-

Şekil 5.5’teki genel kromozom yapısı kullanılarak bu küçük problem için bir kromozom oluşturulmuştur. Bu kromozom ise Şekil 5.16’da gösterilmiştir.



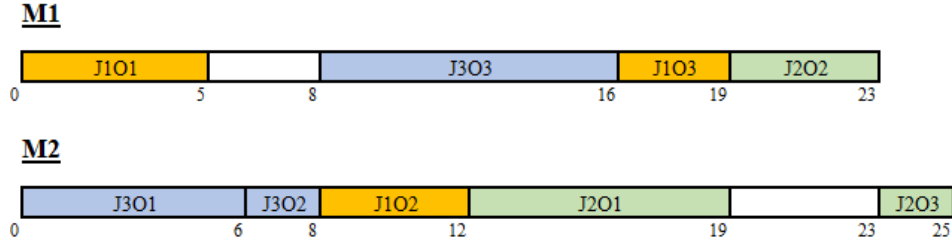
Şekil 5.16. Örnek uygulamaya ait kromozom.

Bu problemde, teslim tarihi kuralı olarak SLK tercih edilmiştir. SLK, teslim tarihlerinin dışarıdan (rastgele ve önceden belirlenmiş) değil, gönderim kuralları ve rota seçimi ile dâhili ve bütünleşik olarak içeriden (üretici tarafından) belirlendiği anlamına gelmektedir. Çizelgeleme kuralı olarak ise SOT (shortest operation time, en kısa operasyon süresi) tercih edilmiştir. Buna göre, işler makinelere atanırken, herhangi bir anda bir makineye atanabilecek işlerden o makinedeki operasyonu en kısa süreli olanın ataması gerçekleştirilmektedir. Teslimat kuralı olarak da FIFO kullanılmıştır. Buna göre, tamamlanan işlerin tesliminde önce ilk biten iş teslim edilmektedir.

İşlere ait rotalara bakıldığında “0 | 0 | 0” görülmektedir. Burada her üç iş için de Rota1’in tercih edileceği ifade edilmektedir. Yazılım dilinde indislerin sıfırdan başlaması gerektiğinden Rota1 için 0, Rota2 için ise 1 gösterimi yapılmaktadır. Teslimat sırası için işlerin bitmesi gerekmektedir. Önce biten işten başlanarak kromozomda sıralama yapılmaktadır. Bu nedenle ilgili yerlerde “İŞ” ifadesi yer almaktadır.

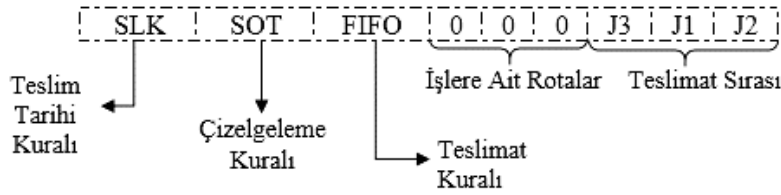
5.4.1. İşlerin çizelgelenmesi

Her üç işe ait operasyonların tamamı makinelere atandığında Şekil 5.17'deki gibi bir Gantt şeması ortaya çıkmaktadır. Çizelgeleme yapılırken SOT kuralından yararlanılmıştır. Buna göre, bir makinarya atanacak iş seçilirken o anda mevcut işlerden o makinedeki operasyon süresi en kısa olan atanmıştır.



Şekil 5.17. Makinalara atanmış işler.

O halde işlerin tamamlanma zamanları sırasıyla, J1, 19 birim; J2, 25 birim ve J3, 16 birim zaman olarak belirlenmiştir. Tamamlanma zamanlarının belirlenmesi, kromozomun son halinin de Şekil 5.18'deki gibi olması anlamına gelmektedir.



Şekil 5.18. Kromozomun son hali.

5.4.2. Araç hareket rotası

İşlerin tamamlanmasının ardından atölyede bekleyen araç ile ürünlerin müşterilere teslimatının gerçekleştirilmesi gerekir. Bu örnekte pratik olması açısından aracın ürünleri teslim ederken her seferinde yalnızca bir ürün aldığı ve onu teslim ettikten sonra tekrar atölyeye dönerek sıradaki ürünü aldığı varsayılmaktadır. FIFO kuralı uygulandığından dolayı, araç önce ilk tamamlanan ürünü yükleyip teslimata gitmektedir. Aracın hareketleri Tablo 5.10'da sunulmuştur.

Tablo 5.10. Teslimata ilişkin zaman-olay çizelgesi.

Aracın Konumu	Zaman	Olay
Atölye	0	
Atölye	16	J3 araca yüklendi.
J3	21	Araç Atölye-J3 arasını 5 birim zamanda aldı.
Atölye	26	Araç geri döndü ve J1'i aldı.
J1	34	Araç Atölye-J1 arasını 8 birim zamanda aldı.
Atölye	42	Araç geri döndü ve J2'yi aldı.
J2	51	Araç Atölye-J2 arasını 9 birim zamanda aldı.
Atölye	60	Araç teslimatları bitirdi ve döndü.

Tablo 5.10'daki olay-zaman çizelgesine göre işlerin teslim edilme zamanları ve diğer zamanlar Tablo 5.11'de gösterilmektedir.

Tablo 5.11. İşlere ait zamanlar.

İş	Proses Zamanları	Tamamlanma Zamanları	Teslim Zamanları
J1	12	19	34
J2	13	25	51
J3	16	16	21

Bu işlemlerin ardından, SLK teslim tarihi kuralına göre, müşterilere söz verilmiş olan teslim tarihlerinin hesaplanması gerekmektedir. Bunun için, ikinci bölümde bahsedilen denklem 2.3'ten yararlanılmaktadır. SLK kuralına göre, işlerin teslim edileceği zamanlar müşterilere söz verilirken, proses zamanlarına belirli bir miktar pay (slack) eklenir. Bu örnekte, mantıklı bir pay ekleyebilmek adına, q_i olarak proses zamanlarının ortalaması ile mesafelerin ortalaması eklenmesine karar verilmiş ve bu durum denklem 5.23, denklem 5.24 ve denklem 5.25'te gösterilmiştir.

$$P_{avg} = \frac{12+13+14}{3} \cong 14 \quad (5.23)$$

$$Mesafelerin\ ortalaması = \frac{8+9+5}{3} \cong 7 \quad (5.24)$$

$$q_i = 14 + 7 = 21 \quad (5.25)$$

q_i değeri 21 çıktığı için, her işin proses zamanına 21 birim pay eklenmiştir. Payların eklenmesinin ardından müşterilere J1, J2 ve J3 için söz verilen teslim tarihleri Tablo 5.12’de gösterilmiştir.

Tablo 5.12. Teslim tarihleri.

İş	Proses Zamanı	SLK	Söz Verilen Teslim Tarihi	Gerçekleşen Teslim Tarihi	Erken / Geç
J1	12	21	33	34	1 G
J2	13	21	34	51	17 G
J3	16	21	37	21	16 E

Söz verilen teslim tarihine göre cezalar gerçekleşmektedir. Bu cezalar entegrasyonun performans kriteridir. Söz verilen teslim tarihinden daha erken teslim edersek de müşteri memnuniyeti sağlanamamıştır. Daha geç teslim etmenin memnuniyetsizlik yaratacağı aşikârdır. Ceza puanı denklem 5.22 yardımı ile hesaplanmaktadır. Ceza puanları Tablo 5.13’teki gibidir.

Tablo 5.13. İşlere ait ceza puanları.

İş	Ceza Puanı
J1	282 cp
J2	418 cp
J3	365 cp
Toplam Ceza	1065 cp

6. DENEYSEL ÇALIŞMA VE ANALİZLER

Bu bölümde, çalışma üzerinde yapılan birtakım analizlerden bahsedilmekte ve bu analizleri gerçekleştirebilmek adına bir atölyenin sonuçlarına değinilmektedir.

6.1. Taguchi Deney Tasarımı

Taguchi metodu, deneysel çalışmalarda yoğunlukla kullanılan ve parametrelerin süreçler üzerindeki etkisinin incelenmesine yarayan bir yöntemdir (Taguchi, 1986). 30 parametreye kadar parametrenin incelenmesi gerçekleştirilebilir. Deney tasarımı, parametrelerin ve bu parametrelere ait seviyelerin tamamının denenmesini gerektirmeden minimum sayıda deneyle optimum çıktının alınması amaçlanmaktadır (Taguchi, 1986).

Çözüm havuzunun tamamını araştırmanın zor olduğu durumlarda, tüm çözüm kümesini aramak yerine problemin ana yapısını ve çıktılarını bozmadan sınırlı sayıda deney yaparak parametrelerin çözüme olan etkileri hakkında bilgi verdiği için son derece kullanışlı bir metottur. Problemden kullanılan parametre ve her parametrenin seviye sayısına göre kullanılması gereken ortogonal diziler Tablo 6.1’de gösterilmiştir.

Tablo 6.1. Taguchi ortogonal dizi seçimi.

Taguchi Ortogonal Dizi		Parametre Sayısı						
		2	3	4	5	6	7	8
Seviye Sayısı	2	L4	L4	L8	L8	L8	L8	L12
	3	L9	L9	L9	L18	L18	L18	L18
	4	L16	L16	L16	L16	L32	L32	L32
	5	L25	L25	L25	L25	L25	L50	L50

Deney tasarımı, kullanıcı probleme uygun bir şekilde hangi parametreleri değerlendirmek istediğini ve her bir parametrenin kaç seviyesinin bulunduğu ile bu seviyelerin değerlerini önceden belirlemektedir. Daha sonra, parametre ve seviye sayısına göre hangi ortogonal dizinin kullanılacağına karar vermektedir. Çalışmada, 3

seviyeden oluşan 4 farklı parametrenin her birinin etkisi incelenmiştir. Taguchi uygulamasında Minitab Statistical Software'den yararlanılmıştır. Sonuçlar sinyal gürültü oranına dayalı olarak incelenmiştir. Taguchi deney tasarımı için kullanılan parametreler ve seviyeleri Tablo 6.2'de gösterilmiştir.

Tablo 6.2. Deney tasarımında kullanılan parametreler ve seviyeleri.

Popülasyon Büyükliği	Çaprazlama Nokta Sayısı	Rassal Arama Oranı	Mutasyon Gen Sayısı	İterasyon Sayısı
6	1	%5	7	167
10	2	%10	10	100
16	3	%15	13	63

Çalışmada kullanılan popülasyonun büyüklüğünün, çaprazlamada kullanılan nokta sayısının, rassal arama oranının ve mutasyona uğrayacak gen sayısının problemi hangi derecede etkilediğinin incelenmesi arzu edilmiştir. Bu kapsamda, normalde her bir kombinasyonu denemek için 3^4 yani 81 adet deney yapmak gerekmektedir. Ancak Taguchi metodu 3 seviyeye sahip 4 parametrelili bir problem için L9 ortogonal diziyi önermektedir. Bu durum aynı işin yalnızca 9 deney ile yapılabileceğini göstermektedir.

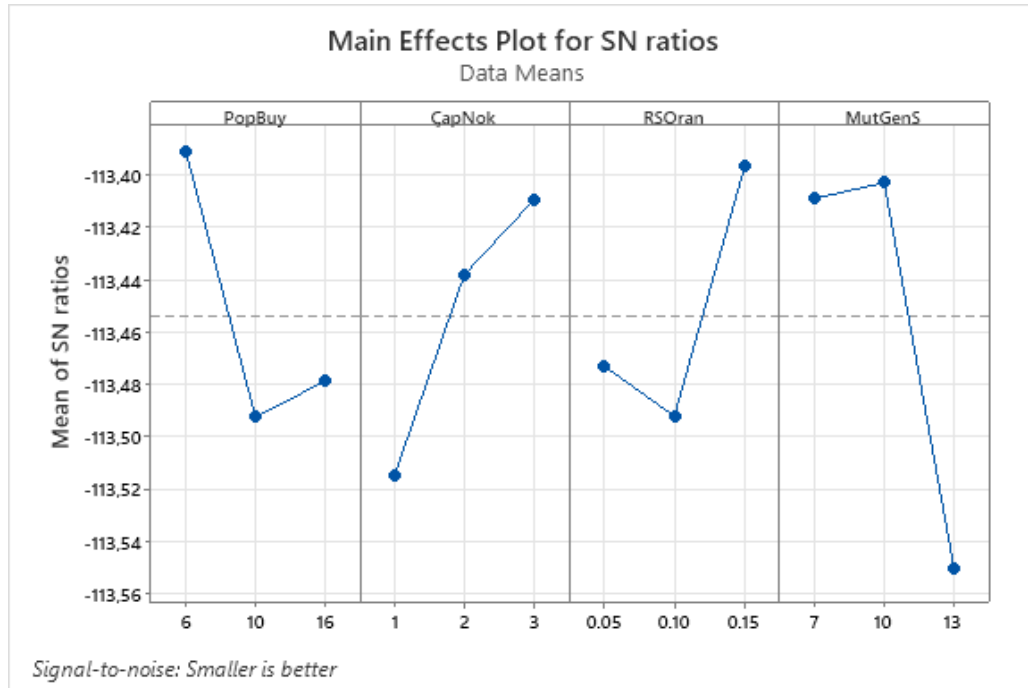
Taguchi yöntemi, daha düşük deneysel maliyet ve zamanda kaliteli çıktı üretmek için parametrelerin ve seviyelerinin mümkün olan en iyi kombinasyonunu sistematik olarak vermektedir (Raza ve ark., 2022). Değerlendirmenin daha doğru olabilmesi adına toplam iterasyon sayısı her 3 seviyede de aynı tutulmuştur.

9 deneyin her biri Minitab programının Taguchi deney tasarımı sekmesinde otomatik olarak oluşturulmaktadır. Uygulama aşamasında, her bir deney için 5 tekrar çalıştırılmıştır ve sonuçları (ceza değerleri) kaydedilmiştir. Deneylere ve sonuçlarına ait bilgiler Tablo 6.3'te gösterilmiştir.

Tablo 6.3. Taguchi deneyleri ve sonuçları.

PopBuy	ÇapNok	RSOran	MutGenS	Sonuç1(cp)	Sonuç2	Sonuç3	Sonuç4	Sonuç5
6	1	0,05	7	461246	478445	480336	461198	463879
6	2	0,10	10	462006	462010	463236	468583	472510
6	3	0,15	13	462017	466127	482565	462317	461274
10	1	0,10	13	484428	487287	493000	479137	473283
10	2	0,15	7	458143	462542	482598	463207	464843
10	3	0,05	10	464062	485606	461948	463934	466986
16	1	0,15	10	470752	479047	464493	463239	469345
16	2	0,05	13	472148	468667	463263	495874	486440
16	3	0,10	7	481104	465255	456803	462042	480364

Değerlendirme aşamasında, sonuçlar yine Minitab programı ile analiz edilmiştir. Sinyal gürültü oranı ile %95 güven aralığında minimum ceza değerlerini veren parametre değerleri çalışmanın tüm atölyelerinde temel değerler olarak alınmıştır. Sinyal gürültü oranına ait grafik Şekil 6.1’de gösterilmektedir.

