



**TEKSTİL SEKTÖRÜNDE PARALEL ÜRETİM  
HATTI ÇİZELGELEME PROBLEMİNİN  
SİPARİŞLERİN BÖLÜNEBİLİRLİK DURUMUNA  
GÖRE GENETİK ALGORİTMAYLA ÇÖZÜMÜ**

**Filiz IŞIK**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**2025**

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI  
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

**TEKSTİL SEKTÖRÜNDE PARALEL ÜRETİM HATTI ÇİZELGELEME  
PROBLEMİNİN SİPARİŞLERİN BÖLÜNEBİLİRLİK DURUMUNA GÖRE  
GENETİK ALGORİTMAYLA ÇÖZÜMÜ**

(Solution Of Parallel Production Line Scheduling Problem In Textile Industry With Genetic  
Algorithm Based On Divisibility Of Orders)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Filiz IŞIK

Danışman: Doç. Dr. Mustafa YILMAZ

İkinci Danışman: Prof. Dr. Özden ÜSTÜN

Erzurum  
Mayıs, 2025



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
Graduate School of Natural and  
Applied Sciences

**T.C.**  
**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ**  
**Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü**  
**TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI**

**TEKSTİL SEKTÖRÜNDE PARALEL ÜRETİM HATTI ÇİZELGELEME PROBLEMİNİN  
SIPARIŞLARIN BÖLÜNEBİLİRLİK DURUMUNA GÖRE GENETİK ALGORİTMAYLA  
ÇÖZÜMÜ**

Doç. Dr. Mustafa YILMAZ danışmanlığında, Filiz IŞIK tarafından hazırlanan bu çalışma, 09/05/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Endüstri Mühendisliği Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (.../...) ile** kabul edilmiştir.

|                         |                                                                  |                      |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Jüri Başkanı:           | Prof. Dr. Özden ÜSTÜN<br><i>Aksaray Üniversitesi</i>             | Aslı ıslak imzalıdır |
| Danışman:               | Doç. Dr. Mustafa YILMAZ<br><i>Atatürk Üniversitesi</i>           | Aslı ıslak imzalıdır |
| Jüri Üyesi:             | Dr. Öğr. Üyesi Fatma Pınar GÖKSAL<br><i>Aksaray Üniversitesi</i> | Aslı ıslak imzalıdır |
| Jüri Üyesi:             | Dr. Öğr. Üyesi Erdem AKSAKAL<br><i>Atatürk Üniversitesi</i>      | Aslı ıslak imzalıdır |
| Jüri Üyesi:             | Dr. Öğr. Üyesi Sinan ÖZTAŞ<br><i>Atatürk Üniversitesi</i>        | Aslı ıslak imzalıdır |
| İkinci Tez<br>Danışmanı | Prof. Dr. Özden ÜSTÜN<br><i>Aksaray Üniversitesi</i>             | Aslı ıslak imzalıdır |

Enstitü Yönetim  
Kurulunun .../.../.... tarih  
ve ..... sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Aslı ıslak imzalıdır  
**Prof.Dr. Alper NUHOĞLU**  
**Enstitü Müdürü**



T.C.  
**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ**

**ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU**

Yüksek Lisans Tezi olarak *Doç. Dr. Mustafa YILMAZ* danışmanlığında sunulan “Tekstil Sektöründe Paralel Üretim Hattı Çizelgeleme Probleminin Siparişlerin Bölünebilirlik Durumuna Göre Genetik Algoritmayla Çözümü” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

| Tez Bölümleri                   | Tezin Benzerlik Oranı (%) | Maksimum Oran (%) |
|---------------------------------|---------------------------|-------------------|
| Giriş                           | 3                         | 30                |
| Kuramsal Temeller               | 8                         | 30                |
| Materyal ve Metot               | 2                         | 35                |
| Araştırma Bulguları ve Tartışma | 1                         | 20                |
| Sonuçlar ve Öneriler            | 2                         | 20                |
| Tezin Geneli                    | 3                         | 25                |

**Not:** Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

| Tez Yazarı (Öğrenci)       | Tez Danışmanı              |
|----------------------------|----------------------------|
| FİLİZ IŞIK                 | DOÇ. DR. MUSTAFA YILMAZ    |
| 29.4.2025                  | 29.4.2025                  |
| İmza: Aslı ıslak imzalıdır | İmza: Aslı ıslak imzalıdır |

\* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

- ☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun .../.../... tarih ve ..... sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.
- ☐ Enstitü Yönetim Kurulunun .../.../... tarih ve ..... sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim süresince bilgi, deneyim ve rehberlikleriyle tez çalışmama değerli katkılarda bulunan danışman hocam Doç. Dr. Mustafa YILMAZ'a ve ikinci danışman hocam Prof. Dr. Özden ÜSTÜN'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Kendilerinin akademik birikimi ve yönlendirmeleri, bu çalışmanın şekillenmesinde önemli bir rol oynamıştır. Ayrıca, öğrenimim boyunca bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım tüm değerli öğretim üyelerine de şükranlarımı ifade etmek isterim.

Bu süreçte her daim yanımda olan, maddi ve manevi destekleriyle beni teşvik eden kıymetli aileme teşekkür ederim. Eğitim hayatım boyunca bana ilham kaynağı olan, varlıklarıyla motivasyonumu artıran sevgili çocuklarım Nehir ve Yusuf'a, ayrıca teşekkür ederim.

Bu akademik yolculukta emeği geçen tüm kişi ve kurumlara en derin şükranlarımı sunarım.

Tez Yazarının Adı

Filiz IŞIK

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEKSTİL SEKTÖRÜNDE PARALEL ÜRETİM HATTI ÇİZELGELEME  
PROBLEMİNİN SİPARİŞLERİN BÖLÜNEBİLİRLİK DURUMUNA GÖRE  
GENETİK ALGORİTMAYLA ÇÖZÜMÜ

Filiz IŞIK

Danışman: Doç. Dr. Mustafa YILMAZ

İkinci Tez Danışman: Prof. Dr. Özden ÜSTÜN

**Amaç:** Paralel makine çizelgeleme problemlerini ele alan çalışmalardan yola çıkarak tekstil sektöründe konfeksiyon dikim alanında paralel üretim hattı çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Çizelgeleme problemlerine bakıldığında genellikle işlerin bölünemediği varsayılmaktadır. Ancak işlerin bölünmesi, gecikmeleri önleme, müşteri memnuniyetini artırma ve makinelerdeki kapasite doluluk oranlarını yükseltme gibi fırsatlar sunabilmektedir.

**Yöntem:** Bu çalışmada, işlerin bölünemediği ve bölünebildiği ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemi için iki farklı iki amaçlı matematiksel model önerilmiştir. Birinci modelde siparişlerin bölünemediği durum ikinci modelde ise bölünebildiği durum gösterilmiştir. İkinci modelde siparişlerin hangi üretim hatlarına atanacağı ve siparişlerin hangi oranda bölüneceği belirlenmektedir. Her iki modelin amaçları, son işin tamamlanma zamanını ve teslim süresindeki gecikmeyi enküçükleme. İki amaçlı model ağırlıklı toplam yöntemiyle tek amaçlı yapıya dönüştürülmüştür. Aynı zamanda geliştirilen modeller genetik algoritma ile de kodlanarak büyük boyutlu problemlerin de çözülmesi sağlanmıştır.

**Bulgular:** Rassal türetilen test problemleri, Gams37/Cplex ve Python/3.12 çözücüsü kullanılarak önerilen modeller ile çözülmüştür. Problem literatürde NP-zor sınıfına girdiği için küçük boyutlu problemlerde gams ile en iyi çözümler elde edilmiştir. Ancak orta boyutlu ve büyük boyutlu problemlerde Gams37/Cplex ile eniyi çözüm bulunamamıştır. Genetik algoritma hem Model 1 (siparişlerin bölünemediği) hem de Model 2 (siparişlerin bölünebildiği) için geliştirilmiştir. Bu çalışmada uygulanan genetik algoritmada uygulanan stratejiler ile Model 2'deki bölünmeye izin verilmiştir.

**Sonuç:** Bu stratejiler sayesinde gerçek hayat problemi başarıyla çözülmüş olup siparişlerin bölünmesine izin verilmesiyle amaç fonksiyonlarında iyileştirme gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Paralel üretim hattı çizelgeleme, çok amaçlı programlama, genetik algoritma , siparişlerin bölünmesi.

Mayıs 2025, 69 Sayfa

## ABSTRACT

### MASTER'S THESIS

#### SOLUTION OF PARALLEL PRODUCTION LINE SCHEDULING PROBLEM IN TEXTILE INDUSTRY WITH GENETIC ALGORITHM BASED ON DIVISIBILITY OF ORDERS

Filiz IŞIK

Supervisor: Associate Prof. Dr. Mustafa YILMAZ

Co-supervisor: Prof. Dr. Özden ÜSTÜN

**Purpose:** Based on the studies addressing parallel machine scheduling problems, the parallel production line scheduling problem in the garment sewing field in the textile sector has been addressed. When looking at scheduling problems, it is generally assumed that jobs cannot be divided. However, dividing jobs can provide opportunities such as preventing delays, increasing customer satisfaction, and increasing the capacity occupancy rates in machines.

**Method:** In this study, two different dual-objective mathematical models are proposed for the unrelated parallel machine scheduling problem where jobs cannot be divided and can be divided. In the first model, the situation where orders cannot be divided is shown and in the second model, the situation where they can be divided is shown. In the second model, it is determined which production lines the orders will be assigned to and in what ratio the orders will be divided. The objectives of both models are to minimize the completion time of the last job and the delay in the delivery time. The dual-objective model is converted to a single-objective structure with the weighted sum method. At the same time, the developed models are coded with the genetic algorithm and large-scale problems are solved.

**Findings:** Randomly generated test problems were solved with the proposed models using Gams37/Cplex and Python/3.12 solver. In the problem literature, the best solutions were obtained with games for small-sized problems that are in the NP-hard class. However, the best solution could not be found with Gams37/Cplex for medium-sized and large-sized problems. Genetic update was developed for both failed Model 1 (where orders can be divided) and Model 2 (where orders can be divided). With this treatment method, the strategies applied with the genetic method allowed the division in Model2.

**Conclusion:** Thanks to these strategies, the real-life problem has been successfully solved and improvements in objective functions have been observed by allowing the orders to be split.

**Keywords:** Parallel production line scheduling, multi-objective programming, genetic algorithm, divisibility of orders.

May 2025, 69 Pages

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ETİK VE BİLDİRİM SAYFASI.....                                                        | i   |
| TEŞEKKÜR .....                                                                       | ii  |
| ÖZ.....                                                                              | iii |
| ABSTRACT .....                                                                       | iv  |
| İÇİNDEKİLER.....                                                                     | v   |
| TABLolar DİZİNİ.....                                                                 | ix  |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                                                | x   |
| KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ .....                                                 | xi  |
| GİRİŞ.....                                                                           | 1   |
| 1.Çizelgeleme Problemleri .....                                                      | 4   |
| 1.1. Çizelgeleme Problemlerinin Sınıflandırılması ve Çizelgeleme Algoritmaları ..... | 4   |
| 1.2. Paralel Makine ve Üretim Hattı Çizelgeleme .....                                | 6   |
| KURUMSAL TEMELLER.....                                                               | 8   |
| 2. Literatür Taraması .....                                                          | 8   |
| MATERYAL VE METOD .....                                                              | 13  |
| 3. Problem Tanımı .....                                                              | 13  |
| 4. İki Amaçlı Matematiksel Model.....                                                | 14  |
| 4.1. Siparişlerin Bölünemediği Durumda Paralel Üretim Hattı Çizelgeleme Modeli.....  | 15  |
| 4.2. Siparişleri Bölündüğü Durumda Paralel Üretim Hattı Çizelgeleme Modeli .....     | 17  |
| 4.3. Ağırlıklı Toplam Yöntemi .....                                                  | 19  |
| 5. Genetik Algoritma .....                                                           | 20  |
| 5.1. Siparişlerin Bölünmediği Duruma Göre Kromozom Gösterimi ve Çözüm Yapısı         | 25  |
| 5.2. Siparişlerin Bölündüğü Duruma Göre Kromozom Gösterimi ve Çözüm Yapısı ...       | 27  |
| 5.3. GA Operatörleri (Seçim, Mutasyon ve Çaprazlama) .....                           | 29  |
| 5.4. GA 'nın Parametreleri .....                                                     | 32  |
| ARAŞTIRMA BULGULARI .....                                                            | 34  |
| 6. Örnek Paralel Üretim Hattı Çizelgeleme Problemi ve Çözümü.....                    | 34  |
| 7. Test Problemleri ve Sonuçları .....                                               | 36  |
| SONUÇ VE ÖNERİLER .....                                                              | 45  |
| KAYNAKÇA .....                                                                       | 47  |
| EKLER .....                                                                          | 54  |
| EK-1 Literatür Tablosu.....                                                          | 54  |

## TABLÖLER DİZİNİ

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 1.</b> Literatürde konu ile ilgili taranan makale sayısı .....                   | 9  |
| <b>Tablo 2.</b> Tek amaçlı ve bölünebilir olan makale sayısı .....                        | 10 |
| <b>Tablo 3.</b> Çok amaçlı ve bölünebilir olan makale sayısı .....                        | 11 |
| <b>Tablo 4.</b> Model 1 İçin Çözüm Gösteriminin Kromozom Yapısı .....                     | 26 |
| <b>Tablo 5.</b> Model 2 için Çözüm Gösteriminin İlk Matrisi .....                         | 28 |
| <b>Tablo 6.</b> Model 2 için Çözüm Gösteriminin İkinci Matrisi .....                      | 28 |
| <b>Tablo 7.</b> Model1 ve Model2 için Çözüm Gösterimindeki Orijinal Matrisi .....         | 31 |
| <b>Tablo 8.</b> Model1 ve Model2 için Çözüm Gösterimindeki Mutasyon Sonrası Matrisi ..... | 31 |
| <b>Tablo 9.</b> Model 2 için Çözüm Gösteriminin İkinci Orijinal Matrisi.....              | 32 |
| <b>Tablo 10.</b> Model 2 için Çözüm Gösteriminin İkinci Mutasyon Sonrası Matrisi .....    | 32 |
| <b>Tablo 11.</b> GA 'nın Problem Boyutlarına Göre Parametre Değerleri .....               | 33 |
| <b>Tablo 12.</b> Örnek Problem Verileri .....                                             | 34 |
| <b>Tablo 13.</b> Test problemi Parametre Verileri .....                                   | 37 |
| <b>Tablo 14.</b> TP1'nin Model1(GA ve Gams) ve Model2 (GA ve Gams) ' nin Çözümlemesi ..   | 38 |
| <b>Tablo 15.</b> TP2 için Model1(GA ve Gams) ve Model2 (GA)'dan elde edilen sonuçlar..... | 39 |
| <b>Tablo 16.</b> TP3 için Model1 GA ve Model2 GA ile elde edilen sonuçlar .....           | 40 |
| <b>Tablo 17.</b> TP4'ün Model1 GA ve Model2 GA ile Çözümlemesi .....                      | 41 |
| <b>Tablo 18.</b> TP5'in Model 1 GA ve Model 2 GA ile Çözümlemesi.....                     | 42 |
| <b>Tablo 19.</b> TP6'nın Model 1 GA ve Model 2 GA ile Çözümlemesi.....                    | 43 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1. Çizelgeleme problemlerinin sınıflandırılması.....                                   | 5  |
| Şekil 2. İlişkisiz paralel makine üretim çizelgesi .....                                     | 7  |
| Şekil 3. Literatürde konuyla ilgili incelenen makalelerin bölünme durumuna göre analizi .... | 10 |
| Şekil 4. Literatür taramasına göre tek amaçlı modellerde bölünebilirlik durumu.....          | 11 |
| Şekil 5. Literatür taramasına göre çok amaçlı modellemede bölünebilirlik durum .....         | 12 |
| Şekil 6. Konfeksiyon üretim hattı .....                                                      | 14 |
| Şekil 7. Model 1 GA'ya ATY 'nin entegre edilmiş akış şeması .....                            | 22 |
| Şekil 8. Model 2 için GA'nın akış şeması.....                                                | 24 |
| Şekil 9. Model 1 ve Model 2 için ilk matris çaprazlama gösterimi .....                       | 30 |
| Şekil 10. Model 2 için ikinci matris çaprazlama gösterimi .....                              | 31 |
| Şekil 11. Örnek problemin Model1 için ATY eniyi çözümüne ait gant diyagramı .....            | 35 |
| Şekil 12. Örnek problemin Model 2 için ATY eniyi çözümüne ait gant diyagramı .....           | 35 |
| Şekil 13. TP1 Pareto yüzeyi gösterimi .....                                                  | 38 |
| Şekil 14. TP2 Pareto yüzeyi gösterimi .....                                                  | 39 |
| Şekil 15. TP3 Pareto yüzeyi gösterimi .....                                                  | 40 |
| Şekil 16. TP4 Pareto yüzeyi gösterimi .....                                                  | 42 |
| Şekil 17. TP5 Pareto yüzeyi gösterimi .....                                                  | 43 |
| Şekil 18. TP6 Pareto yüzeyi gösterimi .....                                                  | 44 |

## KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

|                  |                                          |
|------------------|------------------------------------------|
| PMÇP             | : Paralel Makine Çizelgeleme Problemi    |
| GA               | : Genetik Algoritma                      |
| YA               | : Yerel Arama                            |
| YYA              | : Yinelemeli Yerel Arama                 |
| ET               | : Enerji Tüketimi                        |
| PSO              | : Parçacık Sürü Optimizasyonu            |
| ÜHS              | : Üretim Hattı Sayısı                    |
| ÇAEA             | : Çok Aşamalı Evrimsel Algoritma         |
| TG               | : Toplam Gecikme                         |
| ÜTM              | : Üretim ve Taşıma Maliyeti              |
| TTAA             | : Tür tabanlı Açgözlü Algoritma          |
| C <sub>enb</sub> | : En büyük tamamlanma süresi             |
| MS               | : Makine Sayısı                          |
| TB               | : Tavlama Benzetimi                      |
| YA               | : Yasaklı Arama                          |
| ÜS               | : Üretim Süresi                          |
| ET               | : Enerji Tüketimi                        |
| ÇAPSO            | : Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu |
| TÖGA             | : Takviye Öğrenmeli Genetik Algoritma    |
| GKO              | : Gri Kurt Optimizasyonu                 |
| ÇAEA             | : Çok Amaçlı Evrimsel Algoritma          |
| İİS              | : İşçi İşlem Saati                       |
| ATC              | : Kurulum süresi İçeren Algoritma        |
| MBKS             | : Makine Bağlı Kurulum Süresi            |
| HDA              | : Hibrit Diferansiyel Algoritma          |
| YAKA             | : Yapay Arı Koloni Algoritması           |
| KP               | : Kar Planı                              |
| KTDP             | : Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama   |
| KA               | : Komşu Arama                            |
| MA               | : Macar Arama                            |
| ÇAMA             | : Çok Amaçlı Matsezgisel Algoritma       |
| KSO              | : Kedi Sürü Optimizasyonu                |
| SOA              | : Solucan Optimizasyon Algoritması       |
| MSA              | : Mat Sezgisel Algoritma                 |
| GOSY             | : Gelir Oranı Sezgisel Yöntemi           |

|       |                                            |
|-------|--------------------------------------------|
| MKS   | : Makine Kurulum Süresi                    |
| EM    | : Envanter Maliyeti                        |
| TS    | : Toplam Sapma                             |
| ERA   | : Emperyalist Rekabet Algoritması          |
| EYHSA | : Erken Yakınsama Harris Şahin Algoritması |
| UKA   | : Uyarlanabilir Komuşu Algoritması         |
| İPM   | : İlişkisiz Paralel Makine                 |
| KYM   | : Konfeksiyon Yardımcı malzeme             |
| ERP   | : Kurumsal Kaynak Planlama                 |
| MRP   | : Malzeme İhtiyaç Planlama                 |



## GİRİŞ

Günümüzde artan rekabet, firmaların pazar paylarını tehdit etmektedir. Firmalar, hem maliyetlerini düşük tutmak hem de kalite standartlarını koruyarak müşteriye zamanında teslimat sağlamak zorundadır. Planlama sorunları, işletmelerin çözmesi gereken en önemli konular arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, firmaların kaynaklarını stratejik hedefleri doğrultusunda etkin bir şekilde kullanabilmeleri için üretim planlama ve çizelgeleme süreçleri kritik bir rol oynamaktadır. Doğru bir planlama stratejisi, yalnızca mevcut siparişlerin zamanında karşılanmasını değil, aynı zamanda üretim süreçlerinin verimliliğinin artırılmasını da sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, etkin bir planlama, stok maliyetlerini minimize ederek işletmelerin finansal sürdürülebilirliğine katkıda bulunmaktadır.

Planlamanın öncelikli hale gelmesini sağlayan en önemli unsur, üretimin zamanında gerçekleştirilerek müşteri memnuniyetinin sağlanmasıdır. Ayrıca, gelecekteki siparişler için müşteri taleplerinin toplanması ve bu doğrultuda stratejik kararlar alınarak rakip firmalara karşı rekabet avantajı elde edilmesi hedeflenmektedir. Bu süreçte, gelişmiş veri analizi ve yapay zeka destekli sistemler, talep tahmin doğruluğunu artırarak firmaların dinamik piyasa koşullarına daha hızlı uyum sağlamasına yardımcı olmaktadır. Böylece, firmalar hem operasyonel verimliliklerini artırmakta hem de müşteri beklentilerine daha hızlı ve esnek çözümler sunabilmektedir.

Tekstil ve konfeksiyon endüstrisi, birçok ülkede sanayileşme sürecinin başladığını gösteren temel sektörlerden biridir. Tekstil ve hazır giyim, insanların temel ihtiyaçları olan beslenme, barınma ve giyinme kategorisinde yer alır. Bu nedenle, tekstil ve konfeksiyon üretimi, bir ülkede kalkınma sürecinin göstergesi olarak değerlendirilebilir. Günümüzde gelişen moda sektörüyle birlikte insanların giyime daha fazla önem vermesi, bu alandaki arz-talep dengesinin her geçen gün artmasına neden olmaktadır. Küresel düzeyde tekstil ve hazır giyim sektörü, gelişmekte olan ülkeler için ihracat gelirlerinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Çin, Hindistan, Bangladeş, Vietnam ve Türkiye gibi ülkeler, düşük maliyetli iş gücü ve yüksek üretim kapasiteleri sayesinde dünya tekstil üretiminin önemli bir bölümünü karşılamaktadır. Bu ülkeler, özellikle Avrupa ve Amerika gibi gelişmiş pazarlara ihracat yaparak küresel tedarik zincirinin önemli halkalarını oluşturmaktadır. Ayrıca tekstil sektörü, dünya genelinde kadın istihdamının en yüksek olduğu sektörlerden biri olması nedeniyle toplumsal kalkınma açısından da özel bir yere sahiptir. Sektör, hammadde üretiminden iplik ve kumaş üretimine, nihai ürün

tasarımı ve pazarlamasına kadar çok aşamalı bir yapıya sahiptir. Bu durum, çeşitli uzmanlık alanlarının oluşmasını sağlayarak sanayi çeşitliliğini desteklemektedir. Türkiye, tekstil ve hazır giyim sektöründe dünyanın önde gelen ülkeleri arasında yer almakta olup, sanayi üretiminde, dış ticaret hacminde ve istihdamında tekstil ve konfeksiyonun payı oldukça yüksektir. Özellikle Avrupa Birliği ülkelerine yapılan hazır giyim ihracatında Türkiye, Çin ve Bangladeş'ten sonra en büyük tedarikçilerden biri konumundadır. İstanbul, Bursa, Denizli, Gaziantep, Adana, Kahramanmaraş ve İzmir gibi şehirler, Türkiye'nin tekstil üretim merkezleri arasında yer almakta ve yerel ekonomilere önemli katkılar sağlamaktadır. Aynı zamanda Türkiye, güçlü pamuk üretimi altyapısı, modern üretim tesisleri ve lojistik avantajları sayesinde hem iç piyasada hem de dış pazarlarda rekabet gücünü korumaktadır

Tekstil sektörünün en büyük üretim hacmini konfeksiyon (hazır giyim) alanı oluşturur. Çünkü konfeksiyon, mamul ve yarı mamullerin estetik bir yaklaşımla bir araya getirilerek nihai ürüne dönüştüğü bölümdür. Aynı zamanda müşterilerin dikkatini çeken ve görseelliğiyle ön plana çıkan kısmı da oluşturur. Bu yönüyle, tüketicinin alım gücünü doğrudan etkileyerek pazardaki payını arttıran bir faktördür. Diğer sektörlerden farklı olarak, konfeksiyon daha fazla iş gücüne ihtiyaç duyar ve el işçiliği büyük önem taşır. Tekstil sektörü genel olarak makineleşmeye açık bir alan olsa da, konfeksiyon yani hazır giyim üretiminde detaylı dikim, kalıp hazırlama, süsleme ve kalite kontrol gibi süreçler büyük ölçüde insan emeğine dayanır. Bu nedenle, tekstil sanayisinin en emek yoğun alt dalı olan konfeksiyon, hem istihdam hem de üretim açısından kritik bir rol üstlenir.

Üretim çizelgeleme, tek makine çizelgeleme, paralel makine çizelgeleme, akış tipi atölye çizelgeleme, atölye tipi çizelgeleme, grup tipi çizelgeleme ve dolaşımli sabit atölye çizelgeleme olmak üzere çeşitli alt başlıklara ayrılmaktadır. Paralel makine çizelgeleme, birden fazla aynı işi yapan makinenin bulunduğu üretim sistemlerini ifade etmektedir (Özfırat M., 2013) . Aynı zamanda, tek makine çizelgelemenin daha karmaşık ve genişletilmiş bir hali olarak da bilinmektedir. Bu yaklaşım, işlerin hangi makineye ve hangi sırayla atanacağını belirleyerek daha etkin bir üretim süreci oluşturmayı amaçlamaktadır.

Paralel makine çizelgeleme problemleri, hem akademik araştırmalar hem de endüstriyel uygulamalar açısından büyük önem taşımaktadır (Pinedo, 2016). Gerçek dünyadaki üretim süreçlerinde, özellikle seri üretim yapan fabrikalarda ve hizmet sektöründe, kaynakların etkin kullanımı için paralel makinelerin doğru şekilde planlanması gerekmektedir (Brucker , 2001).

Bu doğrultuda, çizelgeleme sürecinde dikkate alınması gereken faktörler arasında işlem süreleri, makine bakım süreleri, iş öncelikleri ve kapasite kısıtları bulunmaktadır (Allahverdi, Ng, Cheng, & Kovalyov, 2006). (Edis, Özkarahan, & Oğuz, 2012), bağlantısız paralel parti üretimi yapan makine çizelgeleme problemlerinin çözümü için karma tamsayılı programlama yöntemleri uygulanmıştır. Bu çalışmalar, özellikle parti üretimi yapan sistemlerde etkin çizelgeleme stratejileri geliştirmeyi hedeflemektedir. Ayrıca, sezgisel optimizasyon algoritmalarının kullanımı, paralel makine çizelgeleme problemlerinin çözümünde önemli avantajlar sağlamaktadır. Çizelgeleme problemlerinin çözümünde sezgisel yöntemler, özellikle karmaşık ve dinamik sistemlerde etkili çözümler sunmaktadır. Örneğin, (Kaya&Fırlalı, 2018) çalışmasında, dinamik iş çizelgeleme problemlerini çözmek amacıyla Yerel arama ve çok amaçlı optimizasyon tekniklerini kullanarak etkin sonuçlar elde etmiştir. Gelişmiş optimizasyon teknikleri sayesinde, firmalar üretim süreçlerini daha verimli hale getirerek maliyetleri düşürebilmekte ve müşteri memnuniyetini artırabilmektedir (Pinedo, 2016).

Çizelgeleme problemleriyle ilgili literatürde, genellikle siparişlerin bölünemediği varsayımı yapılmaktadır (Saraç & Tutumlu, 2022). Ancak, siparişlerin bölünmesine izin veren üretim planları, tam zamanında teslimat süreçlerinde önemli iyileştirmeler sağlamaktadır. Bu tür planlamalar, müşterilerin işletmelere olan güvenini artırmakta ve siparişlerin sürdürülebilirliğini desteklemektedir. Siparişlerin, uygun üretim hatlarına bölünerek atanması, gecikmeleri engellemeye yardımcı olmakta ve son işin tamamlanma süresini kısaltarak üretim hatlarındaki boşlukları ortadan kaldırmaktadır. Böylece, üretim hatlarındaki doluluk oranları da artmaktadır.

Bu bağlamda, siparişlerin hem bölünememesi hem de bölünebilir olması durumları için iki amaçlı matematiksel modeller geliştirilmiş ve bu modeller Gams'in Cplex çözücüsü kullanılarak küçük boyutlu problemler için çok amaçlı yöntemlerden biri olan ağırlıklı toplam yöntemiyle çözülmüştür. Öte yandan, orta ve büyük boyutlu problemler için sezgisel bir yaklaşım olan genetik algoritma uygulanmıştır. Genetik algoritma, her iki modelde de kullanılmaktadır. Model 2'de, işletmedeki mevcut kısıtların yanı sıra birkaç strateji de geliştirilmiştir. Geliştirilen modellerin çözümleri kullanılarak, pareto yüzeyinde bulunan noktalarda karşılaştırmalar yapılmıştır.

Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde, çizelgeleme problemleri ve türleri hakkında kapsamlı bir inceleme sunulmaktadır. Üçüncü bölümde, problemimizin ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemi olmasından dolayı, ilgili literatür taraması ve mevcut çözüm yaklaşımları detaylı bir şekilde ele alınmaktadır. Dördüncü bölümde, tekstil sektöründeki üretim hattı

planlama probleminin tanımı yapılarak, bu probleme ilişkin matematiksel model sunulmaktadır. Beşinci bölümde, ağırlıklı toplam yöntemi ile genetik algoritma yapısının açıklanmasının ardından, siparişlerin bölünme durumunda elde edilen pareto yüzeyindeki noktaların hangi yöntemle daha iyi çözüldüğü tartışılmaktadır. Altıncı bölümde, örnek bir problem ele alınarak buna uygun Gantt şeması çizilmekte ve test problemlerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmaktadır. Son olarak, yedinci bölümde gerçek dünya problemleri üzerinden bir analiz yapılarak, işletmelere daha uygun planlar yapılmasını sağlayacak modellerin literatüre katkıları ve bölünebilirlik durumları için farklı stratejilerin geliştirilmesi gerektiği vurgulanmakta, ayrıca farklı sezgisel yöntemlerin kullanımına yönelik öneriler sunulmaktadır.

## **1.Çizelgeleme Problemleri**

Çizelgeleme, üretim ve hizmet sektörlerinde sınırlı kaynakların belirli işlere veya görevlere atanması sürecidir. Bu süreç, belirli performans ölçütlerini en iyi şekilde karşılayacak şekilde planlanır. Örneğin, bir metal fabrikasında üretim çizelgeleme, işlerin ve bu işlere ait operasyonların makinelere hangi sırayla atanması gerektiğini belirleyerek, son siparişin tamamlanma zamanını en aza indirmeyi hedefler (Kaçar & Olgun, 2020). Çizelgeleme problemleri, belirli bir performans ölçütünü eniyileyecek şekilde işlerin yapılma sırasını belirlemeyi amaçlar (Dağ, 2012).

Sonuç olarak, çizelgeleme, sınırlı kaynakların etkin kullanımını sağlayarak üretim ve hizmet süreçlerinin verimliliğini artırmayı hedefleyen kritik bir planlama sürecidir.

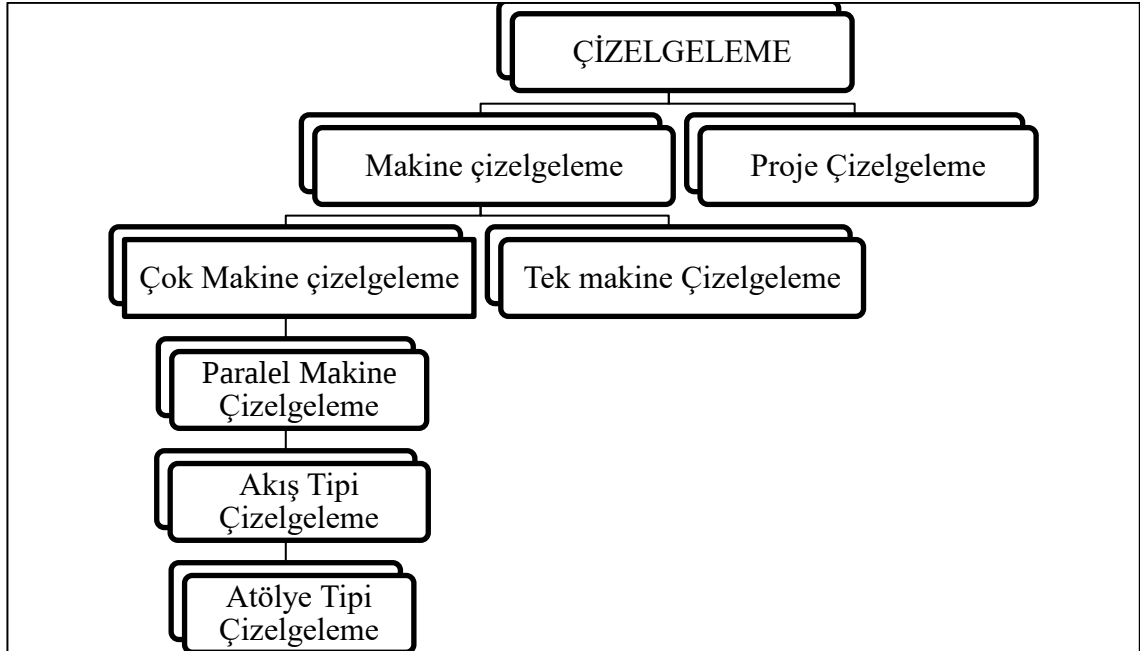
### **1.1. Çizelgeleme Problemlerinin Sınıflandırılması ve Çizelgeleme Algoritmaları**

Çizelgeleme problemleri, üretim ve hizmet sektörlerinde karşılaşılan, sınırlı kaynakların belirli işler veya görevlerle en verimli şekilde eşleştirilmesi amacıyla çözülmesi gereken kritik optimizasyon problemleridir. Bu problemler, belirli performans ölçütlerinin en etkin şekilde karşılanması için iş sıralamaları ve kaynak atamaları üzerinde yoğunlaşmaktadır. Çizelgeleme problemleri genel olarak beş farklı kategoriye ayrılabilir.

Tek Makine Çizelgeleme Problemleri yalnızca bir makine veya kaynağın mevcut olduğu durumlarda, işler arasında optimal sıralamanın belirlenmesine odaklanır. Temel düzeyde bir problem olmasına rağmen, üzerine eklenen kısıtlamalar ve hedefler, problemin karmaşıklığını artırabilmektedir. Tek bir makine altında, ilk kriterin üretim süresini en aza indirmek ve diğerinin kaynak tüketim maliyetini en aza indirmek olduğu bir bikriterli planlama

modeli tanıtılmıştır. Tek makine çizelgeleme problemleri ,  $p_j$  ,  $j=1,2,3,...,n$  işlem süreleri olan tek bir makinede  $n$  işi  $j_1, j_2, j_n$  zamanlamasını yapar (Gonzalez & Framinan, 2018).

Çok Makine Çizelgeleme Problemleri, birden fazla makine veya kaynağın kullanıldığı durumlar, bu tip problemleri oluşturur. İşlerin hangi makinede ve hangi sırayla yapılacağı konusu ele alınırken, paralel makinelerin etkin bir şekilde kullanılması sağlanmaya çalışılır. Bu tür problemler genellikle daha özel çözüm yöntemleri gerektiren, karmaşık algoritmalarla çözülür. Paralel makine çizelgelemesinde, birden fazla makineler aynı türde olup işler bu makineler arasında dağıtılır. Burada en yaygın kullanılan amaç, makineler arasındaki iş yükünü dengeli bir şekilde dağıtarak toplam tamamlanma süresini minimize etmektir. Akış tipi çizelgeleme, işler belirli bir sıralamayı takip ederek ardışık makinelerde işlem görmektedir. Genellikle üretim hattı gibi düzenlerde işler sabit bir işlem sırasına bağlı olarak yapılır ve burada hedef, bu işlemleri optimize ederek toplam süreyi kısaltmaktır. Atölye tipi çizelgeleme ise daha karmaşık bir yapıya sahip olmaktadır. Çünkü her işin farklı makinelerdeki işlem sırası değişkenlik göstermekte ve makineler arasında işler farklı zamanlarda ve sıralarda işlem görmektedir. Bu türde, işler arasındaki bağımlılıklar ve makinelerdeki esneklik, çizelgeleme problemini daha zorlu hale getirmektedir. Çoklu makine planlaması, bir görevi planlamaktan üretim süreçlerini optimize etmeye kadar çeşitli önemli gerçek yaşam sorunlarını modelleyen temel bir planlama problemidir (Pinedo, 2016).



Şekil 1. Çizelgeleme problemlerinin sınıflandırılması

Çizelgeleme problemleri, çoğunlukla bir optimizasyon problemi olarak ele alınır ve bu problemlerin çözümünde çeşitli algoritmalar kullanılmaktadır. Bu algoritmalar genel olarak iki ana grupta toplanabilmektedir. Kesin çözüm yöntemleri olarak dinamik programlama, lineer programlama ve tam sayılı programlama gibi matematiksel yöntemler, genellikle daha küçük ölçekli problemlere uygulanır. Ancak, bu yöntemler büyük ölçekli problemlerle karşılaşıldığında verimlilik açısından yetersiz kalabilmektedir. Yaklaşık çözüm yöntemleri ise genetik algoritmalar, tavlama benzetimi, yasaklı arama ve koloniler optimizasyonu gibi meta-sezgisel yöntemler, büyük ölçekli çizelgeleme problemleri için daha etkili çözüm seçenekleri sunar. Bu yöntemler, çok sayıda çözüm olasılığını hızlı bir şekilde değerlendirme kapasitesine sahip olup, optimal çözüme ulaşılan kadar evrimsel süreçler kullanarak problem üzerinde iyileştirmeler yapmaktadır.

Sonuç olarak, çizelgeleme problemleri, işlerin veya kaynakların en verimli şekilde atanmasıyla doğrudan ilişkili olup, üretim ve hizmet süreçlerinin etkinliğini artırmak için kritik bir öneme sahiptir. Bu optimizasyon süreçlerinin başarılı bir şekilde uygulanması, yalnızca zaman kayıplarını engellemekle kalmaz, aynı zamanda maliyetlerin azaltılmasına, müşteri memnuniyetinin artırılmasına ve iş akışlarının daha düzenli ve verimli hale gelmesine katkıda bulunur.

## **1.2. Paralel Makine ve Üretim Hattı Çizelgeleme**

Paralel makine çizelgeleme problemi (PMÇP), bir dizi işin (siparişin) birden fazla paralel makineye atanmasını içerir. İşletmeler, bu süreçte üretkenliği artırmak ve kaynak kullanımını optimize etmek için çeşitli algoritmalarından faydalanır. Bu kapsamda, sezgisel ve meta-sezgisel yöntemler, büyük ölçekli problemlerin çözümünde önemli bir rol oynamaktadır (Ruiz, Maroto, & Alcaraz, 2006). Bu problem, üretim süreçlerinde ve hizmet sistemlerinde yaygın olarak karşılaşılan bir optimizasyon problemidir. Özellikle büyük veri setlerine sahip üretim sistemlerinde, makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlar da paralel makine çizelgeleme problemlerinde etkili çözümler sunmaktadır (Zhang et al., 2020).

Paralel makineler, eşdeğer, heterojen veya bağımsız olarak üçe ayrılmaktadır.

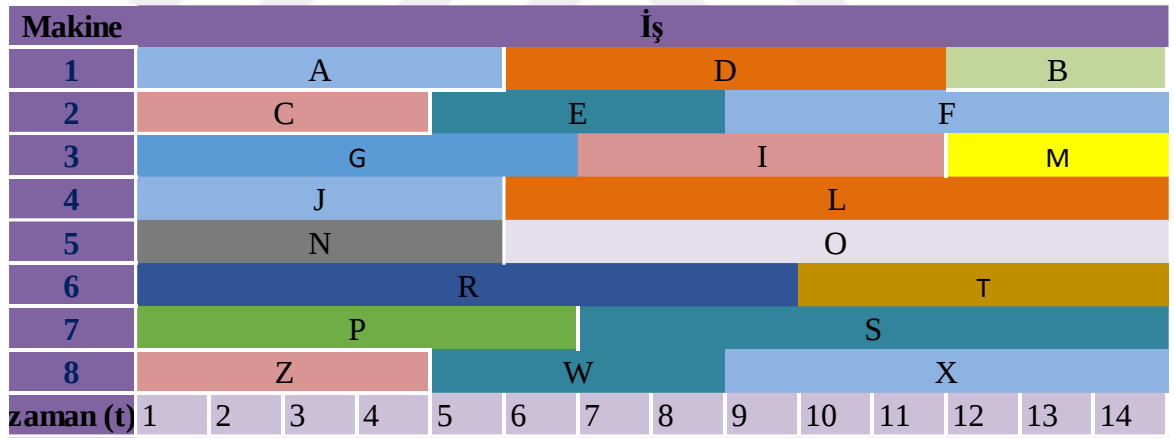
Eşdeğer Paralel Makineler: Tüm makineler aynı kapasiteye sahiptir ve bir iş herhangi bir makinede aynı sürede tamamlanmaktadır. Bu tür problemler için genetik algoritmalar ve yerel arama gibi optimizasyon teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Pinedo, 2016).