**Şekil 6.1.** Taguchi sinyal gürültü oranı sonuçları.

Şekil 6.1’deki sonuçlara göre, problem için incelenen 4 parametreden “popülasyon büyüklüğü” için en etkili performansı veren değer 10’dur. “Çaprazlama nokta sayısı” parametresi için 1, “rassal arama oranı” parametresi için 0,1 ve “mutasyona uğrayacak gen sayısı” parametresi için en etkili performansı veren değer 13’tür. Dolayısıyla çalışmanın tüm atölyelerinde 10 kromozomdan oluşan bir popülasyon ele alınmış, tek noktalı çaprazlama yapılmış, rassal arama oranı 0,1’de tutulmuş ve 13 gen mutasyona uğratılmıştır.

6.2. 2 Numaralı Atölye Sonuçları

Problemin çözümünü gerçekleştirmek amacıyla Intel(R) Core(TM) i7-4700HQ işlemciye sahip 2.40GHz ve 16 GB RAM içeren bir bilgisayarda PyCharm IDE kullanılarak Python programlama dilinde bir yazılım programı geliştirilmiştir. NumPy, Matplotlib, random ve math kütüphanelerinden yararlanılmıştır.

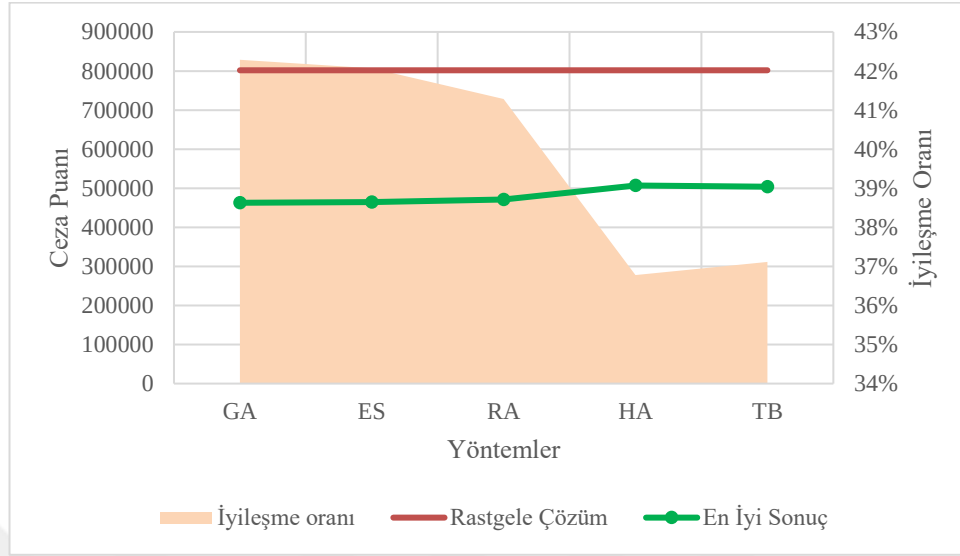
50 iş içeren 2 numaralı atölye çalışmanın sonuçlarını yansıtmaları amacıyla temel alınmıştır. 2 numaralı atölyede önce 10 farklı kuralsız çözüm denenerek ortalaması alınmış ve sonuçları kaydedilmiştir. Ardından, çalışmada kullanılan çözüm yöntemleri kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir. Daha doğru bir değerlendirme ve kıyaslama yapabilmek amacıyla iterasyon sayıları eşit tutulmuştur ve yazılımda kullanılan tüm rassal sayılar sabitlenmiştir. Buna göre elde edilen sonuçlar Tablo 6.4’te gösterilmektedir.

Tablo 6.4. 2 numaralı atölye için en iyi sonuçlar.

Yöntemler	GA	ES	RA	HA	TB
Kuralsız Çözüm	801806,4 cp				
En İyi Sonuç (cp)	462744,4	464487,2	470772,0	506922,8	504247,2
İyileşme Oranı	%42,29	%42,07	%41,29	%36,78	%37,11

Her bir çözüm yöntemi için farklı bir kuralsız çözüm kullanmak yanıltıcı değerlendirmelere sebebiyet verebileceği gibi, hangi yöntemin daha başarılı sonuçlar elde ettiği hakkında da bir fikir vermeyecektir. Bu nedenle değerlendirmede aynı kuralsız çözüm sonucu ele alınmıştır. Kuralsız çözüm, entegre olmayan bir atölyenin 10 kez çalıştırılıp sonuçlarının ortalaması alınarak elde edilmiştir. Sonuçlar, en yüksek

iyileşme oranının genetik algoritma ile sağlandığını göstermektedir. Sonuçlara ait grafiksel gösterim Şekil 6.2’de sunulmuştur.



Şekil 6.2. 2 numaralı atölye sonuçları.

Yaklaşık yüzde 43’lük bir iyileşme oranı ile GA entegre çözümün kuralı bir çözüme göre neredeyse 2 kat iyileştirme sağladığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte evrimsel strateji de %42,07 ile GA’ya yakın bir iyileştirme sağlamıştır. Rassal arama yüzde 41, tavlama benzetimi yüzde 37,11 ve son olarak hibrit arama ise yüzde 36,78’lik bir iyileştirme sağlamıştır. Asıl görünen şudur ki, fonksiyonların entegre edilerek sezgisel algoritmalar ile çözülmesi rastgele bir dağıtıma kıyasla çok ciddi oranda bir iyileştirme yapmıştır.

6.3. Duyarlılık Analizi

2 numaralı atölyede en iyi sonuç genetik algoritma yöntemi ile elde edilmiştir. Bu bölümde çalışmada elde edilen en iyi sonuç üzerinde birtakım değişiklikler yapılarak, bu değişikliklerin sonuca olan etkisi incelenmiştir. Bu sayede, kuralların hangisi ya da hangilerinin sonucu belirlemede daha önemli olduğu analiz edilmiştir.

2 numaralı atölye için ortaya çıkan en iyi sonuçlar ve bu sonuçları sağlayan kromozomlar Tablo 6.5’te gösterildiği gibidir.

Tablo 6.5. En iyi sonuçlar ve kromozomlar.

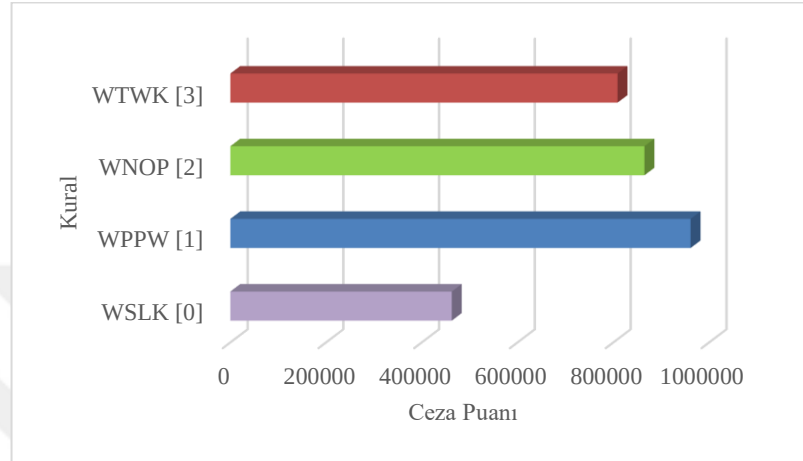
GA	En İyi Sonuç	462744,4 cp
	Kromozom	[0, 8, 3, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0]
TB	En İyi Sonuç	504247,2 cp
	Kromozom	[0, 6, 3, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0]
ES	En İyi Sonuç	464487,2 cp
	Kromozom	[0, 8, 3, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1]
HA	En İyi Sonuç	506922,8 cp
	Kromozom	[0, 6, 7, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 0]
RA	En İyi Sonuç	470772,0 cp
	Kromozom	[0, 2, 3, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1]

Yukarıdaki tabloda yer alan kromozomlar üzerinde teslim tarihi belirleme, çizelgeleme ve teslimat kurallarının değiştirilmesinin sonucu nasıl etkilediğini görebilmek amacıyla, sırasıyla her bir kromozomda kural numaraları değiştirilmiştir. Kromozomların ilk hanesinin teslim tarihi, ikinci hanesinin çizelgeleme ve üçüncü hanesininse teslimat yöntemlerini temsil ettiği daha önceden belirtilmişti. Buna göre, örneğin GA ile gelen en iyi kromozomun ilk hanesindeki “0” değeri WSLK’ya karşılık gelmektedir. Diğer değerler denenmiş ve sonuçları Tablo 6.6’da sunulmuştur.

Tablo 6.6. Teslim tarihi belirleme kuralları analizi.

Kurallar	GA (cp)	TB (cp)	ES (cp)	HA (cp)	RA (cp)
WSLK [0]	462744,4	504247,2	464487,2	506922,8	470772,0
WPPW [1]	961279,3	944582,6	966147,6	942940,4	967766,2
WNOP [2]	864993,2	850116,0	868822,8	846068,4	870409,6
WTWK [3]	808833,2	799808,1	812662,8	793555,7	814249,6

Açıkça görülebileceği üzere, hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın teslim tarihi belirleme kuralları içerisinde en iyi sonucu WSLK vermektedir. Beş çözüm yönteminde de en iyi kromozomda yer aldığı gibi, duyarlılık analizinde diğer kurallara göre 2 kata yakın iyileştirme sağladığı da görülmektedir. WPPW kuralı ise genellikle en kötü sonucu veren teslim tarihi belirleme kuralı olarak göze çarpmaktadır. Bu durum Şekil 6.3'te gösterilmiştir.



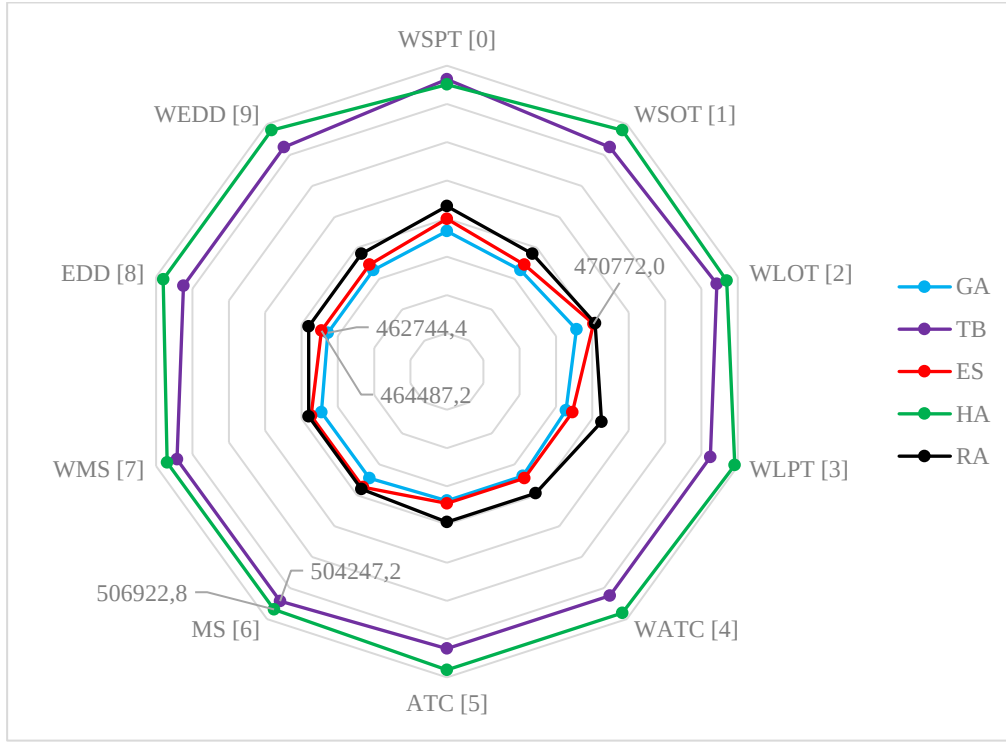
Şekil 6.3. Teslim tarihi belirleme kuralları duyarlılık analizi.

Çizelgeleme için 10 farklı kural ile çalışılmıştır. En iyi kromozomlara göre duyarlılık analizi değerlendirilmesine ilişkin sonuçlar Tablo 6.7’de sunulmuştur.

Tablo 6.7. Çizelgeleme kuralları analizi.

Kurallar	GA (cp)	TB (cp)	ES (cp)	HA (cp)	RA (cp)
WSPT [0]	466706,6	506431,6	469933,2	505042,8	473236,0
WSOT [1]	462744,4	502487,2	464487,2	508050,8	468025,4
WLOT [2]	465614,6	504247,2	470309,2	506922,8	470772,0
WLPT [3]	462744,4	502487,2	464487,2	509178,8	472532,0
WATC [4]	463800,4	502487,2	464487,2	508050,8	469385,4
ATC [5]	463800,4	502487,2	464487,2	508050,8	469385,4
MS [6]	464522,6	504247,2	467365,8	506922,8	468025,4
WMS [7]	464522,6	504247,2	467365,8	506922,8	468025,4
EDD [8]	462744,4	502487,2	464487,2	508050,8	468025,4
WEDD [9]	462744,4	502487,2	464487,2	508050,8	468025,4

Çizelgeleme kurallarında çözüm yöntemine göre farklı kurallar ön plana çıkmaktadır. Örneğin, GA ve ES sonucunda ortaya çıkan en iyi kromozomdaki çizelgeleme kuralı EDD (en erken teslim tarihi) olarak ortaya çıkmıştır. TB ve HA yöntemlerinde en iyi kromozomda MS (minimum slack) kuralı öne çıkmıştır. Rassal arama yönteminde ise WLOT kuralı en iyi kromozomda yer almaktadır. Sonuçların grafiksel gösterimi Şekil 6.4'te sunulmuştur.



Şekil 6.4. Çizelgeleme kuralları duyarlılık analizi.

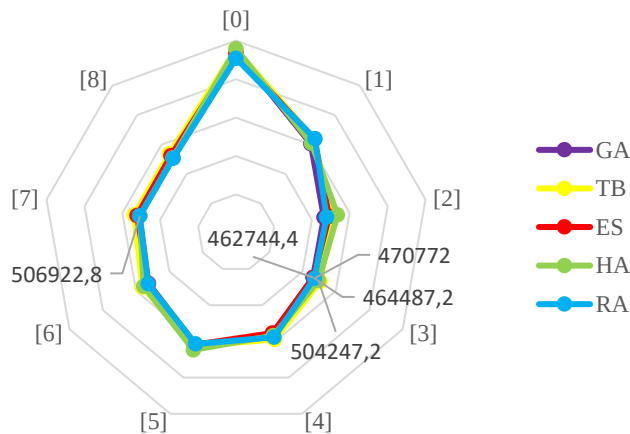
Duyarlılık analizinin çizelgeleme kurallarına uygulanması sırasında bazı yöntemlerde en iyi kromozomdaki kuraldan daha iyi sonuç veren kurallar olduğu tespit edilmiştir. Örneğin, TB’de en iyi kromozomdaki kurala göre %0,35, HA’da %0,37 ve RA’da %0,58 oranında daha iyi sonuç veren kurallar göze çarpmaktadır. Bu durum, mevcutta 100 olan iterasyon sayısı ile bazen çözüm uzayının daha iyi sonuç veren bölgelerine uğranamayabileceği anlamına gelmektedir. İterasyon sayısı 1000 gibi bir değere çıkarıldığında benzer durumların olma ihtimali oldukça azalabilir.