Heterojen Paralel Makineler: Makineler farklı hızlara sahiptir, ancak işler belirli oranlarda ölçeklenmektedir. Heterojen makineler için çizelgeleme algoritmaları, enerji tüketimi ve üretim maliyetlerini minimize etmek için geliştirilmiştir (Liu et al., 2018).

İlişkisiz Paralel Makineler (İPM): Her iş, farklı makinelerde farklı işleme sürelerine sahip olmaktadır. Bu durumda, matematiksel modelleme teknikleri ve doğrusal programlama yöntemleri kullanılmaktadır (Jatinder N.D. Gupta, 2006).

Paralel makine çizelgeleme problemlerinde genellikle makespan minimizasyonu ( $C_{max}$ ), toplam tamamlanma süresi minimizasyonu veya toplam gecikme süresi minimizasyonu gibi hedef fonksiyonlar kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak, enerji verimliliği ve bakım süreleri gibi ek kısıtlar da son yıllarda çalışmaların odağı haline gelmiştir

Paralel Üretim hattı çizelgeleme, bir ürünün üretim sürecinde farklı aşamalardan geçtiği çok aşamalı üretim sistemlerini planlamayı içermektedir. Bu tür sistemlerde, esnek üretim hatlarının modellenmesi ve akıllı fabrika uygulamalarına entegrasyonu da önemli bir araştırma alanıdır. Ele alınan problemde PMÇP'den yararlanarak konfeksiyon işletmesindeki üretim hatlarının çizelgelenmesi ele alınmaktadır ve çalışma bu konu üzerine özelleşmektedir. Bu bağlamda, karma sezgisel algoritmaların kullanımı, büyük ölçekli tekstil üretim planlamasında önemli avantajlar sağlamaktadır. İPM düşünülerek birbirinden bağımsız olan paralel makinelere yani üretim hatlarına t. zamanda siparişlerin çizelgelenmesi Şekil 2'de basit bir şekilde gösterilmektedir.



Şekil 2. İlişkisiz paralel makine üretim çizelgesi

### 2. Literatür Taraması

Paralel makine çizelgeleme problemlerinde makinelerin özdeş olup olmama durumu, sıra bağımlılık durumu ve bölünebilirlik durumu önem arz etmektedir. Paralel makine çizelgeleme problemleri,  $n$  iş ve  $m$  makineden oluştuğu için ve bunun sonucunda  $(n!)^m$  kadar plan oluştuğundan NP-Zor problemler arasında yer almaktadır (Liu, 2009). Tüm işler, zamanında teslimatı sağlayabilmek için, alt işlere bölünebilmektedir. İşlerin bölünmesi durumu, özellikle de paralel makinelerde, literatürde nadiren çalışılmıştır. Problemin NP-zor yapısından dolayı, gerçek hayata dair, büyük boyutlu problemlerin çözümü için sezgisel ve meta-sezgisel yöntemler kullanılmaktadır (Eroğlu Y. Duygu, Özmutlu, & Köksal, 2014) . (Villa, Vallada, & Fanjul-Peyro, 2018), ilişkisiz paralel makine çizelgelemeye ek kısıtlar ekleyerek sezgisel yöntemleri matematiksel yöntemlerle karşılaştırmıştır.

Sezgisel yöntemler, geçerli dayanağı olan bir yöntemin izlenmesi ve belirli varsayımların yapılması ile problemin çözümüne yönelik yaklaşık sonuçlar verir (Kılıç, 2023). Kesin çözüm yöntemleri ise eniyi çözümü garanti edebilmekle birlikte NP-zor problemlerin büyük boyutlu olanlarına istenen süre zarfında çözüm bulabilmeleri zordur (Şenbay, 2021). Paralel makine çizelgeleme problemlerinde bulanıklık konusu da işlenmektedir (Yeh, Lai, Lee, & Chuang, 2014).Çünkü parametreler her zaman kesin ve net değildir. Öğrenme eğrileri de konularak işlerin süreleri ile ilgili veriler bulunmaktadır.

İşletmede ele alınan problemde, firmaya gelen siparişleri üretim hatlarında termin zamanına göre yerleştirmek müşteri memnuniyeti açısından önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle siparişlerin zamanında üretimin sağlanması için siparişlerin üretim hatlarına bölünerek planlanması, bölünmeden yapılan planlamaya göre daha iyi bir sonuç vereceği düşünülmüştür. Üretim hattı çizelgeleme problemi literatürüne baktığımızda tekstil sektöründe paralel makine çizelgelemede, hazırlık süreli, işler 0 zamanında hazır, özdeş ve bölünebilirlik özelliğine sahip olan bir problem türüdür. (Eroğlu Y. Duygu, Özmutlu, & Köksal, 2014), çalışmalarında dokuma tezgahlarında ilişkisiz paralel makine üretim çizelgeleme problemini ele almışlardır. Bahsedilen konuda işlerin bölünmesi ile tamamlanma zamanını en küçüklenmesi yönünde pozitif bir etki olduğunu sezgisel algoritma ile çözülerek tanımlanmıştır. (Wang, Liu, Zhang, & Zeng, 2016), yılındaki çalışmalarında işlerin bölünme ve öğrenme durumunu ele alarak işlerin tamamlanma süresini enküçüklemişlerdir. ( Kim & Kim, 2020), tekstil sektöründe makinelerin arıza ve kesintilerinden dolayı işlerin bölünmesinin başlama zamanı ile gerçekte başlama zamanı arasındaki sapmayı minimize edecek bir planlama öne sürmüştür. Son yıllarda, paralel makine çizelgeleme problemlerinde yeni sezgisel ve meta-sezgisel yaklaşımlar geliştirilmiştir.

Örneğin, sıraya bağımlı hazırlık süreli özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme probleminde en büyük tamamlanma zamanı, en büyük gecikme ve toplam erken/geç bitirme gibi amaç fonksiyonlarını dikkate alarak meta-sezgisel yöntemler içeren bir karar destek modeli geliştirilmiştir (Sarıçiçek, 2018). Makine kurulum süresi ve envanter maliyetini en küçüklemek amacıyla karma tamsayılı programlama yaklaşımı kullanılmıştır (Carvalho & Nascimento, 2022). Ayrıca, işlerin maksimum tamamlanma süresini en küçüklemek için iki aşamalı açgözlü bir algoritma geliştirilmiştir (Mourtos, Vatikiotis, & Zois, 2023).

İşlerin bölünebilirliği ile ilgili olarak da çeşitli çalışmalar yapılmıştır. (Saraç ve Tutumlu 2022), işlerin bölünmesinin, daha dengeli ve daha kısa zamanda üretim yapılmasına faydasını iki aşamalı mat-sezgisel algoritma ile göstermiştir.

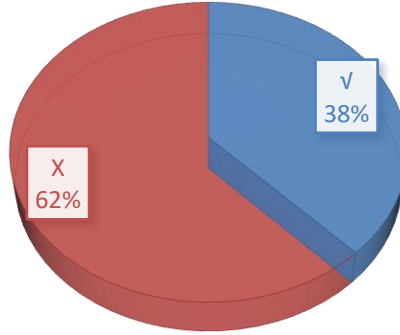
Paralel makine çizelgeleme problemlerinden türetilmiş olan paralel üretim hatlarının çizelgelenmesi son zamanlarda yoğun olarak çalışılmıştır. (Saraç ve Tutumlu 2022) En çok da son işin tamamlanma zamanını yani  $C_{enb}$ 'ün en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Bunun yanı sıra toplam gecikmeyi, geciken iş sayısını ve kullanılan makina sayısını en küçüklemekte amaçlar arasında yer almaktadır. Sıra bağımlı, hazırlık süreli, özdeş ve özdeş olmayan paralel makine problemleri çeşitli versiyonlar ile ele alınmıştır. Yapılan literatür taraması, paralel makine çizelgeleme problemlerinde genellikle işlerin maksimum tamamlanma süresini en küçüklemenin amaçlandığını ve sezgisel/meta-sezgisel yöntemlerin büyük boyutlu problemlerin çözümünde sıkça tercih edildiğini göstermektedir. Ayrıca, işlerin bölünebilir olmasıyla ilgili çalışmaların sayısının artmakta olduğu ve bu konunun farklı optimizasyon teknikleri ile ele alınmaya devam ettiği görülmektedir.

Literatüre genel bir bakış yapıldığında, siparişlerin bölünebilir ve bölünemez olma durumları, ekler bölümünde sunulan tablo temel alınarak 2013–2025 yılları arasındaki çalışmalar açısından analiz edilmiş ve bu analiz Tablo 1’de sayısal verilerle ortaya konulmuştur. Söz konusu analiz, özet niteliğinde Şekil 3’te grafiksel olarak da sunulmuştur.

**Tablo 1.** Literatürde konu ile ilgili taranan makale sayısı

| Bölünme Durumu      | Literatürde konu ile ilgili taranan makale sayısı |
|---------------------|---------------------------------------------------|
| √                   | 14                                                |
| X                   | 23                                                |
| <b>Genel Toplam</b> | <b>37</b>                                         |

### LİTERATÜRDE KONU İLE İLGİLİ TARANAN MAKALE SAYISI



**Şekil 3.** Literatürde konuyla ilgili incelenen makalelerin bölünme durumuna göre analizi

Literatür taraması için yapılan tabloya baktığımızda amaç fonksiyonu olarak en çok  $C_{enb}$  en küçükleme. Tek amaçlı makalelerde ise daha çok sezgisel yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemlerden bazıları, karınca sürüsü algortiması (Arnaout, 2020), adapte edilmiş komşu yerel arama algoritması (Cota, Guimar, Oliveira, & Souza, 2017), genetik algoritma ile komşu arama yaklaşımı (Abreu & Prata, 2019), yaklaşımlar karşımıza çıkmaktadır. (Wang, Wang, Zhao, Zhang, & Xu, 2012) tek amaçlı modelleme ile Hibrit evrimsel yaklaşım algoritmasını işlerin bölünmesine göre kullanmıştır. İşlerin maksimum tamamlanma süresini enküçüklemekten sonra teslim zamanındaki en küçükleme ile ilgili makaleler yazılmıştır. Ancak genellikle bu iki amaç fonksiyonu tek tek ele alınmıştır.

Tablo 2’de konu ile ilgili taradığımız literatüre baktığımızda hem tek amaçlı olup hem de bölünebilir olan makalelerin sayısı verilmiştir. Bu analiz ekte verilen literatür taramasından faydalanarak yapılmıştır.

**Tablo 2.** Tek amaçlı ve bölünebilir olan makale sayısı

| Bölünme Durumu                | Literatürde konu ile ilgili taranan makale sayısı |
|-------------------------------|---------------------------------------------------|
| Tek amaç & Bölünebilir        | 8                                                 |
| Bölünmeyen & Tek amaç olmayan | 29                                                |

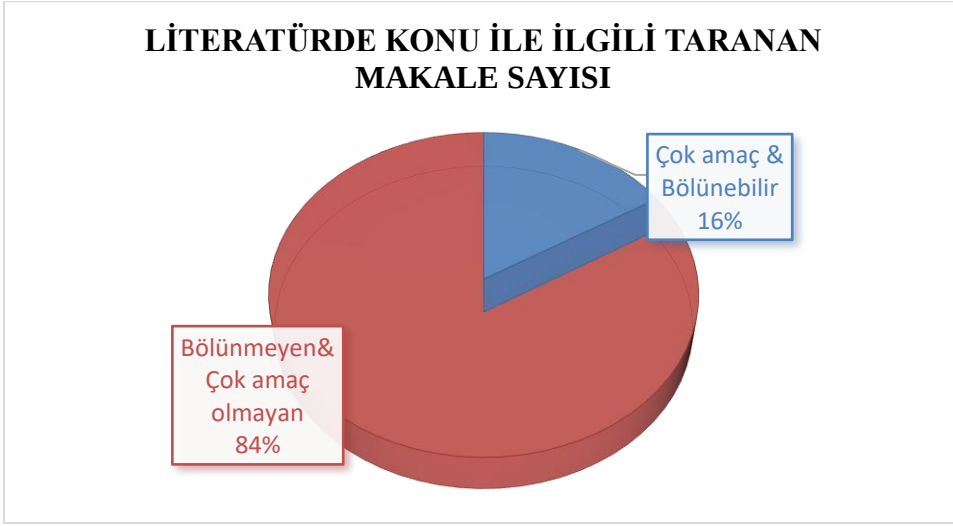


**Şekil 4.** Literatür taramasına göre tek amaçlı modellerde bölünebilirlik durumu

Çok amaçlı programlama kullanılan makalelerde de bölünme durumu nadir kullanılmıştır. Şekil 4 ‘de tek amaçlı modellerde bölünebilirlik durumu gösterilmiştir. (Wang, Wang, Zhao, Zhang, & Xu, 2012) Çok amaçlı modelleme tekniklerinde ise en çok ağırlıklı toplam yöntemi kullanılmıştır. (Tapkan 2017), AHP teknikleri ile normalize edilmiş olup ağırlıklı toplam yöntemi kullanılmıştır. (Kaya ve Karaçizmeli 2018), (Solomani vd. 2019) ve (Carvalho 2021) ağırlıklı toplam yöntemi uygulamıştır. (Ceylan vd. 2019), hedef programlama teknikleri ile katsayıları ağırlık verilerek amaçları minimize etmiştir. (Saraç ve Tutumlu 2022), epsilon kısıt yöntemi uygulamıştır. Ostovarîa vd., 2024, maliyeti ve tamamlanma süresini enküçüklemiştir. Tablo 3’ de konu ile ilgili taradığımız literatüre baktığımızda hem çok amaçlı olup hem de bölünebilir olan makalelerin sayısı verilmiştir. Şekil 5’ de ise çok amaçlı modellerin bölünebilirlik durumu gösterilmiştir.

**Tablo 3.** Çok amaçlı ve bölünebilir olan makale sayısı

| Bölünme Durumu                | Literatürde konu ile ilgili taranan makale sayısı |
|-------------------------------|---------------------------------------------------|
| Çok amaç & Bölünebilir        | 6                                                 |
| Bölünmeyen & Çok amaç olmayan | 31                                                |



**Şekil 5.** Literatür taramasına göre çok amaçlı modellemede bölünebilirlik durum

Sonuç olarak, son on iki yılda yapılan güncel akademik çalışmalar ve yayımlanan makaleler incelendiğinde, siparişlerin bölünebilirliğini dikkate alan ve çok amaçlı (multi-objective) çizelgeleme problemlerine odaklanan çalışmaların sayısında belirgin bir artış olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, üretim ortamlarının giderek daha karmaşık ve dinamik hâle gelmesiyle birlikte, geleneksel çizelgeleme yaklaşımlarının yetersiz kalmasının bir sonucu olarak değerlendirilebilir. Literatürde, söz konusu karmaşık problemlerin çözümünde sezgisel ve özellikle de metasezgisel yöntemlerin daha yaygın olarak tercih edilmeye başlandığı görülmektedir. Genetik algoritmalar, tabu arama, parçacık sürü optimizasyonu gibi yöntemler, bu tür problemlerde başarılı sonuçlar vermektedir. Bununla birlikte, tek bir sezgisel yöntemin her senaryoda optimal ya da yeterli çözüme ulaşması zor olabildiğinden, son yıllarda hibrit sezgisel yöntemlerin geliştirilmesine yönelik ilgi artmıştır. Bu yaklaşımlar, birden fazla algoritmanın güçlü yönlerini birleştirerek daha etkili ve esnek çözümler sunmayı amaçlamaktadır.

Özellikle çok amaçlı optimizasyon bağlamında, bu tür hibrit yöntemlerin hem çözüm kalitesini artırdığı hem de hesaplama süresini azaltarak uygulama açısından daha verimli sonuçlar sunduğu çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur. Bu bağlamda, gelecekteki çalışmaların, hem problem tanımlarında daha gerçekçi kısıtlar içermesi hem de geliştirilen algoritmaların endüstriyel uygulamalara entegrasyonu yönünde ilerlemesi beklenmektedir.

## MATERYAL VE METOD

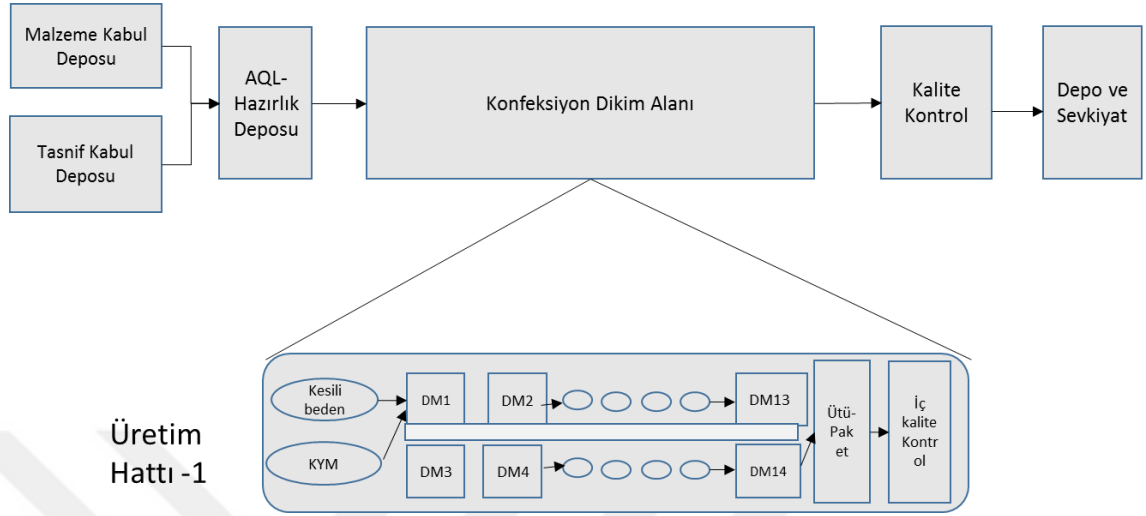
### 3. Problem Tanımı

Çalışmanın yapıldığı tekstil firması, ülkemizde fason üretim yapan birçok firma ile çalışmakta olup yurt dışına ihracat yapmaktadır. Siparişler, işletmenin üretim kapasitesine göre sezonlara uygun bir şekilde belirli aralıklarla gelmektedir. Bu siparişlerin üretimi için işletme kumaş alımından yardımcı malzeme alımına kadar tedarik sağlamaktadır. Gerekli iş gücü için ise fason veya kendi bünyesinde sipariş üretimini gerçekleştirmektedir. Firma, Türkiye'deki tekstil sektöründe öncü firmalardan biridir. Birçok ünlü giyim markasına üretim yapmakta olup daha çok seri üretim yapılacak ürün grupları ile çalışılmaktadır. Basic t-shirt, short, polo t-shirt gibi spor giyim ürünleri üretmektedir. Barınma ve beslenme gibi, giyinme de insanın temel ihtiyaçlarından biridir. Bu doğrultuda, tekstil sektöründe hazır giyim; yoğunlaşan iş temposu ve artan zaman baskısı nedeniyle insan hayatına pratiklik ve konfor kazandırarak, sürekli değer kazanan bir alan hâline gelmiştir. Türkiye'de tekstil sektörü, dünya çapında üretim yaptığı için hazır giyim açısından büyük önem arz etmektedir. Gerek iş gücü ucuzluğu gerekse pazarlama durumu göz önüne alındığında Türkiye, dünya çapında üretim yapılmasının tercih sebeplerindendir.

Firma iplik üretiminden, kumaş boyamaya, kumaş boyamadan hazır giyim dikim aşamasına kadar siparişlerini yönetmektedir. Firma tüm bu siparişleri yönetirken ERP ve MRP programları kullanmaktadır. MRP programları müşteri temsilcileri ile bağlantılıdır. Firmaya tedarik edilmesi gereken Konfeksiyon Yardımcı Malzeme (KYM) bilgileri yüklenip tedarigi bu şekilde sağlanmaktadır. Böylelikle üretilen ürünler, orijinal malzeme kullanarak kalite standartlarına uygun şekilde üretilmektedir.

Uygulama, tekstil firmasının konfeksiyon bölümünde kesili beden olarak gelen siparişlerin koli kapanana kadar ki sürecini kapsamaktadır. Siparişler için verilen üretim dakikasına ve teslim zamanına göre üretim planlama yapılmasını hedeflemektedir. Firma gelen siparişleri ilgili fason firmaya veya bünye içerisindeki üretim hatlarına kapasite yükü olarak atamaktadır. Daha sonra siparişler için gerekli KYM bilgisi, dikiş detayı incelenip gerekli numune, malzeme tedarigi ve kesili bedenler hazırlık ekibi ile sağlanarak üretim konfeksiyon alanına sevk edilir. Bu işlemler arasında makine bakım bölümü de üretim hattındaki şeflerle birlikte ihtiyaç duyulan makineleri ayarlayarak üretim hatlarını hazırlamaktadır. Siparişlerdeki kesili bedenler, konfeksiyon yardımcı malzemeleri ile üretim hattına sipariş adetinin yüzde 3 firesi ile gelerek üretime alınmaya başlanır. Bunun öncesinde üretilen siparişlerin kaliteli çıkabilmesi için beş tane ürün ön dikim olarak yapıp kalite onayı alınarak üretime koyulmaktadır. Bu kalite onayının alınması için dikilen ürünler endirekt elemanları kalite

kontrol elemanları ve şefi ile yapılır. Onayı alınmayan siparişler üretime verilememektedir. Tüm bu bahsedilen aşamalar sipariş için gerekli hazırlık süresi işlem süresi ve teslim süresini kapsamaktadır. Şekil 6’ da üretim hatlarının hazırlık ile bitmiş ürün arasındaki durumu gösterilmiştir.



**Şekil 6.** Konfeksiyon üretim hattı

Ele alınan problem, firmanın işlettiği konfeksiyon dikim bölümüne sahip olan fason firmadaki üretim planlama süreci göz önüne alınarak tanımlanmıştır. Fason firmaya gönderilen işin zamanında teslim edilebilmesi için öncelikle doğru iş yükünün tanımlı olması gerekmektedir. İşletmede net bir üretim çizelgeleme yapılamadığı için gönderilen iş yüküne göre üretim yapılarak gerekli hazırlık süreleri göz ardı edildiğinde fason firma teslimatta gecikme yaşamakta bu da müşteri memnuniyetsizliğine sebep olmaktadır. Bu nedenle siparişlerin teslim zamanına yetişmesi için işlem süreleri ve hazırlık süreleri de ele alınarak en kısa tamamlanma süresi ile siparişlerin çizelgelenmesi amaçlanmıştır. Siparişlerin gecikmesini önlemek amacıyla siparişlerin bölünmesi durumu da incelenmiştir. Ancak işlerin birden fazla üretim hattına bölmek kalite sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Bu durumda geliştirilen modelde kaliteden ödün vermemek için işlerin en fazla iki parçaya bölünmesine izin verilmiştir.

#### 4. İki Amaçlı Matematiksel Model

Paralel üretim hattı çizelgeleme probleminde üretim hatları makinaları, siparişler ise işleri temsil etmektedir. Fason işletmeye gelen  $n$  tane sipariş, sıfırıncı zamanda üretime hazırdır. Siparişlerin işlem süreleri, hazırlık süreleri ve teslim zamanları bilinmektedir. Siparişlerin atanacağı üretim hattında ise özdeş ve paralel olma durumu söz konusudur. Üretimde  $n$  adet sipariş ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) ve  $h$  adet üretim hattı ( $O = 1, 2, \dots, h$ ) mevcuttur.

Çalışmada ilk olarak üretim hatlarında işlerin bölünmesine izin verilmediği durum, literatürde Tutumlu ve Saraç (2021) tarafından verilen matematiksel modellerden yararlanılarak tekstil sektörüne uyarlanmıştır. Matematiksel modeller kurulurken başlangıç hazırlık süreleri dikkate alınmamıştır. Problemde termin süreleri müşteri tarafından belirlendiği için gecikmeler istenmemektedir. Üretimler sipariş bazlı olup doğrudan müşteriden gelen talebe göre yapılmaktadır. Fason firmada stoka üretim yapılmamaktadır.

Problem, özdeş  $h$  adet üretim hattında siparişler arasında hazırlık süresi bulunmaktadır. Hazırlık süresi sıra bağımlı değildir. Çünkü firma aynı stilde ürün dikmektedir. Basic t-shirt üretimi yapıldığı ve farklı stile geçilmediği için hazırlık süresi sıradan bağımsızdır. Amaç fonksiyonları eş zamanlı olarak  $C_{enb}$ 'ü ve toplam gecikmeyi enküçüklemeyi amaçlamaktadır. İki amaçlı matematiksel model izleyen şekilde tanımlanmıştır.

#### **4.1. Siparişlerin Bölünemediği Durumda Paralel Üretim Hattı Çizelgeleme Modeli**

İşlerin Bölünmesine izin vermeyen Model1 kümeleri, indisleri, parametreleri karar değişkenleri, amaç fonksiyonları ve kısıtları aşağıda verilmiştir.

*Kümeler:*

$N = \{1, 2, \dots, n\}$  sipariş kümesi,

$O = \{1, 2, \dots, h\}$  hat kümesi,

*İndisler:*

$i, j \in N$  sipariş indisi,

$l \in N$  sıra indisi,

$k \in O$  hat indisi,

*Parametreler:*

$n$  : sipariş sayısı,

$h$ : hat sayısı,

$p_{ik}$ :  $i$ . siparişin  $k$ . hattaki işlem süresi,

$d_i$ :  $i$ . siparişin teslim zamanı,

$M$ : Çok büyük pozitif bir sayı,

$s_{ik}$ :  $i$ . siparişin  $k$ . hattaki hazırlık süresi

*Karar Değişkenleri :*

$C_i$  :  $i$ . siparişin tamamlanma zamanı

$C_{enb}$  :  $h$  adet hat içinden son siparişin tamamlanma zamanı,

$T_i$ : $i$ . siparişinin gecikmesi ( $T_i = \max\{C_i - d_i, 0\}$ ),

$y_{ikl}$ : eğer  $i$ . sipariş  $k$ . hatta  $l$ . sıraya çizelgelendiye 1, diğer durumlarda 0,

*Amaç Fonksiyonları:*

$$\text{Enk } f_1 = C_{enb} \quad (1)$$

$$\text{Enk } f_2 = \sum_{i=1}^n T_i \quad (2)$$

1. ve 2. fonksiyonlar, sırasıyla siparişlerin enbüyük tamamlanma süresini ve toplam gecikme süresini enküçükleyen amaç fonksiyonlarıdır.

$$C_{enb} \geq C_i, \quad \forall i \quad (3)$$

3. eşitsizlik  $i$ . siparişin tamamlanma zamanı  $C_{enb}$ 'den küçük olmalı kısıtlarıdır.

$$\sum_{i=1}^n y_{ikl} \leq 1, \quad \forall (k, l) \quad (4)$$

4. eşitsizlik her hattaki her sıraya da en fazla 1 sipariş atanmalı kısıtlarıdır.

$$\sum_{k=1}^h \sum_{l=1}^n y_{ikl} = 1, \quad \forall i \quad (5)$$

5. eşitlik, her siparişin bir hatta ve bir sıraya atanmasını sağlama kısıtlarıdır.

$$\sum_{i=1}^n y_{ikl} - \sum_{j=1}^n y_{jkl-1} \leq 0, \quad \forall (k, l), l > 1 \quad (6)$$

6. eşitsizlik siparişlerin sıra atlamadan sıralanmasını sağlama kısıtlarıdır.

$$C_i + M(1 - y_{ikl}) \geq s_{ik} + p_{ik}, \quad \forall (i, k), l = 1 \quad (7)$$

$$C_i - M(1 - y_{ikl}) \leq s_{ik} + p_{ik}, \quad \forall (i, k), l = 1 \quad (8)$$

7. ve 8. Eşitsizlikler, ilk hatta atanan ilk siparişin tamamlanma zamanı işlem süresi ile hazırlık süresi toplamı kadar olmalı kısıtlarıdır.

$$C_i + M(2 - y_{ikl} - y_{jk1-1}) \geq C_j + p_{ik}, \quad \forall i \neq j, \forall k, l > 1 \quad (9)$$

$$C_i - M(2 - y_{ikl} - y_{jk1-1}) \leq C_j + p_{ik} \quad \forall i \neq j, \forall k, l > 1 \quad (10)$$

9. ve 10. eşitsizlikler, sonraki sırada hatta atanan  $i$ . siparişin tamamlanma zamanından yeni siparişin tamamlanma zamanı ile işlem süresi toplamı kadar olmalı kısıtlarıdır.

$$T_i \geq C_i - d_i, \quad \forall i, k, l \quad (11)$$

11. eşitsizlik, siparişlerin gecikmelerini hesaplayan kısıtlardır.

$$C_{enb} \geq 0, \forall i, k, l \quad (12)$$

$$T_i \geq 0, \forall i \quad (13)$$

$$y_{ikl} \in \{0,1\}, \forall i, k, l \quad (14)$$

$$C_i \geq 0, \forall i \quad (15)$$

12-15. eşitsizlikler, karar değişkenlerinin işaret kısıtlarıdır.

Yukarıda tanımlanan matematiksel modele dayanarak, işlerin bölünebilirliğinin amaç fonksiyonları üzerindeki etkisini analiz etmek amacıyla Model 2 geliştirilmiştir. Bu modelde, işlerin bölünmesine izin verilerek amaç fonksiyonundaki değerlerin iyileştirilmesi ve böylece müşteri memnuniyetinin artırılması hedeflenmiştir. Siparişlerin tamamlanma süresinin ve toplam gecikme süresinin azaltılması, işletmeye kârlılık açısından önemli katkılar sağlayacaktır. Ancak geliştirilen modelde, kaliteyi koruma amacıyla her bir siparişin en fazla ikiye bölünebilmesi öngörülmüştür.

Tekstil sektöründe müşteri memnuniyeti, öncelikli olarak kaliteyi koruyarak zamanında üretim gerçekleştirilmesiyle sağlanmaktadır. Özellikle konfeksiyon bölümünde, dikim işlemleri kişisel el becerisine ve yatkınlığa bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Kaliteli ürün üretiminin en önemli koşullarından biri, operasyonu gerçekleştiren çalışanın belirli bir pozisyonda sürekli olarak görev almasıyla birlikte el becerisinin gelişmesidir. Bu durum, üretimde oluşabilecek kalite hatalarının en aza indirilmesine olanak tanımaktadır.

Bununla birlikte, siparişlerin ikiden fazla alt parçaya bölünmesi; özellikle el işçiliğine dayalı üretimlerde, bireysel hataların artmasına neden olabilmektedir. Ayrıca siparişlerin aşırı bölünmesi, tamamlanan ürünlerin kolilenerek sevkiyata hazır hale getirilmesi sürecinde üretim hattı içi takibi güçleştirmekte ve süreçlerin yönetimini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, geliştirilen modelde hem iş bölünmesinin ikiden fazla olmaması hem de bölünen siparişlerin oranının kullanıcı tarafından belirlenen belirli bir eşik değerin altında kalması gerekliliği vurgulanmaktadır.

#### 4.2. Siparişleri Bölündüğü Durumda Paralel Üretim Hattı Çizelgeleme Modeli

İşlerin Bölünmesine izin vermeyen Model 1' ek olarak tanımlanan Model 2'nin indis kümeleri, indisleri, parametreleri karar değişkenleri, amaç fonksiyonları ve kısıtları aşağıda verilmiştir.

Model 1'e göre ek olarak tanımlanan karar değişkenleri:

$a_{ik}$  : *i. siparişin k. hatta atanma oran*

$x_{ijk}$ :  $i$ . sipariş  $j$ . işten önce  $k$ . hatta çizelgelenmişse 1; diğer durumda 0,

Model 1'e göre ek olarak tanımlanan parametreler:

$b$ : siparişlerin üretim hatlarında işlenebileceği en küçük oran,

olmak üzere Model 1'in 3 numaralı kısıtı 16 numaralı kısıta dönüştürülerek bölünme durumuna göre yeniden düzenlenmiştir.

$$C_{enb} \geq \sum_{i=1}^n s_{ik} * y_{ikl} + \sum_{i=1}^n a_{ik} * p_{ik}, \forall k, \quad (16)$$

4, 5 ve 6 nolu kısıtlar olduğu gibi modele aktarılmış olup 7-10 numaralı kısıtlara da bölünebilirlik durumu eklenerek 17-20 numaralı kısıtlar şeklinde revize edilmiştir.

$$C_i + M(1 - y_{ikl}) \geq s_{ik} + p_{ik} * a_{ik}, \forall (i, k), l = 1, \quad (17)$$

$$C_i - M(1 - y_{ikl}) \leq s_{ik} + p_{ik} * a_{ik}, \forall (i, k), l = 1, \quad (18)$$

$$C_i + M(2 - y_{ikl} - y_{jk1-1}) \geq C_j + p_{ik} + s_{ik} + a_{ik}, \forall i \neq j, \forall k, l > 1, \quad (19)$$

$$C_i - M(2 - y_{ikl} - y_{jk1-1}) \leq C_j + p_{ik} + s_{ik} + a_{ik}, \forall i \neq j, \forall k, l > 1, \quad (20)$$

Bölünebilirlik durumuna göre de ilave problem tanımına göre eklenmesi gereken kısıtlar da aşağıdaki gibidir:

$$x_{ijk} + 1 \geq y_{ik(l-1)} + y_{ikl}, \forall i \neq j, \forall k, l > 1, \quad (21)$$

$$\sum_{k=1}^h a_{ik} = 1, \forall i, \quad (22)$$

$$a_{ik} \leq \sum_{k=1}^h y_{ikl}, \forall (i, k), \quad (23)$$

$$a_{ik} \geq b * \sum_{k=1}^h y_{ikl}, \forall (i, k), \quad (24)$$

$$\sum_{k=1}^h \sum_{l=1}^n y_{ikl} \leq 2, \forall i, \quad (25)$$

$$\sum_{l=1}^n y_{ikl} \leq 1, \forall (i, k), \quad (26)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, \forall i, j, k \quad (27)$$

$$a_{ik} \in \{0,1\}, \forall i, j, k \quad (28)$$

21. kısıt  $i$ . sipariş  $j$ . siparişten hemen önce aynı hatta işlem görmüşse  $x_{ijk}$  karar değişkeninin 1 değerini almasını sağlamaktadır. 22. kısıt üretim hatlarına bölünme oranları toplamının 1 olmasını sağlar. 23. kısıt ise bölünme oranının atanma durumundan küçük olmasını sağlar. 24 numaralı kısıt ise hatlara belirlenen en küçük orandan daha az bölünmesini engeller. 25. kısıt, en fazla iki hatta atama olmasını ve 26. kısıt ise sipariş bölündüyse atanan bir sipariş aynı üretim hattına bir kez daha atanmamasını sağlar. 27 ve 28 numaralı kısıtlar ise işaret kısıtlarıdır.

### 4.3. Ağırlıklı Toplam Yöntemi

Çok amaçlı eniyileme yöntemleri, birden fazla amacın olduğu matematiksel modellerde kullanılmaktadır. Çok amaçlı bir modeli tek amaçlı bir modele dönüştürmek için skalerleştirme yöntemlerinden faydalanılır. Ağırlıklı toplam, konik skalerleştirme, çebişev skalerleştirme, epsilon kısıt ve hedef programlama gibi yöntemler yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir (Miettinen, 1998). Çok amaçlı eniyileme yöntemleri, karar vericinin tercih bilgisini çözüm sürecinin başında, çözüm sürecinin sonunda, etkileşimli gerektiren ve tercih bilgisi gerektirmeyen yöntemler olarak sınıflandırılabilir (Miettinen, 1998). Bu çalışmada, Pareto yüzeyi örnekleyerek karşılaştırmak için tercih bilgisini çözüm sürecinin sonunda kullanan ve literatürde en yaygın kullanılan yöntemlerden ağırlıklı toplam yöntemi kullanılmıştır. Pareto yüzey üzerinde amaç fonksiyonlarının ödünleşim durumu test problemleri için incelenmiştir.

Ağırlıklı toplam yöntemi (ATY), kullanımının kolay olmasından dolayı çok amaçlı eniyilemede en yaygın kullanılan yöntemlerden birisidir. Yöntemde karar vericinin amaç fonksiyonlarına ilişkin önem tercihleri ağırlık verilerek kullanılmaktadır. Amaç fonksiyonlarına verilen ağırlıklar pozitif ve toplamı ise bire eşit olmaktadır. Yöntemi, Saaty ve Zadeh bulmuştur. ATY'den pozitif ağırlıklar için bulunan eniyi çözümlerin, Pareto çözüm olduğu ispatlanmıştır. Amaç fonksiyonu ağırlıkları arasında sıfır değeri varsa elde edilen çözüm, zayıf Pareto çözümdür. Çok amaçlı matematiksel model, dış büyüklük şartını sağlıyorsa ATY ile tüm zayıf Pareto çözümleri elde etmek mümkündür (Saaty ve Zadeh, 1977).

İki amaçlı bir matematiksel modelin amaç fonksiyonları,  $w_i \geq 0$  ,  $i= 1, 2$  ve  $\sum_{i=1}^2 w_i = 1$  olmak üzere ATY ile  $Enk \sum_{i=1}^2 w_i * f_i$  şeklinde birleştirilir. ATY'de  $w_1=1$  ve  $w_2=0$  ile  $w_1=0$  ve  $w_2=1$  ağırlıkları kullanılarak elde edilen çözümlere karşı gelen amaç fonksiyonu eniyi değerlerinde (enküçük değerler) oluşan ideal nokta  $f^*=(f_1^*, f_2^*)$  ve en kötü değerlerden oluşan nadir nokta  $f^-=(f_1^-, f_2^-)$  şeklinde gösterilmiştir. Amaç fonksiyonlarının değerlerini birimden arındırmak için normalizasyon yapılmıştır.

Çalışmadaki modellerde ise amaç fonksiyonu ağırlıklı toplam yöntemi ile aşağıdaki gibi normalize edilerek kullanılmıştır.

$$Enk \ w_1 \frac{f_1 - f_1^*}{(f_1^- - f_1^*)} + w_2 \frac{f_2 - f_2^*}{(f_2^- - f_2^*)}$$

## 5. Genetik Algoritma

Genetik Algoritma (GA), biyolojik evrim süreçlerinden esinlenerek geliştirilmiş, güncel sezgisel ve stokastik bir tekniktir. Genetik algoritma olarak 1975’de John Holland tarafından ortaya çıkan popülasyon değişimini sürekli kılmaya çalışan ve en iyi çözümler üretmeye çalışan bir algoritmadır. Son yıllarda, dikkat mekanizmaları ve meta-öğrenme teknikleri kullanılarak genetik algoritmaların parametrelerinin otomatik olarak öğrenilmesi üzerine çalışmalar yapılmaktadır (Lange, Chen, Zahavy, & Schaul, 2023). Doğal oluşum, çaprazlama ve benzeri biyolojik süreçler taklit edilerek, çözüm alanında en ya da uygunluk düzeyi yüksek çözümler elde edilmeye çalışılır. Özellikle karmaşık, yüksek boyutlu ve doğrusal olmayan problemlerin çözümünde etkili bir çözüm yöntemidir.

Genetik algoritma, belirli bir amaç fonksiyonu optimize etmeye yönelik çalışmakta ve merkezi bir çözüme sahip olmaktadır. Onun bireyi, olası bir çözümü temsil eden bir kromozom yapısına sahiptir. Evrim süreci boyunca, güçlü üretilen ve yeni nesillerin ömrüyle, problemin optimal veya optimal yakınsayan bir çözümü elde edilmeye çalışılmaktadır.

GA, sezgisel bir metot olduğundan dolayı eniyi çözümü bulamayabilmektedir. Ancak, bilinen metotlarla çözülemeyen veya çözüm zamanı üstel artan problemlerde eniyiye yakın çözümleri bulmaktadırlar.

GA, parametrelerin kendisi yerine parametrelerin temsili dizilerden oluşmaktadır. Noktadan noktaya arama yapmak yerine bir yığın diziyle çalışması bilinen eniyi yöntemlerden bu özelliklerinden dolayı ayrılmaktadır. Oluşan her bir diziyle birey olarak yani çocuk (yavru) olarak tanımlanmaktadır. Bu doğrultuda her bir dizideki genler problemin kromozom yapısını oluşturmaktadır. Her bir kromozomun da uygunluk değeri vardır. Bu uygunluk değeri ise bir amaç fonksiyonunu değerine eşittir. GA’nın her adımında yeniden seçilim, genetik operatörler (çaprazlama ve mutasyon) ve uygunluk fonksiyon değerinin hesaplanması vardır.