Teslimat kuralları için duyarlılık analizinde genellikle aynı kuralların farklı yöntemlerde yakın sonuçlar aldıkları göze çarpmaktadır. Teslimat kurallarının duyarlılık analizine ilişkin sonuçlar Tablo 6.8’de sunulmuştur.

Tablo 6.8. Teslimat kuralları analizi.

Kurallar	GA (cp)	TB (cp)	ES (cp)	HA (cp)	RA (cp)
Tekli teslimat [0]	946355,8	953612,0	930892,0	957308,0	907878,2
Partili teslimat [1]	605332,4	634703,6	632697,2	609954,8	638962,8
En yakın komşu [2]	463915,4	505905,2	490915,0	535735,0	477863,0
Tasarruf algoritması [3]	462744,4	504247,2	464487,2	494586,0	470772,0
Süpürme algoritması [4]	559516,4	589087,2	553585,2	568372,2	576292,2
Random teslimat [5]	630550,6	625279,2	617485,8	646518,8	613822,8
Hibrit teslimat [6]	526400,4	560527,0	524447,2	554131,4	527181,4
Önem algoritması 1 [7]	509136,4	537799,6	522287,2	506922,8	509000,0
Önem algoritması 2 [8]	509136,4	537799,6	525119,2	509728,2	506517,4

Sonuçlar içerisinde ilk göze çarpan, teslimat kuralları içerisinde tasarruf algoritmasının, her yöntemde en iyi sonucu vermiş olduğudur. Bu durum tasarruf algoritmasının yapısı gereği başta minimum tasarruflu iş çiftini ele almasından kaynaklanıyor olabilir. Bununla birlikte, HA yönteminde en iyi kromozomun getirdiği önem algoritmasının birinci versiyonuna göre tasarruf algoritması %2,43 oranında daha iyi bir çözüm sunmaktadır. Her durumda, iterasyon sayısı artırıldıkça sonuçların en iyiye daha yakınsayacağı beklenir. Sonuçların grafiksel gösterimi Şekil 6.5'te gösterilmektedir.

**Şekil 6.5.** Teslimat kuralları duyarlılık analizi.



7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmanın bu bölümünde problemde yer alan 4 atölyenin tamamına ait sonuçlar gösterilmiştir. Her bir atölye için GA, TB, ES, RA ve HA algoritmaları kullanılarak üretilmiş sonuçlar incelenmiştir. Literatürde bu problem ile ilgili herhangi bir standart test verisi gibi bir veriye ulaşamadığı için başka problemler ile karşılaştırma olanağı olmamıştır. Ancak, problemde yer alan 4 fonksiyonun entegrasyonunun katkılarını görebilmek için hiçbir entegrasyon olmayan bir atölye hazırlanarak (SIRO-RDM), entegre edilmiş 4 atölye ile karşılaştırılmıştır.

Çalışmada 4 farklı atölye vardır ve her birinde sırasıyla 25, 50, 75 ve 100 müşteriye ait işler bulunmaktadır. Her bir atölyedeki müşterilerin konumları, işlerin proses zamanları, işlerin işlem gördükleri makineler ve rotaları birbirinden farklıdır. Bununla birlikte, entegre olmayan atölyeleri temsilen bazı sonuçlar üretilmiştir. Bunlar Tablo 7.1’de sunulduğu haliyledir.

Tablo 7.1. Entegrasyon seviyeleri.

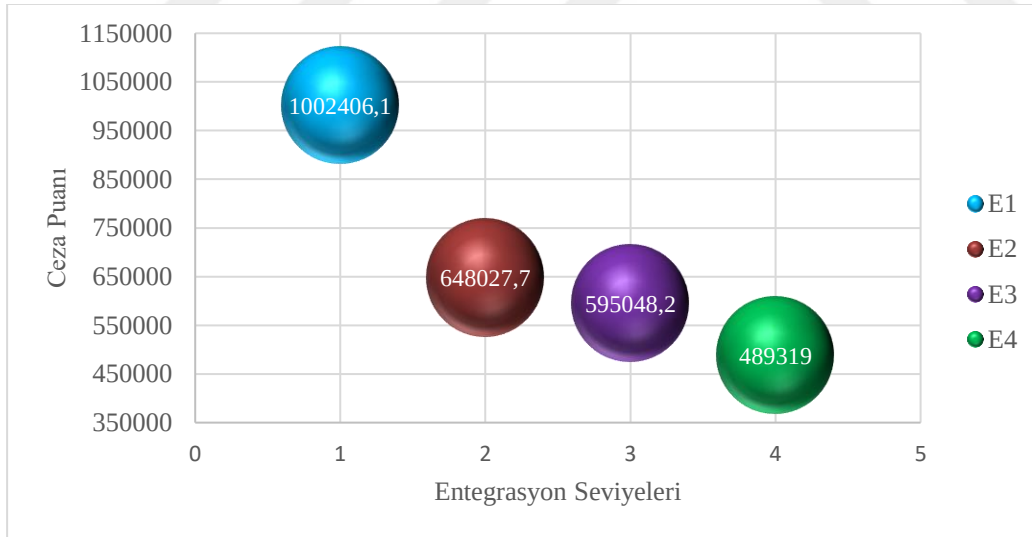
Entegrasyon Seviyesi	Teslim Tarihi Belirleme	Çizelgeleme	Teslimat
E1	Kuralsız (RDM)	Kuralsız (SIRO)	Kuralsız
E2	Kuralsız (RDM)	Kuralsız (SIRO)	Kurallı
E3	Kurallı	Kurallı	Kuralsız
E4	Kurallı	Kurallı	Kurallı

Entegrasyon seviyelerinin performansı 50 iş içeren 2 numaralı atölye baz alınarak incelenmiştir. Entegrasyon seviyelerine ait kromozomların öncelikle standart çözümleri incelenerek ham performansları belirlenmiştir. Ardından aynı kromozomlar GA ile çalıştırılarak genetik algoritmanın performans üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu sonuçlar Tablo 7.2’de sunulmuştur.

Tablo 7.2. Entegrasyon seviyelerinin performansı.

Entegrasyon Seviyesi	Ham Performans	GA Performans	İyileşme Oranı
E1	1002406,1 cp	492424,4 cp	%51
E2	648027,7 cp	498537,4 cp	%23
E3	595048,2 cp	503735,0 cp	%15
E4	489319,0 cp	473841,2 cp	%3

Görüldüğü üzere entegrasyon seviyelerinin tamamında GA etkili bir çözüm sunmaktadır. Her fonksiyonun kuralsız davrandığı SIRO-RDM (E1) entegrasyon seviyesinde GA %51’lik iyileştirme sağlamıştır. Herhangi bir kuralsız fonksiyon içermeyen E4 entegrasyon seviyesinde yine genetik algoritma az da olsa iyileştirme yakalamıştır. İterasyon sayısının artırılması durumunda bu oranın da yükselmesi beklenebilir. Entegrasyon seviyesi arttıkça problemin daha iyi çözümlere ulaşabildiği açıktır. Entegrasyon seviyelerinin değişmesi durumu ise Şekil 7.1’de gösterilmektedir.

**Şekil 7.1.** Entegrasyon seviyelerinin karşılaştırılması.

Entegrasyon seviyelerinin karşılaştırılmasında, seviye arttıkça yani çözümde çizelgeleme, teslim tarihi belirleme ve teslimat kuralları konuldukça, kuralsız ve rastgele yapılara göre daha iyi sonuçlar alındığı gözlemlenmiştir ve en yüksek entegrasyon seviyesinin (E4) diğer seviyelere göre daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Örneğin, Tablo 7.3’ten de görülebileceği gibi, E2 entegrasyon

seviyesinde, SIRO-RDM (E1) entegrasyon seviyesine göre yüzde 35’lik bir iyileştirme gözlemlenmiştir. Bu durum, yalnızca teslimatı bile kurallı bir şekilde entegre etmenin, problemin çözümüne yaptığı ciddi etkiyi göstermektedir. Teslimatın kuralsız olduğu, teslim tarihi belirleme ve çizelgeleme fonksiyonlarının kuralları ile çalıştırıldığı E3 entegrasyon seviyesinde ise yine E1’e göre yüzde 41, E2’ye oranla ise yüzde 8’lik bir iyileştirme sağlanmıştır.

Tablo 7.3. Entegrasyon seviyeleri iyileştirmeler.

Entegrasyon Seviyesi	E2	E3	E4
E1	%35	%41	%51
E2		%8	%24
E3			%18

Tüm fonksiyonların kurallı bir şekilde çalıştırıldığı en yüksek entegrasyon seviyesinde en küçük iyileşmenin bile %18 oranında olduğu tespit edilmektedir. E1 ve E2 seviyeleri ile E3 ve E4 seviyeleri ayrı ayrı değerlendirilirse, teslimat fonksiyonunu kurallı ya da kuralsız yapmanın etkisi daha iyi anlaşılabilir. Tüm fonksiyonlar kuralsız iken (E1) yalnızca teslimat fonksiyonunu kurallarla eklemek (E2) performansı yüzde 35 oranında daha iyi yapmaktadır. Benzer şekilde, tüm fonksiyonlar kurallı olduğu durum (E4), yalnızca teslimatın kuralsız olmasına göre (E3) yüzde 18 daha iyi performans göstermiştir. Bu sonuçlar, teslimat fonksiyonunu sisteme entegre etmenin global çözümde çok daha iyi ve verimli sonuçlar vereceğini açıkça ortaya koymaktadır.

Entegrasyon seviyeleri arasındaki iyileşmeler, teslimat fonksiyonunun etkisinin yanında, fonksiyonların her birinde müşteri önemini de göz önüne almanın etkisini göstermektedir. Örneğin, E1 entegrasyon seviyesinde müşterilerin herhangi bir önemi olmadan tamamen kuralsız bir şekilde teslim tarihleri verilmekte, çizelgeleme yaparken işlerin önem dereceleri hesaba katılmamakta ve teslimat da yine müşteri önemi göz ardı edilerek tamamlanmaktadır. Dolayısıyla, müşteri önemini göz önüne alan kurallar entegrasyona dahil edildiğinde global çözümün önemli oranda iyileştiği de görülmektedir. E1 entegrasyon seviyesinden E2 entegrasyon seviyesine geçerken eklenen teslimat kurallarının ayrı ayrı performansları Tablo 7.4’te gösterilmektedir.

Tablo 7.4. SIRO-RDM için teslimat kurallarının performansları.

Entegrasyon Seviyesi	Teslimat Kuralı	Ham Performans	İyileşme Oranı
SIRO-RDM (1002406,1)	En yakın komşu [2]	696268,0 cp	%31
	Tasarruf algoritması [3]	648027,7 cp	%35
	Süpürme algoritması [4]	726108,0 cp	%28
	Hibrit teslimat [6]	712124,0 cp	%29
	Önem algoritması 1 [7]	675953,0 cp	%33
	Önem algoritması 2 [8]	659932,1 cp	%34

Teslimat kurallarını rastgele bir sisteme entegre etmenin performansta en az yüzde 28 en çok ise yüzde 35 oranında iyileştirme sağladığı gözlemlenmektedir. Teslimat kuralları arasında en iyi sonucu tasarruf algoritması vermektedir. Önem algoritmasının ikinci versiyonu olan yakınlığa bağlı varyant ise en iyi iyileşmeyi sağlayan ikinci teslimat algoritması olmuştur.

Çalışmada ele alınan dört atölyede sırasıyla 25, 50, 75 ve 100 iş bulunmaktadır. Her iş farklı bir müşteriye temsil etmektedir. Dört atölyenin her biri beş farklı çözüm yöntemi kullanılarak çözülmüş ve performanslarına ait sonuçlar Tablo 7.5'te gösterilmiştir.

Tablo 7.5. Atölyelere ait sonuçlar.

Yöntemler	1. Atölye	2. Atölye	3. Atölye	4. Atölye
GA	62748,4 cp	462744,4 cp	1107161,0 cp	1706792,6 cp
ES	53160,3 cp	464487,2 cp	1144144,2 cp	1715942,0 cp
RA	54494,1 cp	470772,0 cp	1133581,0 cp	1611301,0 cp
HA	54346,0 cp	506922,8 cp	1133581,0 cp	1642216,0 cp
TB	54640,1 cp	504247,2 cp	1203021,8 cp	1807164,6 cp

Sonuçlara göre, dört atölyenin ikisinde genetik algoritma en iyi performansı göstermiştir. Evrimsel strateji 1. atölyede ve rassal arama algoritması da 4. atölyede

en iyi global çözüme ulaşan algoritmalar olmuştur. İş sayısı arttıkça GA'nın daha iyi sonuçlar elde etmeye başlaması da elde edilen sonuçlardan biridir. Örneğin, 25 iş içeren 1. atölyede performans açısından evrimsel stratejinin arkasında kalırken, 50 iş içeren 2. atölyede %0,4 daha iyi bir sonuç elde etmiştir. İş sayısı 75 olduğunda ise GA, en yakın diğer algoritma ile olan farkı %2,3 seviyesine çıkarmıştır. Bu da iş sayısı arttıkça performansının iyileştiğini ifade etmektedir. 100 işten oluşan 4. atölyede ise sonuç farklıdır. Bunun ana sebebi, iterasyon sayısının azlığı olabilir. 100 işten oluşan büyük bir problemin çözümünde, oldukça geniş olan çözüm uzayını 100 iterasyonda taramanın sonuçların verimini düşürebileceği kanısına varılmıştır. Bunu incelemek için, aynı verilerle 4. atölyenin 4000 iterasyon çalıştırılması incelenmiştir. Buna ait sonuçlar Tablo 7.6'da gösterilmiştir.

Tablo 7.6. 4 nolu atölye 4000 iterasyon.

Yöntemler	4. Atölye
GA	1607052,2 cp
ES	1715942,0 cp
RA	1611301,0 cp
HA	1595653,0 cp
TB	1665873,4 cp

Görüldüğü üzere, iterasyon sayısının artırılması GA'nın performansını diğer algoritmalarla göre önemli oranda artırmıştır. İş sayısının artması daha geniş bir çözüm uzayı oluşturduğu için bu uzayı daha derinlemesine incelemek global çözümü olumlu etkilemektedir. Atölyelerin ve entegrasyon seviyelerinin tamamının GA ile gerçekleştirdikleri performanslara ait bilgiler Tablo 7.7'de gösterilmiştir.