Yeniden seçilim yapılabilmesi için problemin bir başlangıç popülasyonunun oluşması gerekmektedir. Bu başlangıç popülasyonu oluştuktan sonra bir seçim yöntemi seçilmektedir. Literatüre baktığımızda seçim yöntemleri olarak rulet çemberi, turnuva yöntemi, sıralı, orantılı yeniden üretim ve denge durumu gibi yöntemler kullanılmaktadır. Genetik algoritmalarda seçim operatörleri, algoritmanın başarısını doğrudan etkileyen temel bileşenlerdir. Bu bağlamda, rulet çemberi, turnuva seçimi, sıralı seçim, orantılı yeniden üretim ve denge durumu gibi çeşitli seçim yöntemleri literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır (Bushra & Arafat , 2024).

Çaprazlama ise bir diziden rassal olarak seçilen iki bireyin belli bölümlerin karşılıklı olarak değiştirilmesi olarak tanımlanmaktadır. Yani yeni noktalar verecek iki yeni birey oluşumunu sağlamaktadır. Bilinen yöntemler ise tek nokta çaprazlama, iki noktalı çaprazlama

ve sürekli (uniform) çaprazlamadır. Mutasyon ise bir dizide yani kromozomdaki bir değerin(genin) küçük bir olasılıkla değişmesini sağlamaktadır.

Bu çalışmada GA, özelleştirilen PMÇP’inde paralel üretim hatları için geliştirilen iki ayrı model için algoritma uygulanmıştır. Model1 ‘de klasik genetik algoritma adımları vardır. GA’adımları aşağıdaki gibi adımlar uygulanarak ilerlenmiştir:

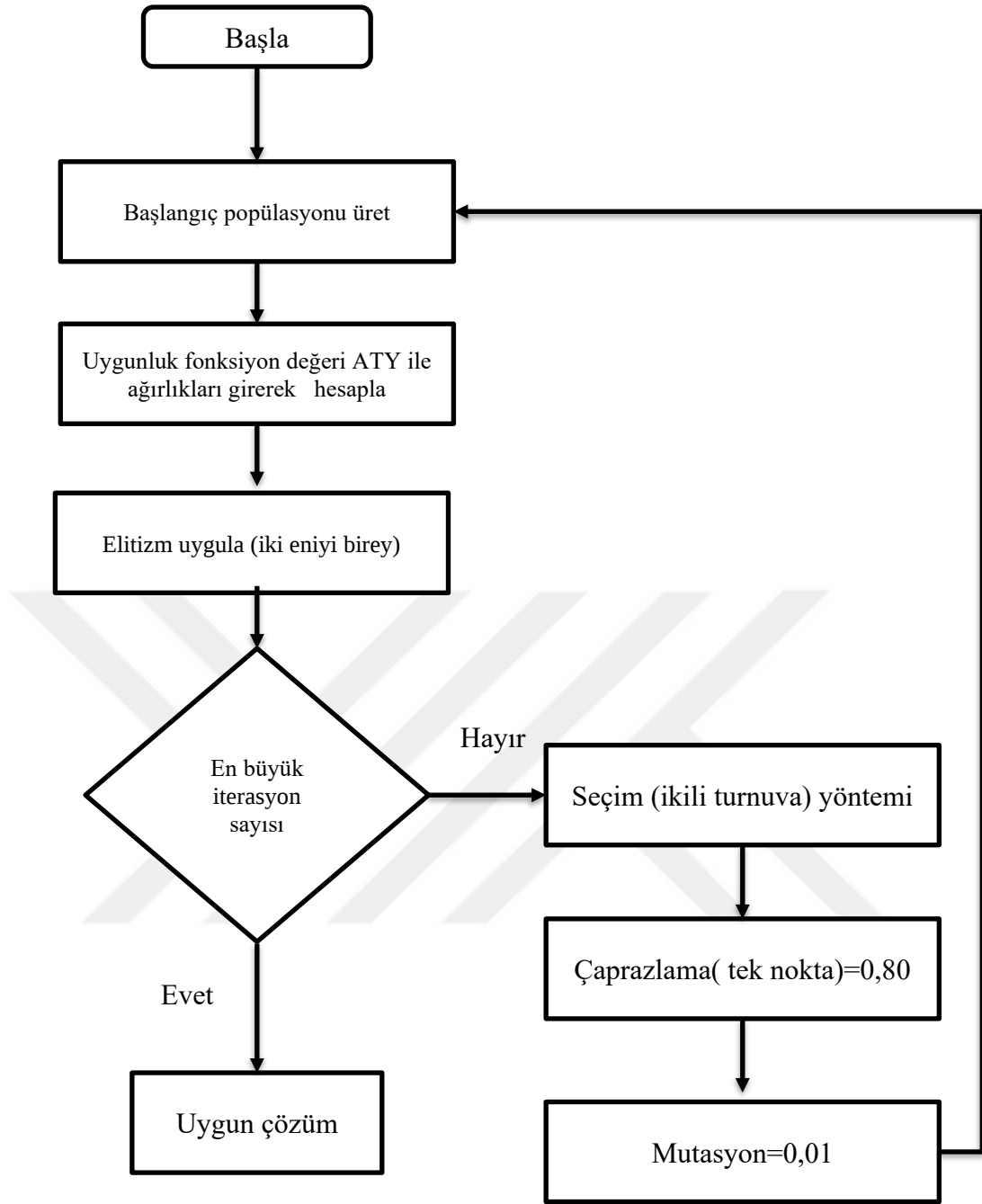
Adım1: Başlangıç popülasyonunu oluşturma.

Adım2: Popülsayondaki her bir kromozomun uygunluk değerini hesapla.

Adım3: Enbüyük iterasyon sayısına ulaşıldıysa dur. Değilse sonraki adıma geç.

Adım4: Sırasıyla seçim, çaprazlama ve mutasyon operatörlerini uygula ve Adım 2’ye dön (Tutumlu, 2021).

Bu çalışmada PMÇP’nin NP-zor sınıfında bir problem olduğu bilinmektedir. (Baruch Mor, 2025) Model1 için genetik algoritma yapısında siparişler bölünmeden problemin paralel üretim hatlarına uygulanması gösterilmektedir. Çalışmada Model1 için kullanılan GA klasik yapıda olup ATY yöntemiyle problem boyutlarında amaç fonksiyonu ağırlıkları (0,1) aralığında verilmiştir. Ve bu sayede pareto yüzey oluşturulmuştur. Ayrıca GA ’nın klasik seçim yöntemi olarak ikili turnuva yöntemi, çaprazlama yöntemi olarak da tek nokta çaprazlama yöntemi uygulanmıştır. Problemden en iyi iki bireyin tutulabilmesi içinde elitizm uygulanmıştır. Şekil 4 ’te Model 1 için GA akış şeması da sunulmuştur.



**Şekil 7.** Model 1 GA'ya ATY 'nin entegre edilmiş akış şeması

Adım1: GA için parametre değerlerini gir . (Popülasyon büyüklüğü vb.)

Adım2: Başlangıç popülasyonu oluştur.

Adım3: Oluşan popülasyondaki her birey için ATY için ağırlık girişi yaparak uygunluk değerini hesapla.

Adım4: Popülasyondaki en iyi iki bireyi kaybetmemek için elitizm uygula.

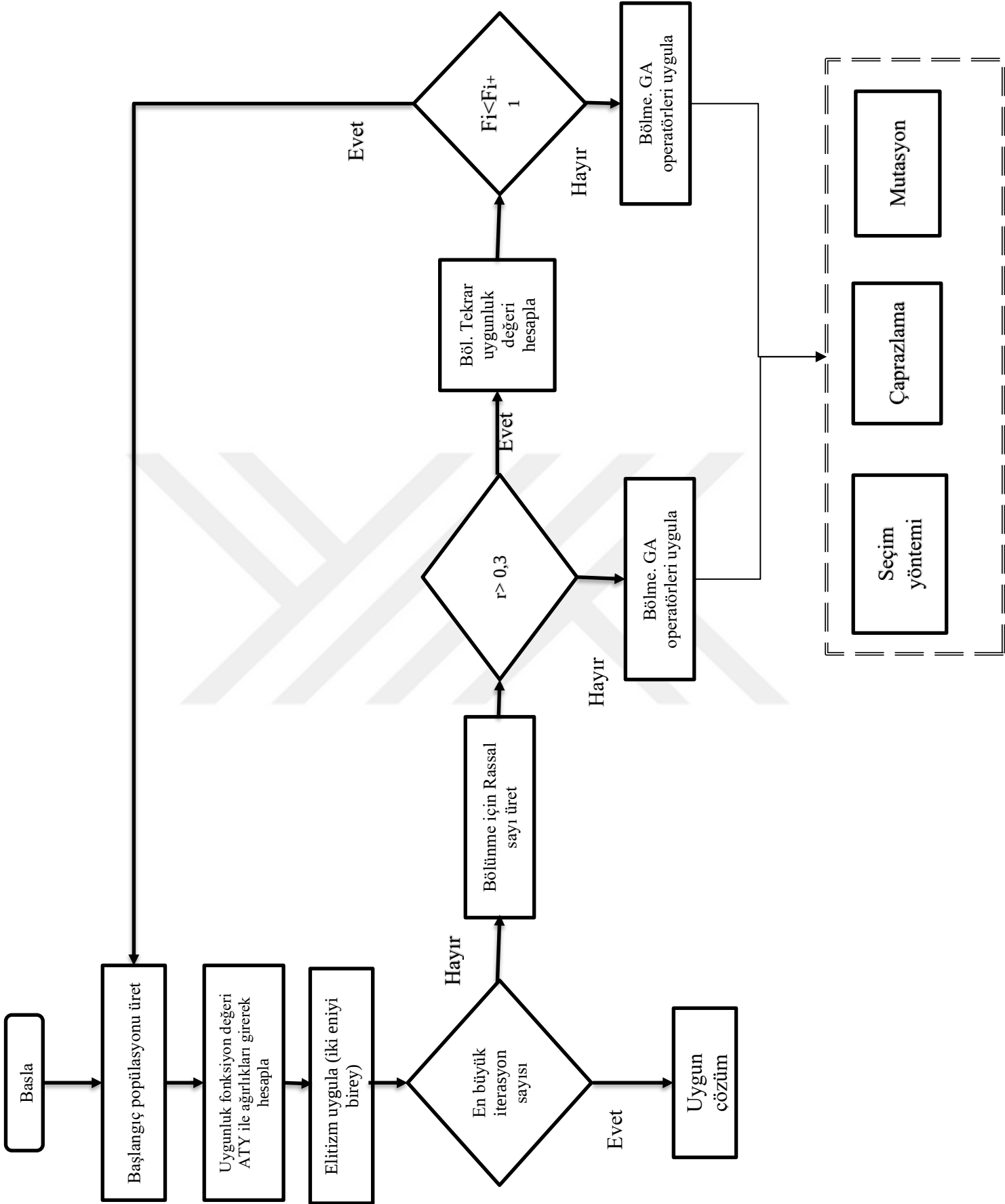
Adım5: Jenerasyon sayısı t sayısını bir arttır ve en büyük iterasyon sayısına ulaşınca dur. Ulaşmadıysa sonraki aşamalara devam et

Adım6: Seçim ikili turnuva yöntemi tek nokta çaprazlama ve mutasyon yöntemi uygula.

Çalışmada ilerleyen kısımlarda GA 'nın PMÇP'deki kromozom yapısının gösterimi ilk popülasyonun üretilip hesaplanması , seçim çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin dizi olarak gösterilmesi geniş bir açıyla anlatılmıştır.

Siparişlerin bölünmesiyle ilgili akış şeması Şekil 5' de gösterilmiştir. Burada GA'nın yapısına belirli stratejiler eklenip bölünebilirliği etkin hale getirecek şekilde akış şeması sunulmuştur. Çünkü GA'nın genel yapısındaki operatörler işleri bölmeye odaklandığında uygunluk fonksiyonu bölünmemeye durumuna göre kötü sonuçlar da vermektedir. Siparişlerin bölünebilirliği, üretim sürecine olumlu katkı sağladığı durumlarda uygulanmalıdır. Bu nedenle, kromozom yapısında siparişlerin hangi koşullar altında bölünebileceği belirlenmiş ve aşağıdaki gibi kısıtlar tanımlanmıştır:

- Bir iş en fazla ikiye bölünebilir. İşin üretim sürecinde bölünme durumu yalnızca bir kez gerçekleşebilir . Bu işletmede oluşacak kalite problemlerinin öne geçtiğinden dolayı en fazla ikiye bölünmelidir.
- Bölme işlemi yalnızca uygunluk fonksiyon değerinde iyileşme sağlıyorsa uygulanmalıdır. Bölme işlemi sonucunda üretim süresi, teslimat süresi veya maliyet açısından avantaj sağlanıyorsa iş bölünebilir; aksi takdirde bölme işlemi uygulanmaz.
- Bölme işlemi, yük dengesinin eşit şekilde dağıtılmasının ardından gerçekleştirilmelidir. Bu bağlamda, her bir sipariş, tamamlanma süresi en kısa olan uygun istasyona veya kaynağa atanmalıdır.
- Hazırlık süresi 10 birimden büyük olan işler bölünemez. Konfeksiyon üretiminde bazı işlemler için hazırlık süresi çok uzun olabilmektedir. Bu gibi durumlarda bölme işlemi, üretim sürecini daha da karmaşık hale getireceğinden uygulanmaz.
- Bir iş en az %30 oranında bölünmelidir. Eğer bir iş bölünecekse, bölünme oranı 0,30'dan küçük olamaz. Bu şart, çok küçük bölme işlemlerinin üretim sürecini gereksiz yere karmaşılaştırmasını engellemek amacıyla konulmuştur.



Şekil 8. Model 2 için GA'nın akış şeması

Adım1: GA için parametre değerlerini gir . (Popülasyon büyüklüğü  $N= 200$ )

Adım2: Başlangıç popülasyonu oluşturun. ( $N = N - 1$ ) popülasyon büyüklüğüne ulaşana kadar devam et. kromozomun ( $k \times n$ ) matrisini oluşturun. Yani Adım 1’de verilen popülasyon büyüklüğüne ulaşana kadar her popülasyon için fitness değeri hesapla. (k: üretim hattı sayısı, n= sipariş sayısı,  $F_i$ : i. İterasyondaki fonksiyon değeri ATY yöntemi le fitness fonksiyonu hesaplama.) Amaç fonksiyonu minimizasyon olduğu için minimize edilerek hesaplama yapılmalıdır.

Adım3: Bölünme durumu için rastgele bir sayı (r) türet.  $r > 0,3$  ise bölme işlemi uygula ve  $F_{i+1}$  değerini hesapla.

Adım4: Oluşan popülasyondaki her birey için ATY’ye göre ağırlık girişi yaparak  $F_i$  ve  $F_{i+1}$  değerini karşılaştır.  $F_i < F_{i+1}$  ise bölme işlemi uygulama.

Adım5:  $F_i > F_{i+1}$  ise atanma oranına (b) göre siparişi iki ayrı parçaya böl. Hazırlık süresi (s) 10’dan küçük olup olmadığını kontrol et. Küçükse böl değilse bölme.

Adım6: Popülasyondaki en iyi iki bireyi kaybetmemek için elitizm uygula.

Adım7: Jenerasyon sayısı t sayısını bir arttır ve en büyük iterasyon sayısına ulaşınca dur. Ulaşmadıysa sonraki aşamalara devam et

Adım8: Seçim olarak ikili turnuva yöntemi çaprazlama olarak tek nokta çaprazlama ve mutasyon yöntemi uygula.

### **5.1. Siparişlerin Bölünmediği Duruma Göre Kromozom Gösterimi ve Çözüm Yapısı**

Genetik algoritmalarda kromozom gösterimi, problem uzayının çözüme uygun bir şekilde modellenmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Genetik algoritmaların iş sıralama ve makine atama süreçlerinde kullanılması, özellikle konfeksiyon işletmelerindeki sipariş yönetimi açısından büyük avantajlar sağlamaktadır. Konfeksiyon üretim süreçleri, genellikle çok sayıda farklı iş istasyonu, makine, iş gücü ve değişken müşteri siparişleri içeren karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu nedenle, işlerin hangi makinede, hangi öncelikle işleneceğini belirlemek, işletmenin verimliliğini, teslim sürelerini ve üretim maliyetlerini doğrudan etkileyen kritik bir faktördür.

Bu çalışmada sunulan kromozom gösterimi, konfeksiyon işletmelerinde siparişlerin üretim planlamasında nasıl yönetilebileceğini modellemek için uygun bir yaklaşımdır. Örnek

olarak, beş siparişin ve iki üretim hattının bulunduğu bir üretim ortamı için kromozom gösterimi aşağıdaki şekilde yapılmaktadır.

**Üretim Hattı Ataması:** Her bir siparişe rastgele olarak 1 veya 2 değeri atanarak, siparişin hangi üretim hattına yönlendirileceği belirlenir. Bu örnek problemde iki üretim hattı bulunduğu için, siparişler ya birinci ya da ikinci hatta atanır. Problem boyutu büyüdükçe ve hat sayısı arttıkça, siparişlerin hatlara atanması işlemi, hat sayısına bağlı olarak üretilen rastgele sayılarla gerçekleştirilir. Bu atama sürecinde, 0 ile 1 arasında rastgele üretilen bir sayı, belirlenen bir eşik değeriyle karşılaştırılarak uygun hatta yönlendirme yapılır.

**Sıralama Önceliği:** Her sipariş için 0 ile 1 arasında rastgele bir öncelik değeri üretilerek, aynı hattaki siparişlerin arasında hangi sırayla işleneceği belirlenir. Daha küçük değere sahip siparişler daha önce işlenmektedir.

Tablo 4’de kromozom yapısı hat ve öncelik ilişkisine göre kurularak gösterilmiştir. Bu matris gösteriminde ilk satırda hangi siparişin hangi hatta atandığı gösterilirken ikinci satırda ise hangi siparişin öncelik sıralaması gösterilir. Yani bu belirlenen sayılar rastgele seçildiği için algoritmada atanan değeri küçükten büyüğe göre sıralayarak siparişlerin hatlara sıralama önceliği verilir.

**Tablo 4.** Model 1 İçin Çözüm Gösteriminin Kromozom Yapısı

| Sipariş | P <sub>1</sub> | P <sub>2</sub> | P <sub>3</sub> | P <sub>4</sub> | P <sub>5</sub> |
|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Hat     | 2              | 1              | 2              | 1              | 1              |
| Öncelik | 0,80           | 0,35           | 0,40           | 0,90           | 0,50           |

Bu gösterimde, seçim yöntemi olarak turnuva seçimi yöntemi kullanılıp popülasyon içerisinde bireyler seçilmektedir. İlgili yöntemde, rastgele seçilen iki birey karşılaştırılarak daha iyi uygunluk değerine sahip olan birey bir sonraki nesle aktarılacak üzere tercih edilmektedir.

Çaprazlama operatörü olarak tek nokta çaprazlama uygulanmaktadır. Bu yöntemde, rastgele belirlenen tek bir kesme noktasına göre ebeveyn bireylerin genetik bilgileri değiştirilerek yeni bireyler üretilmektedir. Çaprazlama olasılığı 0,80 (80%) olarak belirlenmiştir, yani popülasyondaki bireylerin büyük bir kısmı çaprazlama sürecine tabi tutulmaktadır. Genetik algoritmalarda, çaprazlama olasılığı genellikle yüksek tutulur; bu, popülasyondaki bireylerin büyük bir kısmının çaprazlama sürecine tabi tutulmasını sağlar. Literatürde, çaprazlama olasılığı için önerilen değerler genellikle 0,6 ile 0,9 arasında değişmektedir (Baeldung , 2024).

Mutasyon işlemi ise 0,01 (1%) oranında uygulanarak, bireylerin rastgele genlerinde küçük değişiklikler yapılmaktadır. Mutasyonun temel amacı, yerel minimumlara takılmayı önleyerek popülasyon çeşitliliğini korumaktır.

Bu gösterim, siparişlerin önceliklendirilmesini ve hatlar arasındaki yük dengesini optimize etmek için uygun bir yapı sunmaktadır. Özellikle, öncelik bazlı sıralama yöntemi sayesinde hatlar üzerindeki işlemlerin etkin bir şekilde planlanması sağlanmaktadır. Genetik algoritma operatörleri ile birlikte ele alındığında, çözüm kalitesinin artırılması ve uygunluk fonksiyonunun optimize edilmesi hedeflenmektedir. Problemden gen uzunluğu 5 sipariş olduğu için 5 olarak bulunur. Yani gen uzunluğu N (sipariş sayısına) bağlıdır. Tablodaki değerlere göre siparişlerin hat atamaları ve öncelik sıralamaları şu şekilde gerçekleşmiştir. Tablo 1' deki değerler 1. sipariş, Hat 2' ye atanmış ve öncelik değeri 0,80 olarak belirlenmiştir. 2. sipariş, Hat 1'de işlenecek olup öncelik değeri 0,35 olarak belirlenmiştir. 3. sipariş, Hat 2'de işlenecek ve öncelik değeri 0,40 olmuştur. 4. sipariş, Hat 1'de işlem görecektir olup öncelik değeri 0,90 olarak belirlenmiştir. 5. sipariş, Hat 1'e atanmış ve öncelik değeri 0,50 olarak belirlenmiştir.