Entegrasyon seviyelerinin tümünde 50 işten oluşan yapı kullanıldığı için entegrasyon seviyelerini 2. atölye ile karşılaştırmak daha doğru olacaktır. 2 numaralı entegre atölyenin tüm entegrasyon seviyelerinden daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca, entegrasyon seviyeleri açısından, ham performans ne kadar kötü ise çözümün iyileşme oranının o kadar yüksek olduğu gözlemlenmektedir.

Tablo 7.7. Performans karşılaştırma.

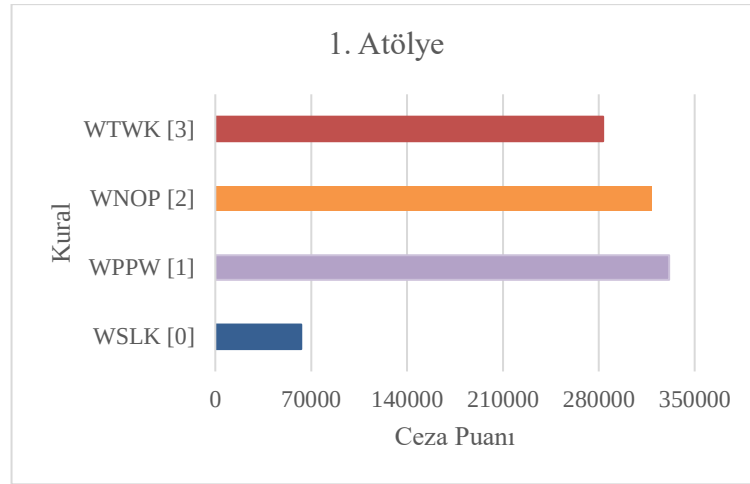
Atölye	GA Performansı
E1	492424,4 cp
E2	498537,4 cp
E3	503735,0 cp
E4	473841,2 cp
1. Atölye	62748,4 cp
2. Atölye	462744,4 cp
3. Atölye	1107161,0 cp
4. Atölye	1706792,6 cp

Dört atölyenin her birinde GA ile en iyi performansı veren kromozomlar ele alınarak, bu kromozomlar üzerinden teslim tarihi belirleme, çizelgeleme ve teslimat kurallarının performansları sırasıyla aşağıdaki Tablo 7.8, Tablo 7.9 ve Tablo 7.10’da incelenmiştir.

Tablo 7.8. En iyi kromozomda teslim tarihi kuralları analizi.

Kurallar	1. Atölye	2. Atölye	3. Atölye	4. Atölye
WSLK [0]	62748,4 cp	462744,4 cp	1107161,0 cp	1706792,6 cp
WPPW [1]	331347,6 cp	961279,3 cp	1389143,7 cp	2252548,3 cp
WNOP [2]	318997,8 cp	864993,2 cp	1302128,7 cp	2065005,3 cp
WTWK [3]	283177,8 cp	808833,2 cp	1259172,0 cp	1986143,2 cp

Teslim tarihi belirleme kurallarında dört atölyede de WSLK kuralının bariz bir üstünlüğü göze çarpmaktadır. Tüm atölyelerde GA ile en iyi sonucu veren kromozomlarda teslim tarihi belirleme kuralı WSLK olmuştur. 1. atölyeye ait sonuçların grafiksel ifadesi Şekil 7.2’de gösterilmektedir.



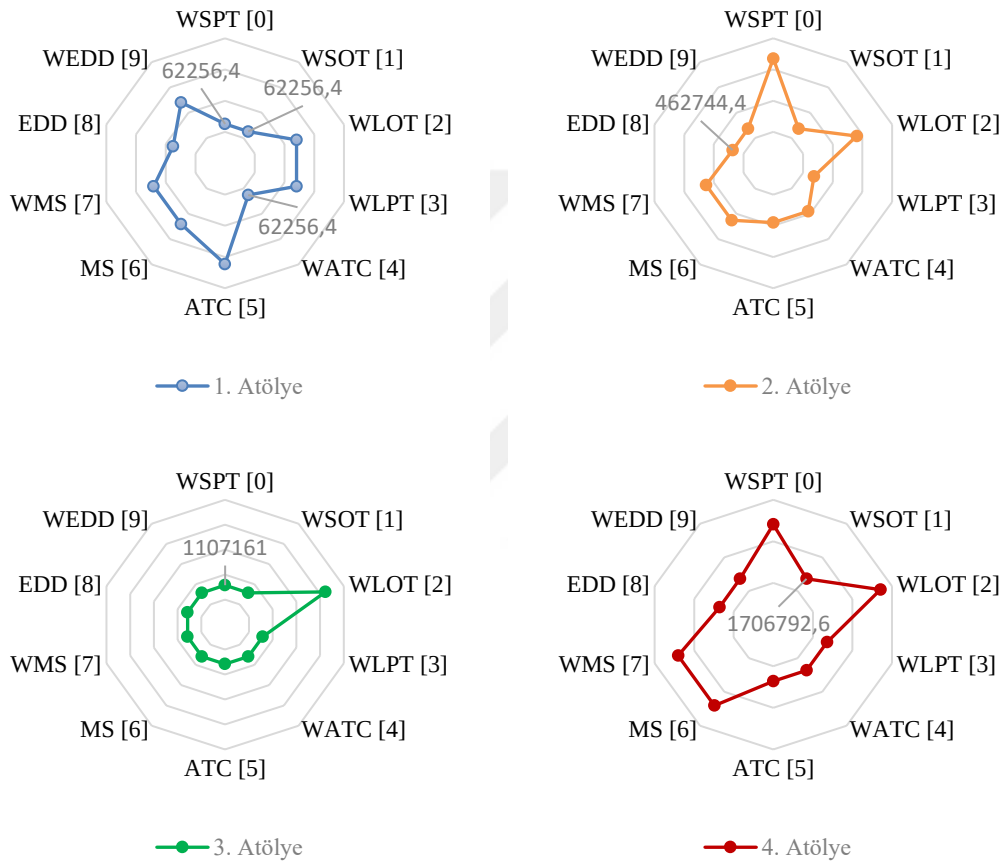
Şekil 7.2. Teslim tarihi kurallarının performansları.

WSLK kuralı 1. atölyede de diğer atölyelerde olduğu gibi çok ciddi oranla en iyi sonucu veren teslim tarihi belirleme kuralı olmuştur. Şekilden de görülebileceği gibi WSLK ile alınan global çözüm, diğer kurallara oranla neredeyse 5 kat daha iyi performans göstermiştir. Diğer atölyelerde de durum buna benzer şekildedir. Yine de iş sayısı arttıkça aradaki oranın düşüşe geçtiği gözlemlenmiştir. Çizelgeleme kurallarının analizi Tablo 7.9’da gösterilmiştir.

Tablo 7.9. En iyi kromozomda çizelgeleme kuralları analizi.

Kurallar/Yöntemler	1. Atölye	2. Atölye	3. Atölye	4. Atölye
WSPT [0]	62256,4 cp	466706,6 cp	1107161,0 cp	1712032,8 cp
WSOT [1]	62256,4 cp	462744,4 cp	1107161,0 cp	1706792,6 cp
WLOT [2]	63404,4 cp	465614,6 cp	1112453,0 cp	1713536,8 cp
WLPT [3]	63404,4 cp	462744,4 cp	1107161,0 cp	1706792,6 cp
WATC [4]	62256,4 cp	463800,4 cp	1107161,0 cp	1706792,6 cp
ATC [5]	64224,4 cp	463800,4 cp	1107161,0 cp	1706792,6 cp
MS [6]	63404,4 cp	464522,6 cp	1107161,0 cp	1712032,8 cp
WMS [7]	63404,4 cp	464522,6 cp	1107161,0 cp	1712032,8 cp
EDD [8]	62748,4 cp	462744,4 cp	1107161,0 cp	1706792,6 cp
WEDD [9]	63404,4 cp	462744,4 cp	1107161,0 cp	1706792,6 cp

Çizelgeleme kurallarında bir kuralın önemli bir baskınlığına rastlanmamıştır. Atölyeden atölyeye en iyi sonucu veren kromozomdaki çizelgeleme kuralı farklılık göstermektedir. 1. atölyede ve 2. atölyede EDD (en erken teslim tarihine sahip iş öncelikli) kuralı, 3. atölyede WSPT (ağırlıklı en kısa işlem süresine sahip iş öncelikli) kuralı ve 4. atölyede WSOT (ağırlıklı en kısa mevcut operasyon süresine sahip iş öncelikli) kuralı öne çıkmaktadır. Çizelgeleme kurallarının atölye bazlı detaylı gösterimi Şekil 7.3'teki gibidir.



Şekil 7.3. Atölye bazlı çizelgeleme kuralları performansı.

En iyi sonucu veren kromozomdaki çizelgeleme kuralının değiştirilmesi sonucunda, 1. atölyede kuralın ATC olması sonuca en kötü etkiyi yapmaktadır. Aynı kromozomun çizelgeleme kuralı WLOT, WLPT, MS, WMS ve WEDD kuralları ile değiştirildiğinde de ATC kadar olmasa da yine EDD'den daha kötü sonuçlara ulaşılmaktadır. Burada, daha kötü sonuçların kuralların yapılarından kaynaklı olduğu değerlendirilebilir. Örneğin, WLPT ve WLOT de işler atanırken, en uzun toplam işlem süresi ve en uzun mevcut operasyon süresi olan işlere öncelik verilmesinin global çözümü

daha kötüleştirmesi beklenebilir ancak problemin büyüklüğü, rassallık içermesi ve karmaşık yapısı bunu kesin olarak söylemeyi engelleyebilir.

2. atölyede en iyi sonucu veren kromozomdaki çizelgeleme kuralını WSPT yapmak en iyi sonuçtan en çok uzaklaşmayı beraberinde getirmiştir. Burada, mevcut en iyi sonucu veren kromozomun sadece bir geninin (çizelgeleme geni) değiştirilmesi ile alınan sonuçlar baz alındığı için ilgili kuralın yalnızca tek bir kromozomu ne kadar etkilediği analiz edilmektedir. Dolayısıyla, farklı iterasyon sayıları ya da farklı rastgeleliklerde kuralların verdikleri sonuçlar değişkenlik gösterebilir. Aynı sebeple, bazen en iyi kromozomdaki bir kuralı değiştirmek en iyi kromozomdan daha iyi bir sonuca ulaşılmasını da sağlayabilmektedir. Çözüm uzayındaki daha iyi bir noktaya bazen iterasyon sayısının azlığı, bazen yerel optimumda oyalanma bazen de problemin ya da kuralın yapısı nedeniyle uğranamayabilir.

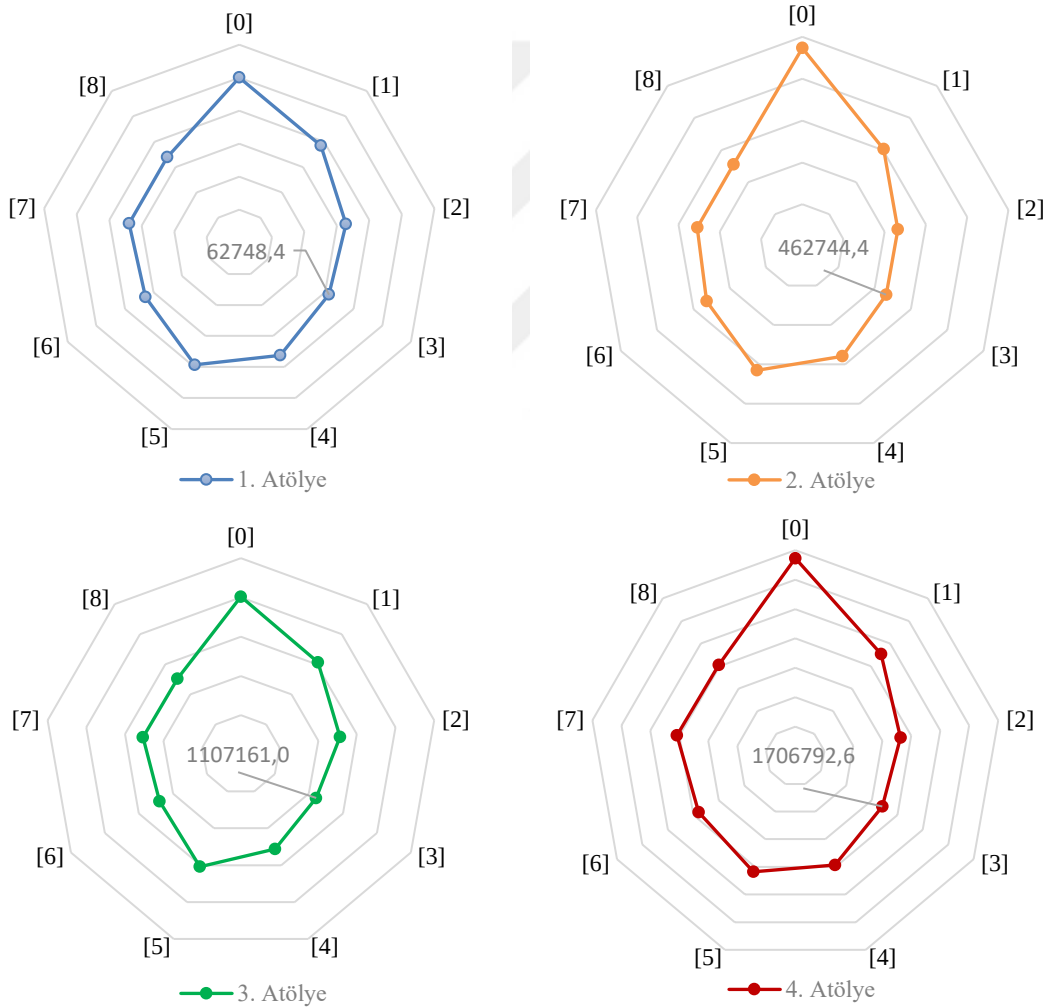
3. atölyede WLOT hariç diğer kuralların hepsinde aynı global çözüme ulaşılmıştır. Çizelgeleme kuralının değişmesi en iyi sonucu veren kromozomdan daha iyi bir sonuç alınmasında etkili olmamıştır. Bunun sebebi, GA için iterasyon sayısının yetersiz kalması olabileceği gibi, problem karmaşıklıkça kurallar arası geçirgenliğin azalması da olabilir.

4. atölyede WLOT kuralı global çözümden en büyük sapmayı gösteren kural olmuştur. WSOT kuralından daha iyi sonuç veren bir çizelgeleme kuralı olmamıştır. Kuralların değişmesi ile global çözümden çok ciddi oranda bir sapma ile karşılaşılmamıştır. En iyi kromozom için teslimat kurallarına ait sonuçlar ise Tablo 7.10'da gösterilmektedir.

Tablo 7.10. En iyi kromozomda teslimat kuralları analizi.

Kurallar/Yöntemler	1. Atölye	2. Atölye	3. Atölye	4. Atölye
Tekli teslimat [0]	100091,1 cp	946355,8 cp	2010327,6 cp	3364192,0 cp
Partili teslimat [1]	76839,1 cp	605332,4 cp	1530592,0 cp	2268195,6 cp
En yakın komşu [2]	65621,7 cp	463915,4 cp	1281968,8 cp	1814371,0 cp
Tasarruf algoritması [3]	62748,4 cp	462744,4 cp	1107161,0 cp	1706792,6 cp
Süpürme algoritması [4]	72583,2 cp	559516,4 cp	1279739,0 cp	1968475,4 cp
Random teslimat [5]	78584,7 cp	630550,6 cp	1521432,0 cp	2089191,4 cp
Hibrit teslimat [6]	65639,2 cp	526400,4 cp	1194931,0 cp	1898768,8 cp
Önem algoritması 1 [7]	67762,8 cp	509136,4 cp	1266283,0 cp	2041739,6 cp
Önem algoritması 2 [8]	67762,8 cp	509136,4 cp	1257995,0 cp	2024923,6 cp

Teslimat kuralları analizinde tüm atölyelerde en iyi sonucu veren kromozomlarda tasarruf algoritmasının yer aldığı göze çarpmaktadır. Tasarruf algoritması atölyelerin her birinde en iyi performansı yakalayan kural olmuştur. Bununla birlikte, parti tipi olmayan tek tek teslimat kuralının tasarruf algoritmasına göre 1. atölyede %37, 2. atölyede %51, 3. atölyede %45 ve 4. atölyede %49 daha kötü performans gösterdiği görülmüştür. Bu oranlar, partiler halinde teslimat gerçekleştirilmesinin problemi daha iyi bir global çözüme kavuşturduğunu belirtmektedir. En kötü performansları atölyelerin tamamında parti içermeyen tek tek teslimat, partiler halinde tek tek teslimat ve random teslimat kurallarının gösterdiği açıkça görülmektedir. Teslimat kurallarının atölye bazlı detaylı gösterimi Şekil 7.4'teki gibidir.



Şekil 7.4. Atölye bazlı teslimat kuralları performansı.

Çalışmadaki problem toplam ceza puanını minimize etmek üzerine olduğundan radar grafiklerde merkez noktaya en yakın olan kuralın daha iyi bir performansa sahip olduğu değerlendirilmelidir. Tüm atölyelerde merkeze en yakın sonuca [3] numaralı

kural olan tasarruf algoritması ile ulaşılmıştır. Sonuçlar aynı zamanda, aynı kromozomda sadece teslimat kuralını değiştirmenin performansı önemli oranda değiştirdiğini göstermektedir. Dolayısıyla, teslimat kurallarının çizelgeleme kurallarına oranla global çözümü değiştirme noktasında daha etkili oldukları sonucuna varılabilir. Tasarruf algoritması en yakın diğer kurala göre 1. atölyede %4,4, 2. atölyede %0,3, 3. atölyede %7,3 ve 4. atölyede %5,9 oranında daha iyi bir performans yakalamıştır.





8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Proses planlama, çizelgeleme ve teslim tarihi belirleme en küçüğünden en büyüğüne kadar her ölçekteki imalat ortamlarının vazgeçilmez üç fonksiyonudur. Bu fonksiyonların birbirinden bağımsız şekilde ele alınması pek çok soruna yol açmaktadır. Bu nedenle, fonksiyonların entegre edilmesini amaçlayan pek çok çalışma uzun yıllardır literatürde yer almaktadır. Pek çok farklı çalışmada, bu fonksiyonların ikili kombinasyonlarının ya da tamamının birbirine entegre bir şekilde çalışmasının oldukça faydalı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu tez çalışmasında ise, üç temel imalat fonksiyonuna ek olarak dördüncü bir fonksiyonun entegrasyonu amaçlanmıştır. Her ne kadar IPPS ve SWDDA konularında çok sayıda çalışma var olsa da üç fonksiyonun bile entegrasyonuna dair çalışmalar az sayıda ve yenidir. Dolayısıyla, dört fonksiyonun entegrasyonu açısından bu çalışmanın literatüre bir zenginlik katması hedeflenmektedir.

Bir üreticiye gelen işleri talep eden müşteriler her zaman eşit önemde değildir. Eski müşteri, devamlı müşteri, acil üretilmesi gereken iş vb. durumlar müşterilerin önem derecelerini etkileyebilir. Literatürdeki çalışmaların pek çoğunda müşteriler arasında bir önem farkı bulunmamakta ve eşit öneme sahip oldukları varsayılmaktadır. Bu tez çalışmasında gerek teslim tarihi belirleme gerek çizelgeleme gerekse de teslimat aşamalarının tamamında müşterilerin önem dereceleri hesaba katılmıştır. Bununla birlikte, tam zamanında üretim (JIT) felsefesine uygun olarak, amaç fonksiyonunda erken tamamlanma, geç tamamlanma ve söz verilen teslim tarihi süresi kavramlarının tamamı ağırlıklı olarak hesaba katılmıştır.

Tez çalışmasında ele alınan problemde 4 farklı atölye bulunmaktadır. Bu atölyelerde sırasıyla 25, 50, 75 ve 100 iş bulunmaktadır ve her iş farklı bir müşteriye aittir. Her atölyede 2 makine bulunmaktadır ve her iş çizelgelenirken birbirine alternatif 2 farklı rota dikkate alınmıştır. Sadece çizelgeleme veya araç rotalama fonksiyonları tek başına NP-hard problem sınıfında oldukları için, ikili ve üçlü entegre problemler ve özellikle bu tezde ele alınan dördüncü entegrasyon doğal olarak NP-hard problem sınıfında olan çok karmaşık bir problemdir. Bu sebeple, çalışılan problem genetik algoritma, tavlama

benzetimi, evrimsel strateji, rassal arama ve hibrit arama gibi sezgisel algoritmalar kullanılarak çözülmüştür. Her bir çözüm birer kromozomla temsil edilmiştir. Atölyelerin çözümlerinin yanında, farklı entegrasyon seviyelerine ait sonuçlar da elde edilmiştir. Herhangi bir kural içermeyen ilk entegrasyon seviyesinden başlayarak tam entegrasyona kadar incelemeler yapılarak entegrasyonun faydaları gösterilmiştir. Atölyelerin performansları, çözüm yöntemi olarak kullanılan beş algoritmanın performansları ve her bir imalat fonksiyonunun farklı kurallarda gösterdiği performanslar detaylı olarak ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Kullanılan sezgisel algoritmaların entegre olmayan çözüme oranla yüzde 54 oranında daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Bu da entegrasyonun ne denli önemli olduğunu net bir şekilde ortaya koymaktadır. Ayrıca, entegrasyon seviyesi arttıkça global çözümün daha iyiye gittiği elde edilen sonuçlar arasındadır. Daha düşük seviyelerde bile olsa imalat fonksiyonlarının birbirine entegre edilmesi, hiç entegre edilmemesine göre çok daha faydalıdır.

Çözüm yöntemlerinden 1. atölyede evrimsel strateji, 2. ve 3. atölyede genetik algoritma ve 4. atölyede rassal arama algoritmaları daha iyi sonuç vermiştir. Teslim tarihi belirleme kuralları içerisinde WSLK tüm atölyelerde ciddi farkla üstün sonuçlar vermiştir. Çizelgeleme kurallarında dört atölyenin ikisinde EDD (en erken teslim tarihine sahip iş öncelikli) kuralı, kalan iki atölyede ise WSPT (ağırlıklı en kısa işlem süresine sahip iş öncelikli) ve WSOT (ağırlıklı en kısa mevcut operasyon süresine sahip iş öncelikli) kuralları öne çıkmaktadır. Genellikle teslim tarihi odaklı kurallar (EDD, MS gibi) çizelgelemede daha etkili performanslar göstermişlerdir. Teslimat kurallarında tasarruf algoritması diğer kurallara oranla daha iyi performansa ulaşmıştır.

Fonksiyonların global performansı değiştirme gücünde teslim tarihi belirleme kurallarının, çizelgeleme ve teslimat kurallarına oranla daha baskın olduğu sonucuna varılmıştır. Dolayısıyla, iyi teslim tarihi vermek çok önemlidir ve dışarıdan fabrikanın şartlarından habersiz bir şekilde teslim tarihi verilmesi yerine içeriden firmanın ya kendi ya da müşteri ile ortaklaşa bir biçimde firma şartlarına uygun verdiği ve problemle birlikte optimize edilen teslim tarihleri en uygun ve en karlı tarihler olacaktır.

Çalışmada ele alınan problemin ana amacı, dört imalat fonksiyonunun entegre edilebileceğini ve bunun verimli sonuçları beraberinde getireceğini ifade etmektir. Her ne kadar dört farklı atölye ile beraber oldukça karmaşık bir yapı ele alınmış olsa da bu alanda yapılacak çalışmalara aşağıdaki gibi bazı önerilerde bulunulabilir:

- Atölyelerde kullanılan iş sayıları daha da artırılabilir.
- Yine, atölyelerdeki makine sayıları, işlere ait operasyon sayıları ve rota sayıları gibi proses planlama ait bilgileri de genişletilebilir.
- Farklı sezgisel algoritmalarından çözümde yararlanabilmek mümkündür.
- İşlerin geliş zamanları stokastik olarak ele alınabilir.
- İşlerin kesintiye uğraması, araya acil işlerin girmesi, makine arızaları vb. durumlar göz önüne alınarak süreç dinamikleştirilebilir.
- Çalışmada teslimat için tek araç kullanılmaktadır. Homojen ya da heterojen filo gibi kavramların çalışılabilmesi mümkündür.
- Teslimatta yükleme ve boşaltma zamanları gibi kavramlar ayrı değerlendirilebilir.
- Belirli bir teslim tarihi vermek gibi, belirli bir teslim tarihi aralığı da verilebilir.



KAYNAKLAR

- Adamopoulos, G. I., & Pappis, C. P. (1998). Scheduling under a common due-data on parallel unrelated machines. *European Journal of Operational Research*, 105(3), 494–501. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00057-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00057-X)
- Adulyasak, Y., Cordeau, J.-F., & Jans, R. (2015). The production routing problem: A review of formulations and solution algorithms. *Computers & Operations Research*, 55, 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.01.011>
- Ahn, B.-H., & Shin, J.-Y. (1991). Vehicle-Routing with Time Windows and Time-Varying Congestion. *The Journal of the Operational Research Society*, 42(5), 393–400. <https://doi.org/10.2307/2583752>
- Allaoua, H., & Osmane, I. (2010). Variable Parameters Lengths Genetic Algorithm for Minimizing Earliness-Tardiness Penalties of Single Machine Scheduling With a Common Due Date. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 36, 471–478. <https://doi.org/10.1016/j.endm.2010.05.060>
- Amin-Naseri, M. R., & Afshari, A. J. (2012). A hybrid genetic algorithm for integrated process planning and scheduling problem with precedence constraints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59(1), 273–287. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3488-y>
- Amorim, P., Belo-Filho, M. A. F., Toledo, F. M. B., Almeder, C., & Almada-Lobo, B. (2013). Lot sizing versus batching in the production and distribution planning of perishable goods. *International Journal of Production Economics*, 146(1), 208–218. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.07.001>
- Androutsopoulos, K. N., & Zografos, K. G. (2017). An integrated modelling approach for the bicriterion vehicle routing and scheduling problem with environmental considerations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 82, 180–209. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.06.013>
- Angelelli, E., & Grazia Speranza, M. (2002). The periodic vehicle routing problem with intermediate facilities. *European Journal of Operational Research*, 137(2), 233–247. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00206-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00206-5)
- Archetti, C., Mansini, R., & Speranza, M. G. (2005). Complexity and Reducibility of the Skip Delivery Problem. *Transportation Science*, 39(2), 182–187. <https://doi.org/10.1287/trsc.1030.0084>
- Atagün, E. (2020). *Genetik Algoritma Tabanlı Konferans Oturum Çizelgeleme Programının Geliştirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ayhan, E. (2021). *Kan Tedarik Zinciri Dağıtım Ağı Modellemesi ve Hibrit Genetik Algoritma ile Çözümü* [Doktora Tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Ba, L., Li, Y., Yang, M., Wu, X., Liu, Y., Gao, X., & Miao, Z. (2018). A Mathematical Model for Multiworkshop IPPS Problem in Batch Production. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, Article ID: 7948693. <https://doi.org/10.1155/2018/7948693>
- Bard, J. F., Huang, L., Dror, M., & Jaillet, P. (1998). A branch and cut algorithm for the VRP with satellite facilities. *IIE Transactions*, 30(9), 821–834. <https://doi.org/10.1023/A:1007500200749>
- Belo-Filho, M. A. F., Amorim, P., & Almada-Lobo, B. (2015). An adaptive large neighbourhood search for the operational integrated production and distribution problem of perishable products. *International Journal of Production Research*, 53(20), 6040–6058. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1010744>
- Bensmaine, A., Dahane, M., & Benyoucef, L. (2014). A new heuristic for integrated process planning and scheduling in reconfigurable manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 52(12), 3583–3594. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.878056>
- Bent, R., & Van Hentenryck, P. (2004). A Two-Stage Hybrid Local Search for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Transportation Science*, 38(4). <https://doi.org/10.1287/trsc.1030.0049>
- Birman, M., & Mosheiov, G. (2004). A note on a due-date assignment on a two-machine flow-shop. *Computers & Operations Research*, 31(3), 473–480. [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(02\)00225-3](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(02)00225-3)
- Brandão, J., & Mercer, A. (1997). A tabu search algorithm for the multi-trip vehicle routing and scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 100(1), 180–191. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00010-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00010-6)
- Brandimarte, P. (1999). Exploiting process plan flexibility in production scheduling: A multi-objective approach. *European Journal of Operational Research*, 114(1), 59–71. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00029-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00029-0)
- Büyükyılmaz, R. G. (2017). *Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi İçin Yeni Bir Çözüm Önerisi* [Yüksek Lisans Tezi]. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Çakır, B. (2006). *Stokastik işlem zamanlı montaj hattı dengeleme için tavlama benzetimi algoritması* [Yüksek Lisans Tezi]. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Can Atasagun, G. (2015). *Zaman Bağımlı Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi* [Yüksek Lisans Tezi]. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Çeven, E. (2007). *Teslim Tarihi Belirlemenin Proses Planlama ve Çizelgelemeyle Entegrasyonunun Faydaları* [Yüksek Lisans Tezi]. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Çeven, E., & Demir, H. I. (2007). *Benefits of Integrating Due-Date Assignment with Process Planning and Scheduling* [Yüksek Lisans Tezi]. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Chang, T. C., & Wysk, R. A. (1984). *An Introduction to Automated Process Planning Systems*. Prentice Hall Professional Technical Reference.