Bu durumda, hatlardaki siparişlerin sıralaması öncelik değerlerine göre belirlenmektedir. Hat 1'de siparişler şu sırayla işlenecektir: 2  $\rightarrow$  5  $\rightarrow$  4 (küçükten büyüğe sıralandığında: 0,35, 0,50, 0,90). Hat 2'de ise 3. sipariş önce, ardından 1. sipariş işlenecektir (öncelik değerleri: 0,40, 0,80).

## **5.2. Siparişlerin Bölündüğü Duruma Göre Kromozom Gösterimi ve Çözüm Yapısı**

Genetik algoritmaların üretim planlama ve çizelgeleme problemlerine uygulanması, işletmelerin verimliliğini artırmak ve kaynak kullanımını optimize etmek açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Konfeksiyon işletmelerinde siparişlerin yönetimi ve üretim süreçlerinin etkinliği açısından, bazı siparişlerin bölünebilirliği önemli bir karar faktörüdür. Bu çalışmada, işlerin belirli kısıtlar çerçevesinde bölünebilir olduğu bir üretim planlama problemine yönelik geliştirilmiş bir kromozom gösterimi önerilmektedir.

Önceki kromozom modeline ek olarak, her siparişin bölünüp bölünemeyeceğini ve eğer bölünebiliyorsa hangi oranla bölüneceğini ifade eden genetik bilgi de kromozom yapısına dahil edilmiştir.

Her kromozom, aşağıdaki üç temel bileşeni içermektedir:

- Hat Ataması: Siparişin hangi hatta işleneceğini belirler.
- Öncelik Değeri: Siparişin hattaki sırasını belirler.

- Bölünebilirlik Bilgisi: Siparişin bölünüp bölünmeyeceğini ve bölünme oranını gösterir.

Bu yapıyı daha iyi açıklayabilmek adına, 5 sipariş ve 2 hattın olduğu bir üretim ortamı için aşağıdaki kromozom gösterimi sunulmaktadır. İlk tablo yani Tablo 2’ de gösterildiği gibi Model1 ile aynı matrisi kullanmaktadır. İkinci tablo yani Tablo 5’de ise işlerin bölünmesini 1-0 mantığına göre bölünüp rastgele bir sayı üretmek atamasını yapmayı gösterir. ( $B_n$  : n. birey Popülasyondaki bireylerin siparişi. )

**Tablo 5.** Model 2 için Çözüm Gösteriminin İlk Matrisi

| <b>B<sub>n</sub></b> | <b>P<sub>1</sub></b> | <b>P<sub>2</sub></b> | <b>P<sub>3</sub></b> | <b>P<sub>4</sub></b> | <b>P<sub>5</sub></b> |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Hat                  | 2                    | 1                    | 2                    | 1                    | 1                    |
| Öncelik              | 0,80                 | 0,35                 | 0,40                 | 0,90                 | 0,50                 |

**Tablo 6.** Model 2 için Çözüm Gösteriminin İkinci Matrisi

| <b>B<sub>n</sub></b> | <b>P<sub>1</sub></b> | <b>P<sub>2</sub></b> | <b>P<sub>3</sub></b> | <b>P<sub>4</sub></b> | <b>P<sub>5</sub></b> |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Bölünme Oranı        | 0,50                 | 0,10                 | 0,30                 | 0,20                 | 0,45                 |

Tablo 6’da , siparişlerin bölünebilir olup olmadığını belirlemek için bölünebilirlik bilgisi tutulmakta ve eğer iş bölünebiliyorsa, bölünme oranı (0,3 ile 0,7 arasında) gösterilmektedir. Siparişlerin bölünebilirliği, 0 ile 1 arasında rastgele atanan bir bölünme oranına bağlı olarak belirlenmektedir. Bu bağlamda, bölme oranı  $r$  değeri 0,3 ile 0,7 aralığında olduğunda, sipariş bölme işlemi gerçekleştirilmekte ve bu durum ‘1’ olarak işaretlenmektedir. Aksi halde, yani bu aralık dışında kalan değerler için bölme işlemi uygulanmamakta ve durum ‘0’ olarak değerlendirilmektedir.

Bununla birlikte, algoritmada bölünebilirliğe ilişkin daha gelişmiş stratejilerin de uygulanması gerekmektedir. Bu stratejiler kapsamında, belirli koşullar sağlanmadığı sürece sipariş bölme işlemi gerçekleştirilmemektedir. Örneğin, hazırlık süresi 10 birimden büyük olan siparişler bölünemez. Ayrıca, üretim hatlarında yük dengesi sağlanmamışsa, bölme işlemi yapılmaz. Son olarak, amaç fonksiyonunun minimize edilmesi hedeflendiğinden, bir çözümün uygunluk değeri  $F_i$  bir sonraki jenerasyona ait değerden  $F_{i+1}$  daha küçükse ( $F_i < F_{i+1}$ ) , bölme işlemi gerçekleştirilmez.

Geliştirilmiş kromozom yapısı birçok avantaj sağlamaktadır. Siparişlerin belirli kurallar çerçevesinde bölünebilmesi, üretim süreçlerinin daha esnek ve optimize edilmiş bir

şekilde yürütülmesine olanak tanır. Hat yüklerini dengeler. Bölünebilirlik sayesinde siparişler arasındaki iş yükü daha dengeli dağılabilir, böylece darboğazlar önlenir. Teslim sürelerini iyileştirir. Siparişlerin belirli oranlarda bölünerek farklı hatlarda işlenebilmesi, toplam üretim süresini kısaltarak teslimat sürelerini azaltabilir. Bölünebilirlik kısıtları, gereksiz bölme işlemlerini engelleyerek ekstra hazırlık süresi ve maliyet artışlarını önler.

Sonuç olarak, siparişlerin bölünebilirliğini dikkate alan kromozom yapısı, konfeksiyon işletmelerinde üretim planlamasının daha verimli, esnek ve maliyet etkin bir şekilde yapılmasına katkı sağlayacak şekilde tasarlanmıştır.

### **5.3. GA Operatörleri (Seçim, Mutasyon ve Çaprazlama)**

Genetik algoritmanın etkin çalışmasını sağlamak amacıyla seçim, çaprazlama ve mutasyon üç temel genetik operatör uygulanmaktadır. GA doğadan ilham alınarak geliştirilen optimizasyon algoritmalarıdır ve seçim operatörü, GA'nın temel bileşenlerinden biridir. Seçim operatörü, mevcut popülasyondan hangi bireylerin bir sonraki nesle aktarılacağını belirler. Amaç, iyi uyum sağlayan bireyleri (yüksek fitness değerine sahip olanları) seçerek daha iyi çözümler üretmektir. Seçim operatörünün türleri, rulet tekerleği seçimi, turnuva seçimi, rastgele seçim, rank seçim, çizgisel ölçeklendirme, sigma ölçeklendirme, Best T% vb. olarak gösterilebilir. Literatüre baktığımızda en çok kullanılan yöntemler ise rulet tekerleği seçimi, turnuva seçimi ve rank seçim yöntemleridir (Demir & Gelen Mert, 2022). Rulet tekerleği seçimi, bireylerin seçim olasılığı fitness değerleriyle orantılıdır. Yüksek fitness değerine sahip bireylerin seçilme olasılığı daha yüksektir. Rank Seçim, bireyler fitness değerlerine göre sıralanır ve sıralamaya bağlı bir olasılıkla seçilirler. Fitness değerleri arasındaki büyük farkların etkisini azaltarak daha dengeli bir seçim süreci sağlamaktadır. Turnuva Seçiminde rastgele seçilen bireyler kendi aralarında yarışır. En iyi fitness değerine sahip birey kazanır ve bir sonraki nesle aktarılır. Ayarlanabilir turnuva büyüklüğü ile çeşitlilik ve seçicilik dengelenebilir. Çözümün kötüleşmesini önler ve daha hızlı yakınsama sağlamaktadır. Fitness değerleri arasındaki büyük farkların etkisini azaltarak daha dengeli bir seçim süreci sağlamaktadır.

Çaprazlama operatörü, GA'nın temel bileşenlerinden biridir ve mevcut bireylerin genetik bilgisini birleştirerek yeni bireyler üretmeyi amaçlar. Çaprazlama, çözüm uzayında daha iyi bireylerin oluşmasına ve algoritmanın daha hızlı yakınsamasına yardımcı olur. Çaprazlama türleri ise tek noktalı çaprazlama, iki noktalı çaprazlama, çok noktalı çaprazlama, uniform çaprazlama, çember çaprazlama (CX), kısmen eşlenmiş çaprazlama (PMX), sıra bazlı çaprazlama (OX), konum bazlı çaprazlama (PBX) vb. 'dir.

Mutasyon, genetik algoritmalarda bireylerin genetik yapısında küçük rastgele değişiklikler yaparak çeşitliliği artıran bir operatördür. Doğal evrimdeki mutasyon sürecinden ilham alınarak tasarlanan bu mekanizma, popülasyonun belirli bölgelerinde yeni çözümler keşfetmeye yardımcı olur ve yerel minimumlara sıkışmayı önleyerek algoritmanın daha geniş bir çözüm uzayını keşfetmesini sağlar. Mutasyon işlemi, belirlenen bir mutasyon oranına bağlı olarak genetik dizilimde rastgele bir veya birden fazla genin değiştirilmesiyle gerçekleştirilir. Çizelgeleme problemlerinde mutasyon, görevlerin sırasını değiştirme, makineler arasında iş değişikliği yapma veya belirli bir zaman aralığında kaydırma şeklinde uygulanabilir.

Bu çalışmada her iki model için aynı genetik operatörler uygulanmıştır. Seçim operatörü olarak çizelgeleme problemlerinde literatürde en çok kullanılan yöntemlerden ikili turnuva yöntemi tercih edilmiştir. Rastgele iki birey seçilip ve aralarındaki uyuma göre değerler karşılaştırılır ve uyum değeri yüksek olan birey nesillere aktarılır. Çalışmada daha iyi sonuç vermesi adına ise elitizm de uygulanmıştır. Elitizm ise en iyi çözümün bir sonraki nesile aktarılmasını temin eder.

Çalışmada çaprazlama yöntemi olarak ise tek noktalı çaprazlama yöntemi uygulanmıştır (Tutumlu, 2021). Tek bir nokta seçilir ve aradaki genetik materyal değiştirilir. Model 1’deki çözüm matrisi Model 2’deki ilk çözüm matrisi ile aynı ve Model2 ‘deki ikinci çözüm matrisi de tek nokta çaprazlama yöntemi ile bireylerin genleri Şekil 9 ‘daki gibi çaprazlanmıştır. Çözüm gösterimine göre rastgele oluşturulan popülasyondan iki birey seçilmiş olup ( $B_1$  ve  $B_2$  : 1. ve 2. bireyin kromozom gösterimi;  $K_1$  ve  $K_2$ : Yeni oluşan iki bireyin kromozom gösterimi ) 3. siparişten itibaren bölünerek çaprazlama yapılmıştır.  $B_1$  ve  $B_2$  ’nin çaprazlanacağı noktalar rastgele seçilen noktadan itibaren yeni oluşan bireylerden  $K_1$  ve  $K_2$  sütunlarına değerler karşılıklı olarak aktarılır.

|         |      |      |      |      |      |
|---------|------|------|------|------|------|
| B1      | P1   | P2   | P3   | P4   | P5   |
| Hat     | 2    | 1    | 2    | 2    | 1    |
| Öncelik | 0,65 | 0,45 | 0,40 | 0,75 | 0,25 |

|         |      |      |      |     |     |
|---------|------|------|------|-----|-----|
| B2      | P1   | P2   | P3   | P4  | P5  |
| Hat     | 1    | 1    | 2    | 1   | 1   |
| Öncelik | 0,65 | 0,35 | 0,55 | 0,8 | 0,4 |

|         |      |      |      |      |      |
|---------|------|------|------|------|------|
| K1      | P1   | P2   | P3   | P4   | P5   |
| Hat     | 2    | 1    | 2    | 1    | 1    |
| Öncelik | 0,65 | 0,45 | 0,40 | 0,80 | 0,40 |

|         |      |      |      |      |      |
|---------|------|------|------|------|------|
| K2      | P1   | P2   | P3   | P4   | P5   |
| Hat     | 1    | 1    | 2    | 2    | 1    |
| Öncelik | 0,65 | 0,35 | 0,55 | 0,75 | 0,25 |

**Şekil 9.** Model 1 ve Model 2 için ilk matris çaprazlama gösterimi

Çalışmada Model 2’de bölünme durumu yani ikinci matris durumu için de tek nokta çaprazlama yöntemi P3’deki sipariş noktasından seçilerek ise Şekil 9 ‘daki gibi uygulanmıştır.

Seçilen noktada ilk bireydeki genlerle ikinci bireydeki genler karşılıklı olarak çaprazlanmıştır. Tek nokta Çaprazlama için rastgele sayı seçilerek  $r > 0,30$  ve  $r < 0,70$  aralığında ise bölünme işlemi değerine göre bölme yapılacak değilse siparişi bölmeden çaprazlama işlemine devam edecektir.

|         |      |    |      |      |      |
|---------|------|----|------|------|------|
| B1      | P1   | P2 | P3   | P4   | P5   |
| Bölünme | 0,30 | 0  | 0,60 | 0,25 | 0,50 |

|         |      |      |      |      |      |
|---------|------|------|------|------|------|
| B2      | P1   | P2   | P3   | P4   | P5   |
| Bölünme | 0,10 | 0,20 | 0,70 | 0,40 | 0,70 |

|         |      |    |      |      |      |
|---------|------|----|------|------|------|
| K1      | P1   | P2 | P3   | P4   | P5   |
| Bölünme | 0,30 | 0  | 0,60 | 0,40 | 0,70 |

|         |      |      |      |      |      |
|---------|------|------|------|------|------|
| K2      | P1   | P2   | P3   | P4   | P5   |
| Bölünme | 0,10 | 0,20 | 0,70 | 0,25 | 0,50 |

**Şekil 10.** Model 2 için ikinci matris çaprazlama gösterimi

Mutasyon operatörleri, genetik algoritmaların çeşitliliği koruyarak çözüm uzayını daha etkili bir şekilde taramasına yardımcı olur. Bu bölümde, Tablo 7 ve Tablo 8'deki matris gösterimine göre rassal mutasyon operatörü Model1 ve Model 2'de ilk matris için kullanılmıştır.

**Tablo 7.** Model1 ve Model2 için Çözüm Gösterimindeki Orijinal Matrisi

| Bn      | P1   | P2   | P3   | P4   | P5   |
|---------|------|------|------|------|------|
| Hat     | 2    | 1    | 2    | 1    | 1    |
| Öncelik | 0,80 | 0,35 | 0,40 | 0,90 | 0,50 |

Rassal mutasyon operatörü uygulandığında, rastgele bir gen (hat veya öncelik değeri) seçilerek yeni bir değer atanır. Burada P3 için Öncelik değeri Tablo 8'teki gibi rastgele değiştirilmiştir.

**Tablo 8.** Model1 ve Model2 için Çözüm Gösterimindeki Mutasyon Sonrası Matrisi

| Bn      | P1   | P2   | P3          | P4   | P5   |
|---------|------|------|-------------|------|------|
| Hat     | 2    | 1    | 2           | 1    | 1    |
| Öncelik | 0,80 | 0,35 | <b>0,60</b> | 0,90 | 0,50 |

Bu mutasyon, algoritmanın çeşitliliğini artırmak ve lokal optimumdan kaçınmak için kullanılmıştır. Bu gösterimde mutasyon öncelik değerinde sıralama değişikliği yapmayı

sağlamıştır. P3 ' deki siparişin öncelik sıralama değeri değişmiştir. Yani kromozom yapısındaki bir gen değişerek yerel optimum takılmaktan kaçınmayı sağlamıştır.

İkili değiştirme yöntemi , GA' da kullanılan bir mutasyon operatörüdür. Bu yöntemde, kromozom içerisinden rastgele iki gen seçilir ve yerleri değiştirilir. Böylece yeni bir birey oluşturularak genetik çeşitlilik artırılır. Bu yöntem özellikle iş sıralama ve rota planlama gibi sıralama tabanlı problemlerde etkili olup, çözüm uzayında daha iyi sonuçlar elde etmeye yardımcı olabilir. Tablo 9 ve Tablo 10 ' da ikili değiştirme yöntemi gösterilmiştir.

**Tablo 9.** Model 2 için Çözüm Gösteriminin İkinci Orijinal Matrisi

| <b>Bn</b>     | <b>P1</b> | <b>P2</b> | <b>P3</b> | <b>P4</b> | <b>P5</b> |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Bölünme Oranı | 0,50      | -         | 0,30      | -         | 0,45      |

Bu mutasyon operatöründe, rastgele iki bölünme oranı değeri seçilerek yer değiştirilir. Burada P1 ve P5 seçilmiş ve bölünme oranları yer değiştirilmiştir.

**Tablo 10.** Model 2 için Çözüm Gösteriminin İkinci Mutasyon Sonrası Matrisi

| <b>Bn</b>     | <b>P1</b>   | <b>P2</b> | <b>P3</b> | <b>P4</b> | <b>P5</b>   |
|---------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| Bölünme Oranı | <b>0,45</b> | -         | 0,30      | -         | <b>0,50</b> |

Bu değişiklik, çaprazlama sonrası bireylerde çözüm çeşitliliğini arttırmak ve yeni potansiyel çözümler oluşturmak için kullanılmıştır.

Bu iki mutasyon operatörü sayesinde alternatif uygun çözümlerin bulunmasına katkı sağlanmıştır. İkili yer değiştirmede işlerin bölünme oranlarında yaptığı değişiklikle birlikte daha çeşitli sonuçlar elde edilmiştir.

#### 5.4. GA 'nın Parametreleri

Genetik algorithma parametre değerlerine karar verilmesi, problem türüne ve çözüm kalitesine doğrudan etki eden kritik bir süreçtir. Parametreler genellikle deneysel testler, literatürde önerilen değerler veya otomatik ayarlama yöntemleri kullanılarak belirlenmektedir. Popülasyon büyüklüğü, jenerasyon sayısı, çaprazlama oranı, mutasyon oranı, elitizm, seçim yöntemi ve durdurma kriterleri gibi bilgiler parametre değeri olarak gösterilebilir.

Popülasyon büyüklüğü, büyük popülasyonlar daha geniş bir çözüm uzayını tarar ancak hesaplama maliyetini artırır. Genellikle problem boyutuna bağlı olarak 50-1000 arasında seçilir. Küçük popülasyonlar hızlı çalışsa da yerel optimumlara sıkışma riski taşır. Jenerasyon sayısı, çok düşük jenerasyon sayısı yeterli evrimi sağlayamazken, çok yüksek jenerasyonlar gereksiz hesaplama maliyeti yaratabilir. Tipik olarak 500-5000 arası değerlere ayarlanır ve çözümlerin iyileşme eğrisine göre optimize edilir. Mutasyon oranı, çeşitliliği artırarak yerel

minimumlardan kaçınmayı sağlar. Çok düşük mutasyon (örneğin %0,1) evrimi yavaşlatabilirken çok yüksek mutasyon (%10 ve üzeri) ise rastgele aramaya dönüşebilir. Genellikle %0,01 - %0,1 arasında seçilir. Çaprazlama oranı, yeni bireylerin oluşturulmasını sağlar. Tipik olarak %70-%90 arasında tutulur. Düşük değerler çeşitliliği azaltabilirken, çok yüksek değerler iyi çözümlerin korunmasını zorlaştırabilir. Elitizm, en iyi bireylerin doğrudan bir sonraki nesle taşınmasını sağlar. Genellikle %1-%5 arasında bir oran kullanılır. Seçim yöntemi, turnuva seçimi, rulet tekerleği veya derecelendirme tabanlı seçim gibi yöntemler, çözüm kalitesine bağlı olarak belirlenir. Örneğin, turnuva seçimi hızlı ve dengeli bir yöntemdir. Durdurma kriteri ise çözüm iyileşmesi belirli bir jenerasyon boyunca değişmiyorsa veya belirlenen jenerasyon sınırına ulaşılmışsa algoritma sonlandırılır.

Bu parametrelerin en iyi değerlerini belirlemek için genellikle deneme yanılma, çapraz doğrulama veya hiperparametre optimizasyon yöntemleri (Grid Search, Bayesian Optimization, vb.) kullanılır. Problem türüne göre yapılan testlerle en uygun parametre kombinasyonu belirlenebilir.