- Chang, Y.-C., Li, V. C., & Chiang, C.-J. (2014). An ant colony optimization heuristic for an integrated production and distribution scheduling problem. *Engineering Optimization*, 46(4), 503–520. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2013.786062>
- Chaudhry, I. A. (2012). A Genetic Algorithm Approach for Process Planning and Scheduling in Job Shop Environment. *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 6.
- Chen, H.-K., Hsueh, C.-F., & Chang, M.-S. (2009). Production scheduling and vehicle routing with time windows for perishable food products. *Computers & Operations Research*, 36(7), 2311–2319. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2008.09.010>
- Chen, Q. M., & Khoshnevis, B. (1993). Scheduling with flexible process plans. *Production Planning & Control*, 4(4), 333–343. <https://doi.org/10.1080/09537289308919455>
- Chen, Z. L. (1996). Scheduling and common due date assignment with earliness-tardiness penalties and batch delivery costs. *European Journal of Operational Research*, 93(1), 49–60. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00133-6](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00133-6)
- Chen, Z.-L. (2010). Integrated Production and Outbound Distribution Scheduling: Review and Extensions. *Operations Research*, 58(1), 130–148. <https://doi.org/10.1287/opre.1080.0688>
- Chen, Z.-L., & Vairaktarakis, G. L. (2005). Integrated scheduling of production and distribution operations. *Management Science*, 51(4), 614–628. Scopus. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1040.0325>
- Cheng, T. C. E. (1989). A Heuristic for Common Due-date Assignment and Job Scheduling on Parallel Machines. *Journal of the Operational Research Society*, 40(12), 1129–1135. <https://doi.org/10.1057/jors.1989.194>
- Cheng, T. C. E. (1990). Common due-date assignment and scheduling for a single processor to minimize the number of tardy jobs. *Engineering Optimization*, 16(2), 129–136. <https://doi.org/10.1080/03052159008941168>
- Cheng, T. C. E., & Kovalyov, M. Y. (1999). Complexity of parallel machine scheduling with processing-plus-wait due dates to minimize maximum absolute lateness. *European Journal of Operational Research*, 114(2), 403–410. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00111-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00111-8)
- Cheng, T. C. E., Kovalyov, M. Y., & Lin, B. M. T. (1997). Single Machine Scheduling to Minimize Batch Delivery and Job Earliness Penalties. *SIAM Journal on Optimization*, 7(2), 547–559. <https://doi.org/10.1137/S1052623494269540>
- Cheng, T. C. E., Yang, S.-J., & Yang, D.-L. (2012). Common due-window assignment and scheduling of linear time-dependent deteriorating jobs and a deteriorating maintenance activity. *International Journal of Production Economics*, 135(1), 154–161. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.10.005>
- Chrysosolouris, G., Chan, S., & Suh, N. P. (1985). An Integrated Approach to Process Planning and Scheduling. *CIRP Annals*, 34(1), 413–417. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61801-0](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61801-0)

- Chu, Y., You, F., Wassick, J. M., & Agarwal, A. (2015). Integrated planning and scheduling under production uncertainties: Bi-level model formulation and hybrid solution method. *Computers & Chemical Engineering*, 72, 255–272. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2014.02.023>
- Chuah, K. H., & Yingling, J. C. (2005). Routing for a Just-in-Time Supply Pickup and Delivery System. *Transportation Science*, 39(3), 328–339.
- Clarke, G., & Wright, J. W. (1964). Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Operations Research*, 12(4), 568–581. <https://doi.org/10.1287/opre.12.4.568>
- Cordeau, J.-F., & Laporte, G. (2001). A Tabu Search Algorithm For The Site Dependent Vehicle Routing Problem With Time Windows. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 39(3), 292–298. <https://doi.org/10.1080/03155986.2001.11732443>
- Cura, T. (2008). *Modern Sezgisel Teknikler ve Uygulamaları*. Papatya Yayıncılık, İstanbul.
- Dai, M., Tang, D. B., Xu, Y. C., & Li, W. D. (2019). Energy-aware Integrated Process Planning and Scheduling for Job Shops. In W. Li & S. Wang (Eds.), *Sustainable Manufacturing and Remanufacturing Management: Process Planning, Optimization and Applications* (pp. 13–36). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73488-0_2
- Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The Truck Dispatching Problem. *Management Science*, 6(1), 80–91. <https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80>
- De, P., Ghosh, J. B., & Wells, C. E. (1991). On the Multiple-machine Extension to a Common Due-date Assignment and Scheduling Problem. *Journal of the Operational Research Society*, 42(5), 419–422. <https://doi.org/10.1057/jors.1991.84>
- Demir, H. İ., Cakar, T., Cil, I., Dugenci, M., & Erden, C. (2016a). Integrating Process Planning WMS Dispatching and WPPW Weighted Due Date Assignment Using a Genetic Algorithm. *International Journal of Computer and Information Engineering*, 10(7), 1324–1332.
- Demir, H. İ., Cakar, T., Ipek, M., Erkeyman, B., & Canpolat, K. (2016b). Process Planning and Scheduling with PPW Due-Date Assignment using Hybrid Search. *MATTER: International Journal of Science and Technology*, 2(1). <https://www.grdspublishing.org/index.php/matter/article/view/152>
- Demir, H. İ., Cakar, T., Ipek, M., Uygun, O., & Sari, M. (2015). Process Planning and Due-date Assignment with ATC Dispatching where Earliness, Tardiness and Due-dates are Punished. *Journal of Industrial and Intelligent Information*, 3(3), 197–204. <https://doi.org/10.12720/jiii.3.3.197-204>
- Demir, H. İ., Canpolat, O., Erden, C., & Şimşir, F. (2018). Process Planning and Scheduling with WNOPPT Weighted Due-Date Assignment where Earliness, Tardiness and Due-Dates are Penalized. *Journal of Intelligent Systems*, 10.
- Demir, H. I., & Erden, C. (2020). Dynamic integrated process planning, scheduling and due-date assignment using ant colony optimization. *Computers & Industrial Engineering*, 149, 106799. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106799>

- Demir, H. İ., Erden, C., Demiriz, A., Dugenci, M., & Uygun, O. (2017). Integrating Process Planning, WATC Weighted Scheduling, and WPPW Weighted Due-Date Assignment Using Pure and Hybrid Metaheuristics for Weighted Jobs. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*, 3(1), 11–20. <https://doi.org/10.22399/ijcesen.323860>
- Demir, H. İ., Erden, C., Kökçam, A., & Göksu, A. (2021a). A Tabu Search and Hybrid Evolutionary Strategies Algorithms for the Integrated Process Planning and Scheduling with Due-date Agreement. *Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications*, 4(1), Article 1. <https://doi.org/10.38016/jista.767154>
- Demir, H. İ., & Phanden, R. K. (2019). Due-Date Agreement in Integrated Process Planning and Scheduling Environment Using Common Meta-Heuristics. In *Integration of Process Planning and Scheduling* (pp. 161–184). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429021305-8>
- Demir, H. İ., Phanden, R., Kökçam, A., Erdayman, B., & Erden, C. (2021b). Hybrid Evolutionary Strategy and Simulated Annealing Algorithms for Integrated Process Planning, Scheduling and Due-Date Assignment Problem. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 9(1), 86–91. <https://doi.org/10.21541/apjes.764150>
- Demir, H. İ., & Taskin, H. (2005). *Integrated Process Planning, Scheduling and Due-Date Assignment* [Doktora Tezi]. Sakarya Üniversitesi.
- Demir, H. I., & Wu, S. D. (1996). *A Comparison of several Optimization Schemes for The Integration of Processing Planning and Production Scheduling Problems* [Master of Science Thesis]. Lehigh University.
- Desrochers, M., Lenstra, J. K., & Savelsbergh, M. W. P. (1990). A classification scheme for vehicle routing and scheduling problems. *European Journal of Operational Research*, 46(3), 322–332. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90007-X](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90007-X)
- Elinson, A., Herrmann, J. W., Minis, I. E., Nau, D. S., & Singh, G. (1997). Toward Hybrid Variant/Generative Process Planning. *Volume 4: Design for Manufacturing Conference*, V004T31A036. <https://doi.org/10.1115/DETC97/DFM-4333>
- Erden, C. (2019). *Dinamik bütünleşik süreç planlama, çizelgeleme ve teslim tarihi belirlleme* [Doktora Tezi]. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Erden, C., Demir, H. İ., & Kökçam, A. H. (2019). Solving Integrated Process Planning, Dynamic Scheduling, and Due Date Assignment Using Metaheuristic Algorithms. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019, 1572614. <https://doi.org/10.1155/2019/1572614>
- Erpik, Z. (2019). *Hat Çizelgeleme Problemine Genetik Algoritma Yaklaşımı: İETT Örneği* [Yüksek Lisans Tezi]. Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Fleischmann, B., Gnutzmann, S., & Sandvoß, E. (2004). Dynamic Vehicle Routing Based on Online Traffic Information. *Transportation Science*, 38(4), 420–433.
- Fu, B., Huo, Y., & Zhao, H. (2012). Coordinated scheduling of production and delivery with production window and delivery capacity constraints. *Theoretical Computer Science*, 422, 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2011.11.035>

- Fu, L. (2002). Scheduling dial-a-ride paratransit under time-varying, stochastic congestion. *Transportation Research Part B: Methodological*, 36(6), 485–506. [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(01\)00014-5](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(01)00014-5)
- Fu, L.-L., Aloulou, M. A., & Triki, C. (2017). Integrated production scheduling and vehicle routing problem with job splitting and delivery time windows. *International Journal of Production Research*, 55(20), 5942–5957. Scopus. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308572>
- Garcia, J. M., & Lozano, S. (2004). Production and vehicle scheduling for ready-mix operations. *Computers & Industrial Engineering*, 46(4), 803–816. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2004.05.011>
- Gendreau, M., Laporte, G., & Séguin, R. (1996). A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands and Customers. *Operations Research*, 44(3), 469–477.
- Ghannadpour, S. F., & Zarrabi, A. (2018). Multi-objective heterogeneous vehicle routing and scheduling problem with energy minimizing. *Swarm and Evolutionary Computation*. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2018.08.012>
- Gladkov, L. A., Scheglov, S. N., & Gladkova, N. V. (2017). The application of bioinspired methods for solving vehicle routing problems. *Procedia Computer Science*, 120, 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.11.208>
- Göçken, T., Yaktubay, M., & Kılıç, F. (2018). Zaman pencereli araç rotalama problemi çözümü için çok amaçlı genetik algoritma yaklaşımı. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*. <https://doi.org/10.29109/gujsc.397543>
- Gordon, V., & Kubiak, W. (1998). Single machine scheduling with release and due date assignment to minimize the weighted number of late jobs. *Information Processing Letters*, 68(3), 153–159. [https://doi.org/10.1016/S0020-0190\(98\)00153-7](https://doi.org/10.1016/S0020-0190(98)00153-7)
- Gordon, V., Proth, J. M., & Chu, C. (2002). A survey of the state-of-the-art of common due date assignment and scheduling research. *European Journal of Operational Research*, 139(1), 1–25. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00181-3](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00181-3)
- Guo, Y. W., Li, W. D., Mileham, A. R., & Owen, G. W. (2009). Optimisation of integrated process planning and scheduling using a particle swarm optimisation approach. *International Journal of Production Research*, 47(14), 3775–3796. <https://doi.org/10.1080/00207540701827905>
- Haddadzade, M., Razfar, M. R., & Zarandi, M. H. F. (2014). Integration of process planning and job shop scheduling with stochastic processing time. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(1), 241–252. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5469-9>
- Han, D., Yang, Y., Wang, D., Cheng, T. C. E., & Yin, Y. (2019). Integrated production, inventory, and outbound distribution operations with fixed departure times in a three-stage supply chain. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 125, 334–347. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.03.014>

- Holland, J. H. (1992). Genetic Algorithms. *Scientific American*, 267(1), 66–73. JSTOR.
- Hou, Y., Fu, Y., Gao, K., Zhang, H., & Sadollah, A. (2022). Modelling and optimization of integrated distributed flow shop scheduling and distribution problems with time windows. *Expert Systems with Applications*, 187, 115827. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115827>
- Huang, S. H., Zhang, H.-C., & Smith, M. L. (1995). A progressive approach for the integration of process planning and scheduling. *IIE Transactions*, 27(4), 456–464. <https://doi.org/10.1080/07408179508936762>
- Hutchison, J., Leong, K., Snyder, D., & Ward, P. (1991). Scheduling approaches for random job shop flexible manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 29(5), 1053–1067. <https://doi.org/10.1080/00207549108930119>
- Huynh Tuong, N., & Soukhal, A. (2010). Due dates assignment and JIT scheduling with equal-size jobs. *European Journal of Operational Research*, 205(2), 280–289. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.01.016>
- Ichoua, S., Gendreau, M., & Potvin, J.-Y. (2000). Diversion Issues in Real-Time Vehicle Dispatching. *Transportation Science*, 34(4), 426–438. <https://doi.org/10.1287/trsc.34.4.426.12325>
- Iranpoor, M., Fatemi Ghomi, S. M. T., & Zandieh, M. (2013). Due-date assignment and machine scheduling in a low machine-rate situation with stochastic processing times. *Computers & Operations Research*, 40(4), 1100–1108. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.11.013>
- Ji, M., Ge, J., Chen, K., & Cheng, T. C. E. (2013). Single-machine due-window assignment and scheduling with resource allocation, aging effect, and a deteriorating rate-modifying activity. *Computers & Industrial Engineering*, 66(4), 952–961. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.08.020>
- Jiang, J., & Chen, M. (1993). The influence of alternate process planning in job shop scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, 25(1–4), 263–266. [https://doi.org/10.1016/0360-8352\(93\)90271-X](https://doi.org/10.1016/0360-8352(93)90271-X)
- Jiang, J., & Hsiao, W.-C. (1994). Mathematical Programming for the Scheduling Problem with Alternate Process Plans in FMS. *Selected Papers from the 16th Annual Conference on Computers and Industrial Engineering*, 15–18. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=200436.200445>
- Jin, L., Zhang, C., Shao, X., Yang, X., & Tian, G. (2016). A multi-objective memetic algorithm for integrated process planning and scheduling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85(5), 1513–1528. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8037-7>
- Karaoğlu, İ., & Kesen, S. E. (2017). The coordinated production and transportation scheduling problem with a time-sensitive product: A branch-and-cut algorithm. *International Journal of Production Research*, 55(2), 536–557. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1213916>
- Kaya, Ö. (2020). *Akış Tipi Çizelgeleme Problemlerinin Hibrit Genetik Algoritma ile Çözümü ve Karar Ağacı ile İncelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Khoshnevis, B., & Chen, Q. M. (1991). Integration of process planning and scheduling functions. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2(3), 165–175. <https://doi.org/10.1007/BF01471363>
- Kim, J.-G., Kim, J.-S., & Lee, D.-H. (2012). Fast and meta-heuristics for common due-date assignment and scheduling on parallel machines. *International Journal of Production Research*, 50(20), 6040–6057. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.644591>
- Kim, K.-H., & Egbelu, P. J. (1999). Scheduling in a production environment with multiple process plans per job. *International Journal of Production Research*, 37(12), 2725–2753. <https://doi.org/10.1080/002075499190491>
- Kim, S., Lewis, M. E., & White, C. C. (2005). Optimal vehicle routing with real-time traffic information. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 6(2), 178–188. <https://doi.org/10.1109/TITS.2005.848362>
- Kim, Y. K., Park, K., & Ko, J. (2003). A symbiotic evolutionary algorithm for the integration of process planning and job shop scheduling. *Computers & Operations Research*, 30(8), 1151–1171. [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(02\)00063-1](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(02)00063-1)
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 220(4598), 671–680.
- Kotler, P., & Keller, K. L. (2015). *Marketing Management: Global Edition*. Pearson.
- Küçükoğlu, İ. (2010). *Zaman kısıtlı araç rotalama problemi ve hizmet sisteminde bir uygulama* [Yüksek Lisans Tezi]. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kuo, Y. (2010). Using simulated annealing to minimize fuel consumption for the time-dependent vehicle routing problem. *Computers & Industrial Engineering*, 59(1), 157–165. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2010.03.012>
- Lacomme, P., Moukrim, A., Quilliot, A., & Vinot, M. (2016). The Integrated Production and Transportation Scheduling Problem based on a GRASP×ELS resolution scheme. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 1466–1471. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.778>
- Laporte, G., Gendreau, M., & Potvin, J.-Y. (2000). Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem. *International Transactions in Operational Research*, 7, 285–300.
- Lauff, V., & Werner, F. (2004). Scheduling with common due date, earliness and tardiness penalties for multimachine problems: A survey. *Mathematical and Computer Modelling*, 40(5–6), 637–655. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2003.05.019>
- Lee, H., & Kim, S.-S. (2001). Integration of Process Planning and Scheduling Using Simulation Based Genetic Algorithms. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 18(8), 586–590. <https://doi.org/10.1007/s001700170035>
- Lee, J., Kim, B.-I., Johnson, A. L., & Lee, K. (2014). The nuclear medicine production and delivery problem. *European Journal of Operational Research*, 236(2), 461–472. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.12.024>