Bu çalışmada, parametreler belirlenirken küçük, orta ve büyük ölçekli problemler için iterasyon sayısı farklılık göstermektedir. Ancak, popülasyon büyüklüğü, çaprazlama oranı, mutasyon oranı ve elitizm değeri sabit tutulmuştur. Tablo 11’de parametre değerleri gösterilmiştir.

**Tablo 11.** GA ’nın Problem Boyutlarına Göre Parametre Değerleri

| Paremetreler                   | Küçük Boyutlu<br>Problemler | Orta Boyutlu<br>Problemler | Büyük Boyutlu<br>Problemler |
|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Popülasyon büyüklüğü ( $p_b$ ) | 200                         | 200                        | 200                         |
| Jenerasyon sayısı( $j_s$ )     | 200                         | 800                        | 1000                        |
| Çaprazlama Oranı ( $c_o$ )     | 0,8                         | 0,8                        | 0,8                         |
| Mutasyon Oranı( $m_o$ )        | 0,01                        | 0,01                       | 0,01                        |
| Elit Birey değeri (ebd)        | 2                           | 2                          | 2                           |

## ARAŞTIRMA BULGULARI

Çalışmanın bu bölümünde geliştirilen iki matematiksel model, Gams/Cplex yazılımı yardımıyla çözülmeye çalışılmıştır. Deneysel çalışmada iki modelden ATY ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu deneyler iki aşamada yapılmıştır. Birinci aşamada örnek problem üzerinde geliştirilen iki modelin karşılaştırılması anlatılmıştır. İkinci aşamada ise rassal oluşturulan test problemleri üzerinden önerilen modeller için çok amaçlı yöntemlerle elde edilen sonuçlar, karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

### 6. Örnek Paralel Üretim Hattı Çizelgeleme Problemi ve Çözümü

Bu çalışmada, paralel üretim hattı çizelgeleme problemlerine yönelik bir örnek ele alınmıştır. Örnek problemde iki üretim hattı ve beş farklı siparişin bulunduğu varsayılmaktadır. Problemin çözümünde kullanılan işlem süreleri, hazırlık süreleri ve teslim süreleri Tablo 12’de sunulmuştur. Söz konusu veriler, işletmede mevcut olan siparişler arasından rastgele seçilerek oluşturulmuştur.

**Tablo 12.** Örnek Problem Verileri

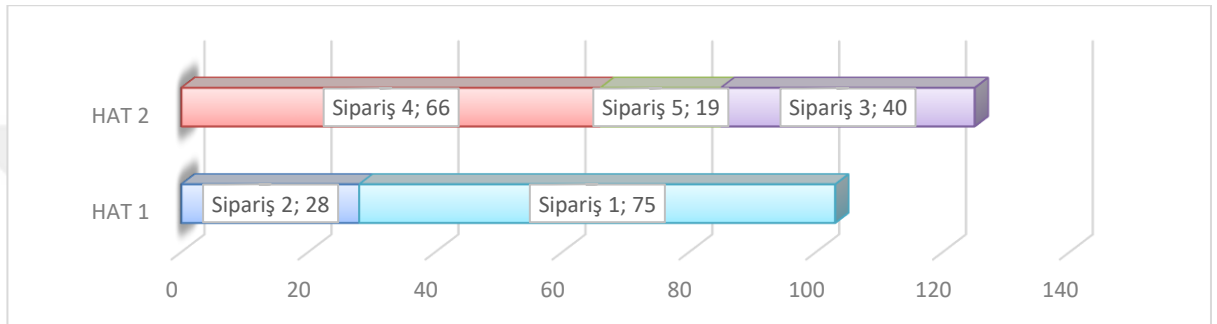
| Sipariş No | İşlem Süresi ( $p_{ik}$ ) | Hazırlık Süresi ( $s_{ik}$ ) | Teslim Süresi ( $d_i$ ) |
|------------|---------------------------|------------------------------|-------------------------|
| 1          | 70                        | 5                            | 100                     |
| 2          | 20                        | 8                            | 95                      |
| 3          | 35                        | 5                            | 140                     |
| 4          | 60                        | 6                            | 80                      |
| 5          | 15                        | 4                            | 85                      |

Örnek problem verilerine dayalı olarak geliştirilen Model 1 ve Model 2’nin optimizasyonu, GAMS 37 / CPLEX optimizasyon yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çizelgeleme sürecinde kullanılan amaç fonksiyonunun ağırlıkları  $w_1 = w_2 = 0,5$  olarak belirlenmiştir. Bu sayede her iki modelde işlem sürelerinin minimize edilmesi ve teslim sürelerine uyumun sağlanması eşit öneme sahip olacak şekilde ele alınmıştır.

Optimizasyon süreci sonucunda elde edilen çizelgeler, Şekil 11 ve Şekil 12’de Gantt diyagramları ile görselleştirilmiş ve her iki model için hesaplanan tamamlanma süreleri ( $C_{enb}$ ) sunulmuştur. Çalışmada kullanılan yöntemler ve modeller, üretim süreçlerinin verimliliğini artırmak ve teslimat sürelerini optimize etmek amacıyla geliştirilmiştir. Özellikle paralel üretim

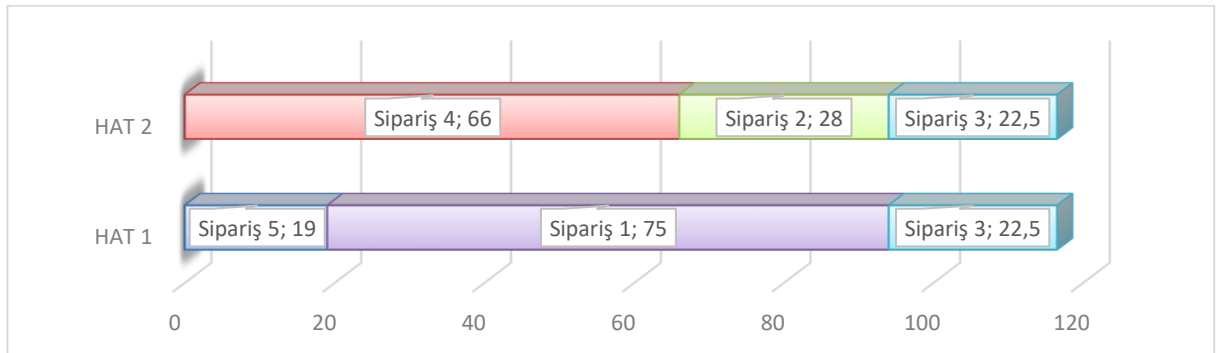
hattı sistemlerinde, işlem ve hazırlık sürelerinin dikkatli bir şekilde planlanmasının, toplam üretim süresi üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Bu doğrultuda, yapılan analizler göstermektedir ki, paralel üretim hatlarında optimal çizelgeleme stratejileri belirlenirken işlem süreleri, hazırlık süreleri ve teslim tarihlerinin dengeli bir biçimde ele alınması kritik öneme sahiptir. Ayrıca, kullanılan optimizasyon modelleri, gerçek üretim sistemlerine uygulanabilirliği artırmak amacıyla gelecekte farklı parametreler ve kısıtlar eklenerek genişletilebilir. Bu tür modelleme yaklaşımları, üretim hatlarının kapasite kullanım oranlarını iyileştirmek ve müşteri taleplerini daha verimli karşılamak açısından önemli bir katkı sunmaktadır.



**Şekil 11.** Örnek problemin Model 1 için ATY eniyi çözümüne ait gant diyagramı

Model 1'in sonuçlarına bakacak olursak  $C_{enb}$  süresi 125 saat ve toplam gecikme süresi ise 3 saat olarak bulunmuştur. 3 numaralı sipariş termin süresine yetişemeyip gecikmeye neden olmuştur.



**Şekil 12.** Örnek problemin Model 2 için ATY eniyi çözümüne ait gant diyagramı

Model 2'nin ATY ile eniyi çözümüne karşı gelen  $C_{enb}$  değeri 116,5 ve toplam gecikme süresi, 0 olarak bulunmuştur. Model 2'nin ATY ile eniyi çözümünde 3. siparişin bölünmesi sayesinde herhangi bir gecikme olmamıştır. Bu durumda siparişlerin bölünmesi, hem siparişlerin enbüyük tamamlanma zamanında hem de toplam gecikme süresinde iyileşme sağlamıştır. Ayrıca modelde hedeflenildiği gibi de siparişlerin enbüyük bölünme oranı olan 0,4

altında bölünme yapılmadan 3. sipariş 0,5 oranında hatlara bölünmüştür. Gams/Cplex çözücüsü, her iki modelin eniyi çözümünü yaklaşık sürelerde bulmuştur.

## 7. Test Problemleri ve Sonuçları

Bu çalışmada, önerilen iki farklı model için rastgele türetilmiş test problemleri ele alınmıştır. Problemler, küçük, orta ve büyük ölçekli olmak üzere üç farklı kategoride değerlendirilmiştir. Her problem tipine yönelik olarak Ağırlıklı Toplam Yöntemi (ATY) kullanılarak 11 farklı ağırlık değeri atanmış ve optimizasyon çözümleri gerçekleştirilmiştir. Toplamda 6 farklı test problemi ele alınmış olup, her biri için 11 ağırlık değeriyle optimizasyon çalıştırılarak 66 farklı çözüm elde edilmiştir. Ayrıca, büyük ölçekli problemlere özgü olarak, konfeksiyon işletmelerinin üretim süreçlerine uygun özel parametreler belirlenmiş ve bu çerçevede ek bir test problemi daha modellenerek çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar, gerçek üretim ortamındaki verilerle karşılaştırılarak modelin etkinliği analiz edilmiştir.

Çizelgeleme problemlerindeki literatürde genellikle 10 işe kadar olan problemler küçük ölçekli, 10 ila 40 iş arasındaki problemler orta ölçekli, 40 işten fazla olan problemler ise büyük ölçekli olarak sınıflandırılmaktadır. Ancak işlerin bölünebilirlik durumu, bu sınıflandırmada önemli bir değişken olarak öne çıkmaktadır. İşlerin bölünebilir olması, büyük ölçekli problemlerde çizelgeleme esnekliğini artırarak toplam tamamlanma süresi (makespan) ve kaynak kullanım verimliliği açısından avantaj sağlayabilir. Buna karşın, bölünemez işler söz konusu olduğunda, kesintisiz işlem sürelerinin korunması gerektiğinden çizelgeleme problemleri daha kısıtlayıcı hale gelebilir.

Bu bağlamda, işlerin bölünebilir olup olmaması, problem çözüm yöntemlerinin seçiminde ve optimizasyon sürecinde dikkate alınması gereken kritik bir faktördür. Örneğin, üretim sürecinde makine değişim maliyetleri veya işin yeniden başlatılması için gereken hazırlık süreleri yüksekse, bölünebilir çizelgeleme tercih edilmeyebilir. Buna karşın, çoklu üretim hatlarında paralel makine kullanımı veya atölye ortamlarında işlerin dinamik olarak yeniden tahsis edilmesi gerekiyorsa, bölünebilirlik önemli bir avantaj sunabilir.

Çalışmada ele alınan problem boyutları ve ilgili parametreler, Tablo 13’de ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur. Bu araştırma, farklı problem ölçekleri ve ağırlıklandırma stratejileri kullanılarak yapılan kapsamlı testlerle, çizelgeleme modellerinin endüstriyel üretim süreçlerine uygulanabilirliğini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Elde edilen bulgular, optimizasyon modellerinin farklı problem boyutlarına uyarlanabilirliğini ve üretim süreçlerinde sağladıkları avantajları ortaya koymaktadır.

**Tablo 13.** Test problemi Parametre Verileri

| Problem No | Problem Türü         | Sipariş sayısı | Üretim hattı sayısı |
|------------|----------------------|----------------|---------------------|
| TP1        | Küçük                | 6              | 2                   |
| TP2        | Küçük                | 8              | 4                   |
| TP3        | Orta                 | 10             | 6                   |
| TP4        | Orta                 | 30             | 8                   |
| TP5        | Orta(özel parametre) | 30             | 8                   |
| TP6        | Büyük(Gerçek veri)   | 100            | 10                  |

Çalışmada ele alınan problemlerin işlem süreleri ( $p_{ik}$ ) tüm problem boyutlarında [1,99] aralığında belirlenmiştir. Hazırlık süreleri ( $s_{ik}$ ) ise problem ölçeğine bağlı olarak farklı aralıklarda türetilmiştir. Küçük ölçekli problemler için hazırlık süreleri [1,30] aralığında, orta ölçekli problemler için ise özel parametreler gerektirdiğinden [1,5] aralığında olacak şekilde, düzgün dağılıma uygun rastgele sayılarla atanmıştır. Bu süreler, ilgili literatüre dayandırılarak belirlenmiştir (Tutumlu, 2021).

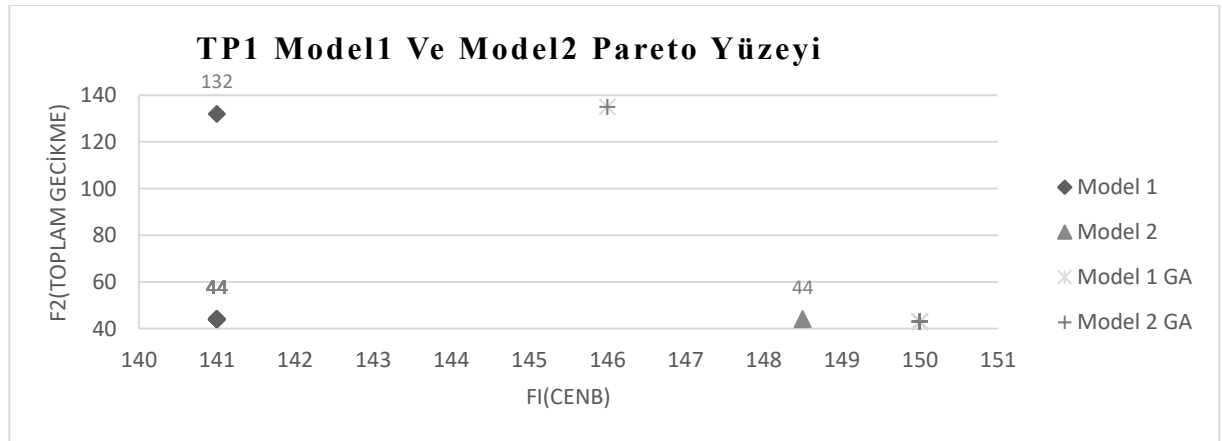
Teslim süreleri ( $d_i$ ), probleme özgü değer aralıkları çerçevesinde düzgün dağılıma uygun rastgele sayılarla türetilmiştir. Genel olarak, teslim süreleri [100,200] aralığında belirlenirken, orta ölçekli ve gerçek hayat problemlerine uyarlanan test problemlerinde bu aralık genişletilerek [100,500] şeklinde tanımlanmıştır. Gerçek hayat problemi ise doğrudan işletmeden elde edilen verilere dayalı olarak modellenmiş ve analiz edilmiştir. Tüm test problemleri, önerilen iki model için ayrı ayrı olmak üzere hem GAMS hem de Python ortamlarında Genetik Algoritma ile çözülmüş ve her bir problem için 11 farklı ağırlıklandırma senaryosu altında tekrarlanmıştır. Çözüm süreleri, hesaplama süresinin aşırı artmasını önlemek amacıyla maksimum 3600 saniye (1 saat) ile sınırlandırılmıştır.

TP1 için türetilen verilere dayalı olarak elde edilen sonuçlar Tablo 14’de sunulmuştur. Her iki model için hem GAMS optimizasyon çözücüsü hem de Genetik Algoritma (GA) kullanılarak Python çözücüsü ile ayrı ayrı çözümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, farklı yöntemlerin performanslarını karşılaştırmak ve model doğruluğunu değerlendirmek amacıyla analiz edilmiştir.

**Tablo 14.** TP1'nin Model1(GA ve Gams) ve Model2 (GA ve Gams) ' nin Çözümlemesi

| ATY TP1 6 Sipariş 2 Hat |                |                |                |              |                |                |              |                  |                  |              |                       |                  |              |
|-------------------------|----------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|--------------|------------------|------------------|--------------|-----------------------|------------------|--------------|
| Ağırlıklar              |                | Model1 gams    |                |              | Model2 gams    |                |              | Model1 GA        |                  |              | Model2 GA             |                  |              |
| w <sub>1</sub>          | w <sub>2</sub> | f <sub>1</sub> | f <sub>2</sub> | Süre<br>(sn) | f <sub>1</sub> | f <sub>2</sub> | Süre<br>(sn) | f <sub>GA1</sub> | f <sub>GA2</sub> | Süre<br>(sn) | f <sub>GA1</sub><br>1 | f <sub>GA2</sub> | Süre<br>(sn) |
| 1                       | 0              | 141            | 132            | 0,88         | 135,2          | 62             | 0,9          | 146              | 135              | 5            | 146                   | 135              | 3            |
| 0,9                     | 0,1            | 141            | 44             | 1,00         | 135,2          | 44             | 1,4          | 150              | 43               | 4            | 150                   | 43               | 4            |
| 0,8                     | 0,2            | 141            | 44             | 1,00         | 135,2          | 44             | 1,6          | 150              | 43               | 6            | 150                   | 43               | 3            |
| 0,7                     | 0,3            | 141            | 44             | 1,00         | 135,2          | 44             | 2,3          | 150              | 43               | 5            | 150                   | 43               | 2            |
| 0,6                     | 0,4            | 141            | 44             | 0,91         | 135,2          | 44             | 2,9          | 150              | 43               | 3            | 150                   | 43               | 4            |
| 0,5                     | 0,5            | 141            | 44             | 1,02         | 135,2          | 44             | 4,1          | 150              | 43               | 4            | 150                   | 43               | 2            |
| 0,4                     | 0,6            | 141            | 44             | 1,09         | 135,2          | 44             | 12,5         | 150              | 43               | 3            | 150                   | 43               | 4            |
| 0,3                     | 0,7            | 141            | 44             | 0,73         | 135,2          | 44             | 8,7          | 150              | 43               | 2            | 150                   | 43               | 3            |
| 0,2                     | 0,8            | 141            | 44             | 0,93         | 135,2          | 44             | 6,8          | 150              | 43               | 4            | 150                   | 43               | 2            |
| 0,1                     | 0,9            | 141            | 44             | 0,78         | 135,2          | 44             | 21,1         | 150              | 43               | 3            | 150                   | 43               | 5            |
| 0                       | 1              | 141            | 44             | 0,65         | 148,5          | 44             | 23,0         | 150              | 43               | 2            | 150                   | 43               | 4            |

Tablo 14' de sunulan sonuçlar incelendiğinde, en iyi çözüm noktalarının GAMS optimizasyon çözücüsü ile elde edildiği görülmektedir. Ayrıca, GAMS kullanılarak çözülen Model 2'nin en iyi çözümü sağladığı belirlenmiştir. Şekil 13'de ise, farklı çözümler arasındaki dengeyi görselleştirmek amacıyla elde edilen Pareto yüzeyi sunulmuştur.

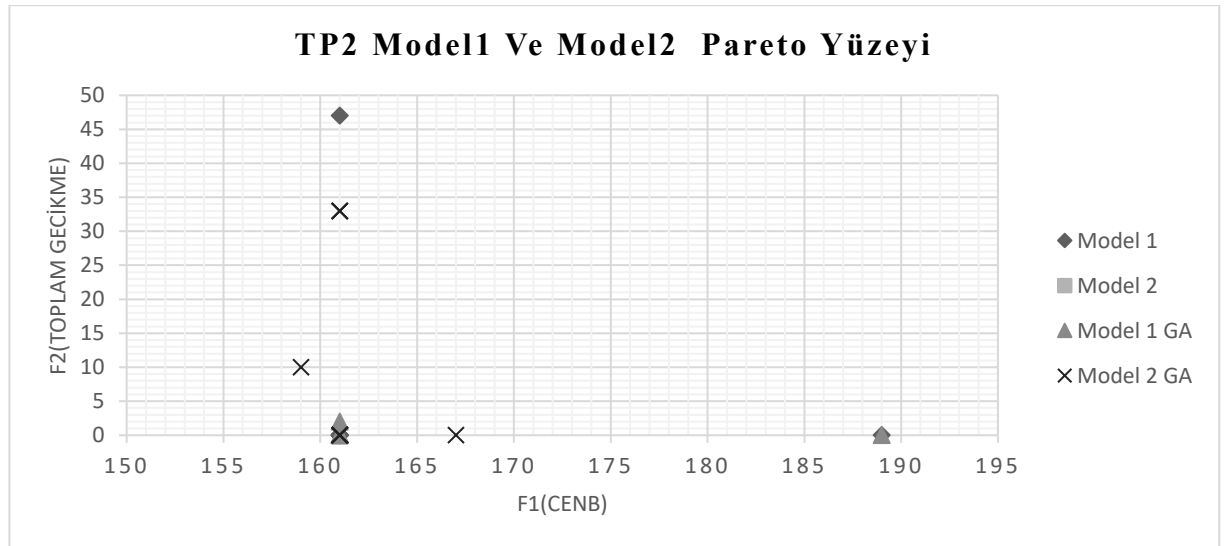
**Şekil 13.** TP1 Pareto yüzeyi gösterimi

TP2 için de çözüm sonuçları aşağıdaki gibi gösterilmiştir. Ancak TP2 sipariş sayısının artmasına bağlı olarak Model2 için Gams belirlenen süre aralığında sonuç vermemiştir.