- Lee, T., & Ueng, J. (1999). A study of vehicle routing problems with load-balancing constraints. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 29(10), 646–657. <https://doi.org/10.1108/09600039910300019>
- Letchford, A. N., & Eglese, R. W. (1998). The rural postman problem with deadline classes. *European Journal of Operational Research*, 105(3), 390–400. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00090-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00090-8)
- Leung, C. W., Wong, T. N., Mak, K. L., & Fung, R. Y. K. (2010). Integrated process planning and scheduling by an agent-based ant colony optimization. *Computers & Industrial Engineering*, 59(1), 166–180. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.09.003>
- Li, F., Chen, Z.-L., & Tang, L. (2017). Integrated Production, Inventory and Delivery Problems: Complexity and Algorithms. *INFORMS Journal on Computing*, 29(2), 232–250. <https://doi.org/10.1287/ijoc.2016.0726>
- Li, J., Sun, K., Xu, D., & Li, H. (2010c). Single machine due date assignment scheduling problem with customer service level in fuzzy environment. *Applied Soft Computing*, 10(3), 849–858. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2009.10.002>
- Li, M., Yao, L., Yang, J., & Wang, Z. (2015b). Due date assignment and dynamic scheduling of one-of-a-kind assembly production with uncertain processing time. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 28(6), 616–627. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2014.900859>
- Li, S.-S., & Chen, R.-X. (2017). Common due date assignment and cumulative deterioration scheduling on a single machine. *Engineering Optimization*, 49(6), 976–989. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2016.1227616>
- Li, X., & Gao, L. (2020). *Effective Methods for Integrated Process Planning and Scheduling* (Vol. 2). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55305-3>
- Li, X., Gao, L., & Li, W. (2012b). Application of game theory based hybrid algorithm for multi-objective integrated process planning and scheduling. *Expert Systems with Applications*, 39(1), 288–297. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.07.019>
- Li, X., Gao, L., & Shao, X. (2012a). An active learning genetic algorithm for integrated process planning and scheduling. *Expert Systems with Applications*, 39(8), 6683–6691. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.11.074>
- Li, X., Gao, L., Shao, X., Zhang, C., & Wang, C. (2010b). Mathematical modeling and evolutionary algorithm-based approach for integrated process planning and scheduling. *Computers & Operations Research*, 37(4), 656–667. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.06.008>
- Li, X., Gao, L., Zhang, C., & Shao, X. (2010d). A review on Integrated Process Planning and Scheduling. *International Journal of Manufacturing Research*, 5(2), 161–180. <https://doi.org/10.1504/IJMR.2010.03163>
- Li, X., Ishii, H., & Chen, M. (2015a). Single machine parallel-batching scheduling problem with fuzzy due-date and fuzzy precedence relation. *International Journal of Production Research*, 53(9), 2707–2717. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.975866>

- Li, X., Shao, X., Gao, L., & Qian, W. (2010a). An effective hybrid algorithm for integrated process planning and scheduling. *International Journal of Production Economics*, 126(2), 289–298. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.04.001>
- Lian, K., Zhang, C., Gao, L., & Li, X. (2012). Integrated process planning and scheduling using an imperialist competitive algorithm. *International Journal of Production Research*, 50(15), 4326–4343. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.622310>
- Lihong, Q., & Lv, S. (2012). An improved genetic algorithm for integrated process planning and scheduling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58(5), 727–740. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3409-0>
- Liu, M., Yi, S., & Wen, P. (2018). Quantum-inspired hybrid algorithm for integrated process planning and scheduling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 232(6), 1105–1122. <https://doi.org/10.1177/0954405416661006>
- Liu, W., Hu, X., & Wang, X. (2017). Single machine scheduling with slack due dates assignment. *Engineering Optimization*, 49(4), 709–717. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2016.1197611>
- Liu, X., Ni, Z., & Qiu, X. (2016). Application of ant colony optimization algorithm in integrated process planning and scheduling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84(1), 393–404. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8145-4>
- Luo, G., Wen, X., Li, H., Ming, W., & Xie, G. (2017). An effective multi-objective genetic algorithm based on immune principle and external archive for multi-objective integrated process planning and scheduling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(9), 3145–3158. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0020-z>
- Lv, S., & Qiao, L. (2014). Process planning and scheduling integration with optimal rescheduling strategies. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 27(7), 638–655. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2013.834468>
- Malandraki, C., & Daskin, M. S. (1992). Time Dependent Vehicle Routing Problems: Formulations, Properties and Heuristic Algorithms. *Transportation Science*, 26(3), 185–200. <https://doi.org/10.1287/trsc.26.3.185>
- Manupati, V. K., Putnik, G. D., Tiwari, M. K., Ávila, P., & Cruz-Cunha, M. M. (2016). Integration of process planning and scheduling using mobile-agent based approach in a networked manufacturing environment. *Computers & Industrial Engineering*, 94, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.01.017>
- Márquez, C. R. H., & Ribeiro, C. C. (2022). Shop scheduling in manufacturing environments: A review. *International Transactions in Operational Research*, 29(6), 3237–3293. <https://doi.org/10.1111/itor.13108>

- Meenakshi Sundaram, R., & Fu, S. (1988). Process planning and scheduling—A method of integration for productivity improvement. *Computers & Industrial Engineering*, 15(1–4), 296–301. [https://doi.org/10.1016/0360-8352\(88\)90102-7](https://doi.org/10.1016/0360-8352(88)90102-7)
- Meng, Q., Lee, D.-H., & Cheu, R. L. (2005). Multiobjective Vehicle Routing and Scheduling Problem with Time Window Constraints in Hazardous Material Transportation. *Journal of Transportation Engineering*, 131(9), 699–707. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2005\)131:9\(699\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:9(699))
- Mohapatra, P., Nayak, A., Kumar, S. K., & Tiwari, M. K. (2015). Multi-objective process planning and scheduling using controlled elitist non-dominated sorting genetic algorithm. *International Journal of Production Research*, 53(6), 1712–1735. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.957872>
- Moon, C., Kim, J., & Hur, S. (2002). Integrated process planning and scheduling with minimizing total tardiness in multi-plants supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 43(1–2), 331–349. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(02\)00078-5](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(02)00078-5)
- Moon, C., Lee, Y. H., Jeong, C. S., & Yun, Y. (2008). Integrated process planning and scheduling in a supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 54(4), 1048–1061. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.06.018>
- Moon, C., & Seo, Y. (2005). Evolutionary algorithm for advanced process planning and scheduling in a multi-plant. *Computers & Industrial Engineering*, 48(2), 311–325. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2005.01.016>
- Moons, S., Ramaekers, K., Caris, A., & Arda, Y. (2017). Integrating production scheduling and vehicle routing decisions at the operational decision level: A review and discussion. *Computers & Industrial Engineering*, 104, 224–245. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.12.010>
- Mor, B., & Mosheiov, G. (2012). Scheduling a maintenance activity and due-window assignment based on common flow allowance. *International Journal of Production Economics*, 135(1), 222–230. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.07.013>
- Morad, N., & Zalzala, A. (1999). Genetic algorithms in integrated process planning and scheduling. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 10(2), 169–179. <https://doi.org/10.1023/A:1008976720878>
- Mosheiov, G. (2001). A common due-date assignment problem on parallel identical machines. *Computers & Operations Research*, 28(8), 719–732. [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(99\)00127-6](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(99)00127-6)
- Nagy, G., & Salhi, S. (2005). Heuristic algorithms for single and multiple depot vehicle routing problems with pickups and deliveries. *European Journal of Operational Research*, 162(1), 126–141. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2002.11.003>
- Nanry, W. P., & Wesley Barnes, J. (2000). Solving the pickup and delivery problem with time windows using reactive tabu search. *Transportation Research Part B: Methodological*, 34(2), 107–121. [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(99\)00016-8](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(99)00016-8)

- Nasr, N., & Elsayed, E. A. (1990). Job shop scheduling with alternative machines. *International Journal of Production Research*, 28(9), 1595–1609. <https://doi.org/10.1080/00207549008942818>
- Nourali, S., Imanipour, N., & Shahriari, M. R. (2012). A Mathematical Model for Integrated Process Planning and Scheduling in Flexible Assembly Job Shop Environment with Sequence Dependent Setup Times. 16.
- Özgüven, C., Özbakır, L., & Yavuz, Y. (2010). Mathematical models for job-shop scheduling problems with routing and process plan flexibility. *Applied Mathematical Modelling*, 34(6), 1539–1548. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2009.09.002>
- Öztürk, H. (2018). *Esnek Akış Tipi Çizelgelemeyle Teslim Tarihi Belirleme ve Uygulaması* [Yüksek Lisans Tezi]. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Panwalkar, S. S., Smith, M. L., & Seidmann, A. (1982). Common Due Date Assignment to Minimize Total Penalty for the One Machine Scheduling Problem. *Operations Research*, 30(2), 391–399. <https://doi.org/10.1287/opre.30.2.391>
- Petrović, M., Mitić, M., Vuković, N., & Miljković, Z. (2016c). Chaotic particle swarm optimization algorithm for flexible process planning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85(9), 2535–2555. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7991-4>
- Petrović, M., Petronijević, J., Mitić, M., Vuković, N., Miljković, Z., & Babić, B. (2016b). The Ant Lion Optimization Algorithm for Integrated Process Planning and Scheduling. *Applied Mechanics and Materials*, 834, 187–192. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.834.187>
- Petrović, M., Vuković, N., Mitić, M., & Miljković, Z. (2016a). Integration of process planning and scheduling using chaotic particle swarm optimization algorithm. *Expert Systems with Applications*, 64, 569–588. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.08.019>
- Phanden, R. K., Jain, A., & Verma, R. (2011). Integration of process planning and scheduling: A state-of-the-art review. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 24(6), 517–534. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2011.562543>
- Phanden, R. K., Jain, A., & Verma, R. (2013). An approach for integration of process planning and scheduling. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 26(4), 284–302. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2012.684721>
- Pinedo, M., & Chao, X. (1999). *Operations scheduling with applications in manufacturing and services*. McGraw-Hill Companies.
- Rajkumar, M., Asokan, P., Page, T., & Arunachalam, S. (2010). A GRASP algorithm for the Integration of Process Planning and Scheduling in a flexible job-shop. *International Journal of Manufacturing Research*, 5(2), 230–251. <https://doi.org/10.1504/IJMR.2010.031633>

- Raza, A., Ahrends, H., Habib-ur-Rahman, M., Hüging, H., & Gaiser, T. (2022). Using the Taguchi experimental design for assessing within-field variability of surface run-off and soil erosion risk. *Science of The Total Environment*, 828, 154567. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154567>
- Rechenberg, I. (1965). *Cybernetic Solution Path of an Experimental Problem*. Royal Aircraft Establishment Library Translation No: 1122.
- Reiter, B. S., Makuschewitz, T., Novaes, A. G. N., Frazzon, E. M., & Lima, Jr. (2011). An approach for the sustainable integration of production and transportation scheduling. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 10(2), 158–179. Scopus. <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2011.042626>
- Santos, L., Coutinho-Rodrigues, J., & Current, J. R. (2009). An improved heuristic for the capacitated arc routing problem. *Computers & Operations Research*, 36(9), 2632–2637. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2008.11.005>
- Schwefel, H.-P. (1981). *Numerical Optimization of Computer Models*. John Wiley & Sons, Inc.
- Shabtay, D., Mosheiov, G., & Oron, D. (2022). Single machine scheduling with common assignable due date/due window to minimize total weighted early and late work. *European Journal of Operational Research*, 303(1), 66–77. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.02.017>
- Shahin Moghadam, S., Fatemi Ghomi, S. M. T., & Karimi, B. (2014). Vehicle routing scheduling problem with cross docking and split deliveries. *Computers & Chemical Engineering*, 69, 98–107. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2014.06.015>
- Shao, X., Li, X., Gao, L., & Zhang, C. (2009). Integration of process planning and scheduling—A modified genetic algorithm-based approach. *Computers & Operations Research*, 36(6), 2082–2096. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2008.07.006>
- Shen, X.-N., & Yao, X. (2015). Mathematical modeling and multi-objective evolutionary algorithms applied to dynamic flexible job shop scheduling problems. *Information Sciences*, 298, 198–224. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.11.036>
- Sobeyko, O., & Mönch, L. (2017). Integrated process planning and scheduling for large-scale flexible job shops using metaheuristics. *International Journal of Production Research*, 55(2), 392–409. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1182227>
- Solina, V., & Mirabelli, G. (2021). Integrated production-distribution scheduling with energy considerations for efficient food supply chains. *Procedia Computer Science*, 180, 797–806. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.355>
- Solomon, M. M. (1987). Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints. *Operations Research*, 35(2), 254–265. <https://doi.org/10.1287/opre.35.2.254>
- Sousa Matos, M. R., Frota, Y., & Ochi, L. S. (2018). Green Vehicle Routing and Scheduling Problem with Split Delivery. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 69, 13–20. <https://doi.org/10.1016/j.endm.2018.07.003>

- Süral, H., & Bookbinder, J. H. (2003). The single-vehicle routing problem with unrestricted backhauls. *Networks*, 41(3), 127–136. <https://doi.org/10.1002/net.10067>
- Taguchi, G. (1986). *Introduction to Quality Engineering: Designing Quality into Products and Processes*. Quality Resources.
- Tan, W., & Khoshnevis, B. (2000). Integration of process planning and scheduling—A review. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 11(1), 51–63. <https://doi.org/10.1023/A:1008952024606>
- Timuçin, T., & Biroğul, S. (2020). Effect the Number of Reservations on Implementation of Operating Room Scheduling with Genetic Algorithm. In D. J. Hemanth & U. Kose (Eds.), *Artificial Intelligence and Applied Mathematics in Engineering Problems* (pp. 252–265). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36178-5_20
- Tonizza Pereira, M., & Seido Nagano, M. (2022). Hybrid metaheuristics for the integrated and detailed scheduling of production and delivery operations in no-wait flow shop systems. *Computers & Industrial Engineering*, 170, 108255. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108255>
- Toth, P., & Vigo, D. (1999). A heuristic algorithm for the symmetric and asymmetric vehicle routing problems with backhauls. *European Journal of Operational Research*, 113(3), 528–543. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00086-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00086-1)
- Toth, P., & Vigo, D. (2002). *The vehicle routing problem*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Ueda, K., Fujii, N., & Inoue, R. (2007). An Emergent Synthesis Approach to Simultaneous Process Planning and Scheduling. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56(1), 463–466. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.111>
- Ullrich, C. A. (2013). Integrated machine scheduling and vehicle routing with time windows. *European Journal of Operational Research*, 227(1), 152–165. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.11.049>
- Uysal, M., & Özcan, U. (2019). Süpermarket Yerleşim Problemi İçin Tavlama Benzetimi Algoritması Yaklaşımı. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 9(1), Article 1. <https://doi.org/10.31466/kfbd.512098>
- Vidal, T., Laporte, G., & Matl, P. (2020). A concise guide to existing and emerging vehicle routing problem variants. *European Journal of Operational Research*, 286(2), 401–416. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.10.010>
- Vinod, V., & Sridharan, R. (2011). Simulation modeling and analysis of due-date assignment methods and scheduling decision rules in a dynamic job shop production system. *International Journal of Production Economics*, 129(1), 127–146. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.08.017>
- Wan, L., Li, X., Gao, L., Wen, X., & Wang, W. (2013). A Novel Two-Level Genetic Algorithm for Integrated Process Planning and Scheduling. *2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 2790–2795. <https://doi.org/10.1109/SMC.2013.476>

- Wang, D. J., Yin, Y., Cheng, S. R., Cheng, T. C. E., & Wu, C. C. (2016). Due date assignment and scheduling on a single machine with two competing agents. *International Journal of Production Research*, 54(4), 1152–1169. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1056317>
- Wang, J., Fan, X., Zhang, C., & Wan, S. (2014). A Graph-based Ant Colony Optimization Approach for Integrated Process Planning and Scheduling. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 22(7), 748–753. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2014.05.011>
- Wang, J.-B., Liu, L., & Wang, C. (2013). Single machine SLK/DIF due window assignment problem with learning effect and deteriorating jobs. *Applied Mathematical Modelling*, 37(18–19), 8394–8400. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.03.041>
- Wang, Y. F., Zhang, Y. F., & Fuh, J. Y. H. (2010). A PSO-based multi-objective optimization approach to the integration of process planning and scheduling. *IEEE ICCA 2010*, 614–619. <https://doi.org/10.1109/ICCA.2010.5524365>
- Weintraub, A., Cormier, D., Hodgson, T., King, R., Willson, J., & Zozom, A. (1999). Scheduling with alternatives: A link between process planning and scheduling. *IIE Transactions*, 31(11), 1093–1102. <https://doi.org/10.1023/A:1007683710427>
- Wen, X., Lian, X., Qian, Y., Zhang, Y., Wang, H., & Li, H. (2022). Dynamic scheduling method for integrated process planning and scheduling problem with machine fault. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 77, 102334. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102334>
- Wilhelm, W. E., & Shin, H.-M. (1985). Effectiveness of alternate operations in a flexible manufacturing system. *International Journal of Production Research*, 23(1), 65–79. <https://doi.org/10.1080/00207548508904691>
- Xiao, Y., & Konak, A. (2016). The heterogeneous green vehicle routing and scheduling problem with time-varying traffic congestion. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 88, 146–166. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.01.011>
- Xiao, Y., & Konak, A. (2017). A genetic algorithm with exact dynamic programming for the green vehicle routing & scheduling problem. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1450–1463. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.115>
- Xu, H., & Li, D. (2008). Review of process planning research with perspectives. *Manufacturing Automation*, 30(3), 1-7,22.
- Yang, D.-L., Lai, C.-J., & Yang, S.-J. (2014). Scheduling problems with multiple due windows assignment and controllable processing times on a single machine. *International Journal of Production Economics*, 150, 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.12.021>
- Yang, F., Davari, M., Wei, W., Hermans, B., & Leus, R. (2022). Scheduling a single parallel-batching machine with non-identical job sizes and incompatible job families. *European Journal of Operational Research*, 303(2), 602–615. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.03.027>

- Yang, S.-J., Yang, D.-L., & Cheng, T. C. E. (2010). Single-machine due-window assignment and scheduling with job-dependent aging effects and deteriorating maintenance. *Computers & Operations Research*, 37(8), 1510–1514. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.11.007>
- Yao, Y., Feng, H., Zhao, L., & Yan, P. (2011). Research and Development of CAPP and Quality Control Integrated System. *2011 Second International Conference on Digital Manufacturing & Automation*, 919–921. <https://doi.org/10.1109/ICDMA.2011.227>
- Yin, P.-Y., Lyu, S.-R., & Chuang, Y.-L. (2016). Cooperative coevolutionary approach for integrated vehicle routing and scheduling using cross-dock buffering. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 52, 40–53. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2016.02.006>
- Yin, Y., Cheng, T. C. E., Cheng, S.-R., & Wu, C.-C. (2013c). Single-machine batch delivery scheduling with an assignable common due date and controllable processing times. *Computers & Industrial Engineering*, 65(4), 652–662. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.05.003>
- Yin, Y., Cheng, T. C. E., Hsu, C.-J., & Wu, C.-C. (2013a). Single-machine batch delivery scheduling with an assignable common due window. *Omega*, 41(2), 216–225. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2012.06.002>
- Yin, Y., Cheng, T. C. E., Wang, J., & Wu, C.-C. (2013b). Single-machine common due window assignment and scheduling to minimize the total cost. *Discrete Optimization*, 10(1), 42–53. <https://doi.org/10.1016/j.disopt.2012.10.003>
- Yin, Y., Cheng, T. C. E., Wu, C. C., & Cheng, S. R. (2014a). Single-machine batch delivery scheduling and common due-date assignment with a rate-modifying activity. *International Journal of Production Research*, 52(19), 5583–5596. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.886027>
- Yin, Y., Cheng, T. C. E., Xu, D., & Wu, C.-C. (2012a). Common due date assignment and scheduling with a rate-modifying activity to minimize the due date, earliness, tardiness, holding, and batch delivery cost. *Computers & Industrial Engineering*, 63(1), 223–234. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.02.015>
- Yu, M., Zhang, Y., Chen, K., & Zhang, D. (2015). Integration of process planning and scheduling using a hybrid GA/PSO algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(1), 583–592. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6669-7>
- Yue, Q., & Zhou, S. (2021). Due-window assignment scheduling problem with stochastic processing times. *European Journal of Operational Research*, 290(2), 453–468. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.08.029>
- Zhan, Y., & Wan, G. (2018). Vehicle routing and appointment scheduling with team assignment for home services. *Computers & Operations Research*, 100, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.07.006>
- Zhang, C., Li, Y., Cao, J., Yang, Z., & Coelho, L. C. (2022). Exact and matheuristic methods for the parallel machine scheduling and location problem with delivery time and due date. *Computers & Operations Research*, 147, 105936. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105936>

- Zhang, H. C., & Mallur, S. (1994). An integrated model of process planning and production scheduling. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 7(6), 356–364. <https://doi.org/10.1080/09511929408944623>
- Zhang, J., Gao, L., Chan, F. T. S., & Li, P. (2003). A holonic architecture of the concurrent integrated process planning system. *Journal of Materials Processing Technology*, 139(1–3), 267–272. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00233-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00233-4)
- Zhang, L., & Wong, T. N. (2015). An object-coding genetic algorithm for integrated process planning and scheduling. *European Journal of Operational Research*, 244(2), 434–444. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.01.032>
- Zhang, L., & Wong, T. N. (2016a). Solving integrated process planning and scheduling problem with constructive meta-heuristics. *Information Sciences*, 340–341, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.01.001>
- Zhang, R., & Wu, C. (2012). A double-layered optimisation approach for the integrated due date assignment and scheduling problem. *International Journal of Production Research*, 50(1), 5–22. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.571440>
- Zhang, S., & Wong, T. N. (2016b). Studying the impact of sequence-dependent set-up times in integrated process planning and scheduling with E-ACO heuristic. *International Journal of Production Research*, 54(16), 4815–4838. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1098786>
- Zhang, S., & Wong, T. N. (2018). Integrated process planning and scheduling: An enhanced ant colony optimization heuristic with parameter tuning. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 29(3), 585–601. <https://doi.org/10.1007/s10845-014-1023-3>
- Zhang, W., & Gen, M. (2010). Process Planning and Scheduling in Distributed Manufacturing System Using Multiobjective Genetic Algorithm. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 5(1), 62–72. <https://doi.org/10.1002/tee.20494>
- Zhao, C., & Tang, H. (2012). A note to due-window assignment and single machine scheduling with deteriorating jobs and a rate-modifying activity. *Computers & Operations Research*, 39(6), 1300–1303. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2010.04.006>
- Zhao, C.-L., & Tang, H.-Y. (2014). A note on single machine scheduling and due date assignment with general position-dependent processing times. *International Journal of Production Research*, 52(9), 2807–2814. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.886025>
- Zografos, K. G., & Androutsopoulos, K. N. (2004). A heuristic algorithm for solving hazardous materials distribution problems. *European Journal of Operational Research*, 152(2), 507–519. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00041-9](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00041-9)
- Zou, X., Liu, L., Li, K., & Li, W. (2018). A coordinated algorithm for integrated production scheduling and vehicle routing problem. *International Journal of Production Research*, 56(15), 5005–5024. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1378955>



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Onur CANPOLAT

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2016, Sakarya Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM:

- 2012 Haziran – 2013 Haziran arasında özel bir firmada planlama mühendisi olarak çalıştı.
- 2014 yılında Fırat Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümünde araştırma görevlisi olarak göreve başladı.
- Yüksek lisans ve doktora eğitimi amacıyla geldiği Sakarya Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümünde 2015 yılından beri araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- ERDEN CANER, DEMİR HALİL İBRAHİM, CANPOLAT ONUR (2023). A modified integer and categorical PSO algorithm for solving integrated process planning dynamic scheduling and due date assignment problem. Scientia Iranica, doi.org/10.24200/SCI.2021.55250.4130

DİĞER ESERLER:

- KİRAZ ALPER, CANPOLAT ONUR, ÖZKURT CEM, TAŞKIN HARUN (2020). Analysis of the factors affecting the Industry 4.0 tendency with the structural equation model and an application. Computers & Industrial Engineering, 150, 106911, Doi: 10.1016/j.cie.2020.106911

- KİRAZ ALPER, CANPOLAT ONUR, ÖZKURT CEM, TAŞKIN HARUN, SARP ESRA (2020). Endüstri 4.0'ı etkileyen kriterlerin yapısal eşitlik modeli ile incelenmesi ve bir pilot uygulama. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35(4), 2183-2196., Doi: 10.17341/gazimmfd.558947
- KİRAZ ALPER, CANPOLAT ONUR, ERKAN ENES FURKAN, ÖZER ÇİĞDEM (2019). Artificial neural networks modeling for the prediction of Pb(II) adsorption. International Journal of Environmental Science and Technology, 16(9), 5079-5086., Doi: 10.1007/s13762-018-1798-4
- ERDEN CANER, DEMİR HALİL İBRAHİM, CANPOLAT ONUR (2023). A modified integer and categorical PSO algorithm for solving integrated process planning dynamic scheduling and due date assignment problem. Scientia Iranica, doi.org/10.24200/SCI.2021.55250.4130
- ERKAN ENES FURKAN, UYGUN ÖZER, KİRAZ ALPER, CANPOLAT ONUR (2021) An integrated fuzzy DEMATEL and fuzzy cognitive maps approach for the assessing of the Industry 4.0 Model, Journal of Engineering Research, doi.org/10.36909/jer.12303
- KİRAZ ALPER, UYGUN ÖZER, ERKAN ENES FURKAN, CANPOLAT ONUR (2017). Fuzzy Cognitive Mapping Approach for Assessing Industry 4.0 Tendency. 4th International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN 2017), 456-456.
- KİRAZ ALPER, CANPOLAT ONUR, ERKAN ENES FURKAN, UYGUN ÖZER (2019). İMPULS Kriterleri ile Endüstri 4.0 Eğiliminin Değerlendirilmesi: Bir Bulanık Bilişsel Harita Uygulaması. Academic Platform Journal of Engineering and Science, 7(1), 14-23., Doi: 10.21541/apjes.332543
- KİRAZ ALPER, CANPOLAT ONUR, ERKAN ENES FURKAN, ALBAYRAK FATİH (2018). Evaluating R&D Projects Using Two Phases Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS Methods. European Journal of Science and Technology(14), 49-53., Doi: 10.31590/ejosat.428343
- KİRAZ ALPER, CANPOLAT ONUR, ERKAN ENES FURKAN, ALBAYRAK FATİH (2018). Determining Importance Degrees of Strategic Plan Goals with Integrated Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS Methods. European Journal of Science and Technology(13), 72-76., Doi: 10.31590/ejosat.428357
- DEMİR HALİL İBRAHİM, CANPOLAT ONUR, ERDEN CANER, ŞİMŞİR FUAT (2018). Process Planning and Scheduling with WNOPPT Weighted Due-Date Assignment where Earliness, Tardiness and Due-Dates are Penalized. Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications, 1(1), 16-25., Doi: 10.38016/jista.433085
- DEMİR HALİL İBRAHİM, GÖKSU ALPER, CANPOLAT ONUR, ERDEN CANER, NUR MELEK (2017). Solving Process Planning and Scheduling with Number of Operation Plus Processing Time Due-Date Assignment Concurrently Using a Genetic Search. International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering, 11(7), 1305-1311
- CANPOLAT ONUR, CANPOLAT KADRİYE, DEMİR HALİL İBRAHİM (2017). Second Hand Car Purchasing Problem via an Integrated Multi-Criteria Decision Making Software. MATTER: International Journal of Science and Technology, 3(1), 159-177., Doi: 10.20319/Mijst.2017.s31.159177