**Tablo 15.** TP2 için Model1(GA ve Gams) ve Model2 (GA)'dan elde edilen sonuçlar

| TP2 8 Sipariş 4 Hat |                |                |                |              |                     |                 |              |                  |                  |              |                       |                  |              |
|---------------------|----------------|----------------|----------------|--------------|---------------------|-----------------|--------------|------------------|------------------|--------------|-----------------------|------------------|--------------|
| Ağırlıklar          |                | Model 1 Gams   |                |              | Model 2 Gams        |                 |              | Model 1 GA       |                  |              | Model 2 GA            |                  |              |
| w <sub>1</sub>      | w <sub>2</sub> | f <sub>1</sub> | f <sub>2</sub> | Süre<br>(sn) | f <sub>m</sub><br>1 | f <sub>m2</sub> | Süre<br>(sn) | f <sub>GA1</sub> | f <sub>GA2</sub> | Süre<br>(sn) | f <sub>GA1</sub><br>1 | f <sub>GA2</sub> | Süre<br>(sn) |
| 1                   | 0              | 161            | 47             | 44,2         | -                   | -               | -            | 161              | 2                | 3            | 161                   | 33               | 5            |
| 0,9                 | 0,1            | 161            | 0              | 43           | -                   | -               | -            | 161              | 0                | 5            | 161                   | 33               | 6            |
| 0,8                 | 0,2            | 161            | 0              | 43           | -                   | -               | -            | 161              | 0                | 7            | 161                   | 33               | 7            |
| 0,7                 | 0,3            | 161            | 0              | 42           | -                   | -               | -            | 161              | 0                | 5            | 161                   | 0                | 6            |
| 0,6                 | 0,4            | 161            | 0              | 44           | -                   | -               | -            | 161              | 0                | 6            | 159                   | 10               | 5            |
| 0,5                 | 0,5            | 161            | 0              | 45           | -                   | -               | -            | 161              | 0                | 5            | 161                   | 0                | 10           |
| 0,4                 | 0,6            | 161            | 0              | 43           | -                   | -               | -            | 161              | 0                | 8            | 161                   | 0                | 9            |
| 0,3                 | 0,7            | 161            | 0              | 43           | -                   | -               | -            | 161              | 0                | 4            | 161                   | 0                | 7            |
| 0,2                 | 0,8            | 161            | 0              | 44           | -                   | -               | -            | 161              | 0                | 7            | 161                   | 0                | 6            |
| 0,1                 | 0,9            | 161            | 0              | 45           | -                   | -               | -            | 161              | 0                | 8            | 161                   | 0                | 8            |
| 0                   | 1              | 189            | 0              | 7            | -                   | -               | -            | 189              | 0                | 4            | 167                   | 0                | 5            |

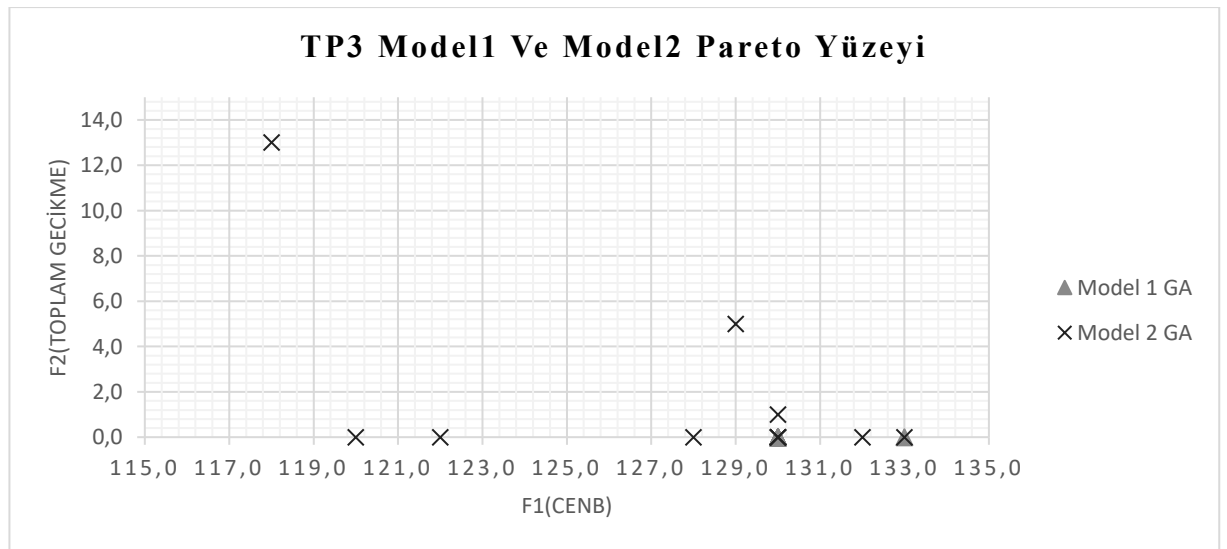
Tablo 15'deki sonuçlara baktığımızda  $f_1$ ,  $f_{GA1}$  ve  $f_{GA2}$ 'nin birbirlerine göre farklı baskınlıkta sonuç verdiği gözlemlenmiştir.  $f_2$  de çözüm bulunamamıştır. Şekil 14 'de TP2 ile ilgili pareto yüzeyi grafiği de verilmiştir.

**Şekil 14.** TP2 Pareto yüzeyi gösterimi

**Tablo 16.** TP3 için Model1 GA ve Model2 GA ile elde edilen sonuçlar

| TP3 10 Sipariş 6 Hat |       |            |           |              |              |           |              |
|----------------------|-------|------------|-----------|--------------|--------------|-----------|--------------|
| Ağırlıklar           |       | Model 1 GA |           |              | Model 2 GA   |           |              |
| $w_1$                | $w_2$ | $f_{GA1}$  | $f_{GA2}$ | Süre<br>(sn) | $f_{GA1\ 1}$ | $f_{GA2}$ | Süre<br>(sn) |
| 1                    | 0     | 130        | 0         | 16           | 129          | 5         | 96           |
| 0,9                  | 0,1   | 130        | 0         | 15           | 118          | 13        | 92           |
| 0,8                  | 0,2   | 130        | 0         | 15           | 130          | 0         | 88           |
| 0,7                  | 0,3   | 130        | 0         | 17           | 130          | 1         | 90           |
| 0,6                  | 0,4   | 130        | 0         | 16           | 122          | 0         | 94           |
| 0,5                  | 0,5   | 130        | 0         | 14           | 120          | 0         | 92           |
| 0,4                  | 0,6   | 130        | 0         | 13           | 130          | 0         | 89           |
| 0,3                  | 0,7   | 130        | 0         | 12           | 130          | 0         | 87           |
| 0,2                  | 0,8   | 130        | 0         | 15           | 128          | 0         | 93           |
| 0,1                  | 0,9   | 130        | 0         | 14           | 132          | 0         | 85           |
| 0                    | 1     | 133        | 0         | 17           | 133          | 0         | 92           |

Tablo 16’ da görüldüğü gibi Gams orta boyutlu test probleminde Model1 ve Model2 için 1 saatlik sürede çözüm verememiştir. Problem boyutunun büyümesinden dolayı sadece GA ile çözüm elde edilmiştir. Sonuçlara baktığımızda ise Şekil 15’de pareto yüzeyi verilmiş olup baskın noktaların Model 2’ de  $f_{GA1}$  ve  $f_{GA2}$  olduğu gösterilmiştir.

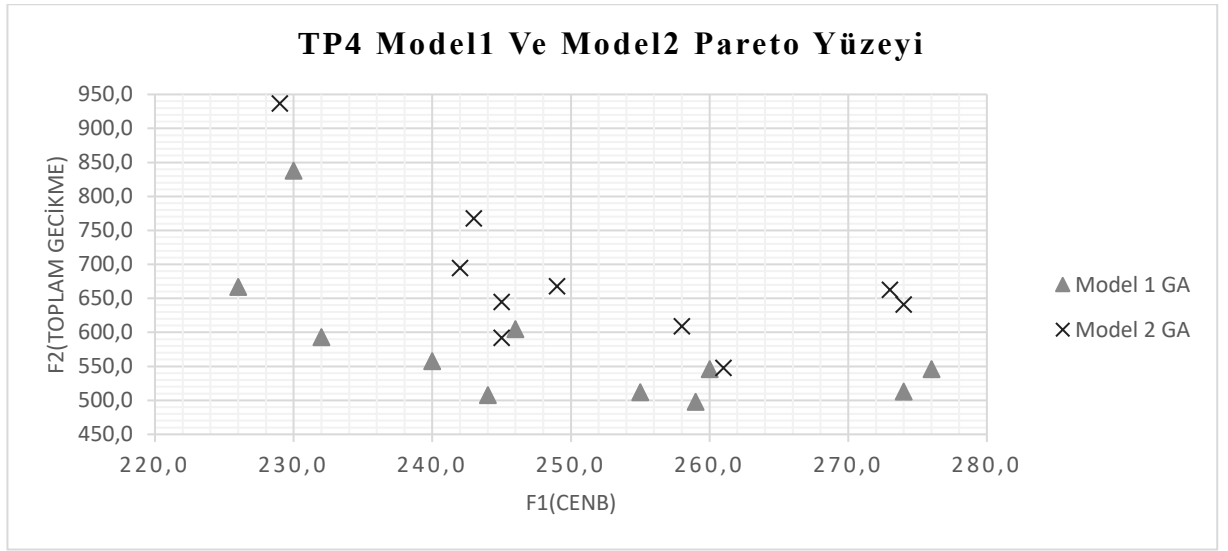
**Şekil 15.** TP3 Pareto yüzeyi gösterimi

**Tablo 17.** TP4'ün Model1 GA ve Model2 GA ile Çözümlemesi

| TP4 30 Sipariş 8 Hat |                |                  |                  |          |                    |                  |          |
|----------------------|----------------|------------------|------------------|----------|--------------------|------------------|----------|
| Ağırlıklar           |                | Model 1 GA       |                  |          | Model 2 GA         |                  |          |
| w <sub>1</sub>       | w <sub>2</sub> | f <sub>GA1</sub> | f <sub>GA2</sub> | Süre(sn) | f <sub>GA1 1</sub> | f <sub>GA2</sub> | Süre(sn) |
| 1                    | 0              | 230              | 838              | 40       | 229                | 937              | 155      |
| 0,9                  | 0,1            | 226              | 667              | 35       | 243                | 768              | 147      |
| 0,8                  | 0,2            | 244              | 508              | 51       | 273                | 663              | 125      |
| 0,7                  | 0,3            | 232              | 593              | 32       | 245                | 645              | 114      |
| 0,6                  | 0,4            | 260              | 546              | 38       | 249                | 668              | 101      |
| 0,5                  | 0,5            | 240              | 558              | 41       | 242                | 695              | 115      |
| 0,4                  | 0,6            | 246              | 605              | 38       | 258                | 609              | 127      |
| 0,3                  | 0,7            | 255              | 512              | 43       | 245                | 592              | 123      |
| 0,2                  | 0,8            | 259              | 498              | 39       | 261                | 548              | 110      |
| 0,1                  | 0,9            | 274              | 513              | 42       | 310                | 599              | 105      |
| 0                    | 1              | 276              | 546              | 55       | 274                | 641              | 156      |

Çalışmada, büyük ölçekli test problemleri için kullanılan Genetik Algoritma (GA) yapısının, siparişlerin bölünebilir olduğu durumlarda beklenen düzeyde iyileştirme sağlamadığı gözlemlenmiştir. Bu duruma ilişkin elde edilen sonuçlar Tablo 17 'de sunulmuştur. Algoritma tasarlanırken bölünebilirlikle ilgili gerekli kısıtlar tanımlanmış olmasına rağmen, optimizasyon açısından tam anlamıyla bir iyileştirme sağlanamamıştır. Analizler sonucunda, belirli ağırlıklarda  $f_{GA1}$  Model 1 'de iyi sonuç vermiş bazı noktalarda Model 2 'de iyi sonuç vermiştir.  $f_{GA2}$  için de baktığımızda benzer bir durum ortaya çıkmıştır.

Bu sonuçlar, kullanılan genetik algoritmanın belirli problem yapıları için optimizasyon yeteneğinin değişkenlik gösterebileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, GA'nın bölünebilir işlerin çizelgelenmesi sürecinde etkinliğinin artırılması için parametre optimizasyonu, farklı çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin denenmesi veya hibrit bir yaklaşımın benimsenmesi gibi ek stratejilerin incelenmesi gerektiği değerlendirilmektedir. Çözüm performanslarının karşılaştırmalı analizi, Şekil 16' da grafiksel olarak sunulmuş olup, GA'nın farklı senaryolar altındaki performans değişimlerini görselleştirmektedir.

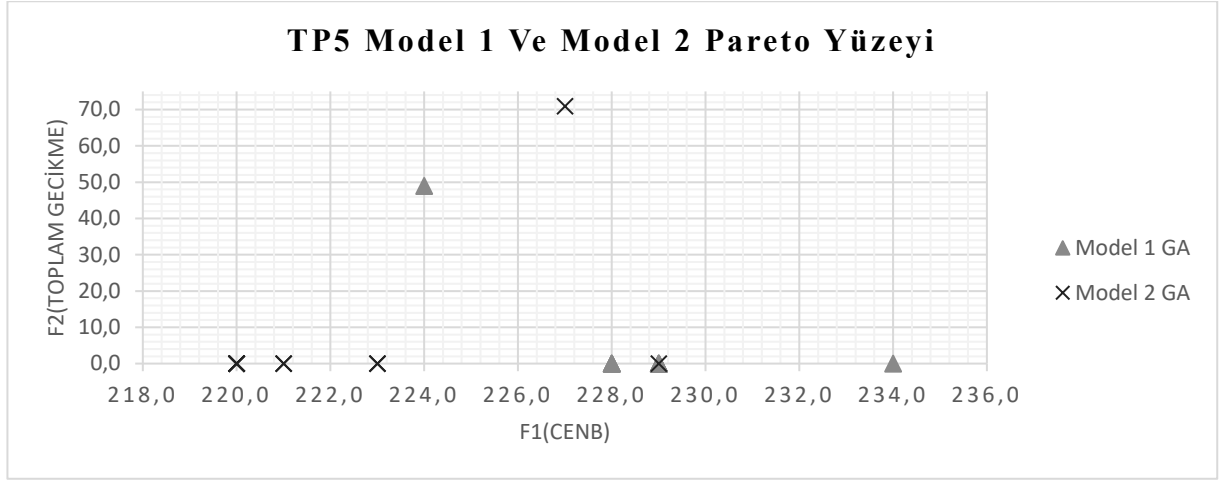


**Şekil 16.** TP4 Pareto yüzeyi gösterimi

TP5 kapsamında, konfeksiyon üretim süreçlerine uygun olarak oluşturulan veri setleri kullanılarak bir test problemi tasarlanmıştır. Bu problem üzerinden elde edilen sonuçlar, geliştirilen modelin söz konusu üretim yapısına başarılı şekilde uyum sağladığını ve optimizasyon sürecinde daha etkili çözümler üretebildiğini ortaya koymuştur. Bu duruma ilişkin bulgular Tablo 18’de sunulmuştur.

**Tablo 18.** TP5’in Model 1 GA ve Model 2 GA ile Çözümlemesi

| TP5 30 Sipariş 8 Hat (Özel Parametre) |     |                  |                  |          |                  |                  |          |
|---------------------------------------|-----|------------------|------------------|----------|------------------|------------------|----------|
| Ağırlıklar                            |     | Model 1 GA       |                  |          | Model 2 GA       |                  |          |
| w1                                    | w2  | f <sub>GA1</sub> | f <sub>GA2</sub> | Süre(sn) | f <sub>GA1</sub> | f <sub>GA2</sub> | Süre(sn) |
| 1                                     | 0   | 224              | 49               | 35       | 227              | 71               | 250      |
| 0,9                                   | 0,1 | 229              | 0                | 32       | 223              | 0                | 770      |
| 0,8                                   | 0,2 | 229              | 0                | 33       | 223              | 0                | 282      |
| 0,7                                   | 0,3 | 229              | 0                | 29       | 221              | 0                | 265      |
| 0,6                                   | 0,4 | 229              | 0                | 30       | 221              | 0                | 272      |
| 0,5                                   | 0,5 | 229              | 0                | 37       | 220              | 0                | 291      |
| 0,4                                   | 0,6 | 228              | 0                | 34       | 220              | 0                | 245      |
| 0,3                                   | 0,7 | 228              | 0                | 32       | 220              | 0                | 251      |
| 0,2                                   | 0,8 | 228              | 0                | 31       | 220              | 0                | 262      |
| 0,1                                   | 0,9 | 228              | 0                | 36       | 220              | 0                | 258      |
| 0                                     | 1   | 284              | 0                | 32       | 229              | 0                | 294      |



**Şekil 17.** TP5 Pareto yüzeyi gösterimi

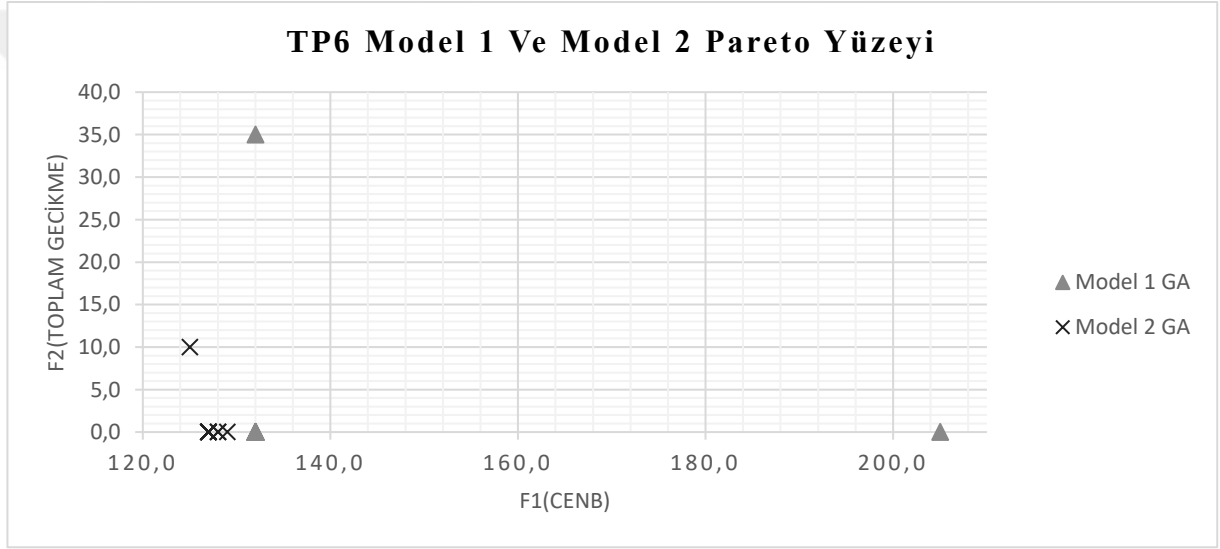
TP5 ‘de Model 2 ‘nin Model 1 ‘e göre  $f_{GA1}$  ve  $f_{GA2}$  değerleri için daha baskın sonuçlar verdiği Şekil 17 ‘de gösterilmiştir.

Çalışmadaki son test problemi ise gerçek hayat problemindeki veriler ile çözülmüştür. Bu veriler günlük üretim kapasite/saat olarak hesaplanmıştır. Bir siparişin işlem süresi, günlük üretim verileri ele alınarak olması gereken çevrim süresine oranlanmasıyla hesaplanmıştır. Buna istinaden de hazırlık süreleri hesaplanmıştır. Teslim süreleri ise müşteri tarafından belirlenen kesin termin tarihleridir. Bu da plan başlangıcından yani  $t=0$  anından başlayarak bir çizelge oluşturulmuştur. Tablo 19’ da gerçek hayat problemi ile ilgili çizelge sonuçları verilmiştir.

**Tablo 19.** TP6’nın Model 1 GA ve Model 2 GA ile Çözümlemesi

| TP6 100 Sipariş 10 Hat |     |            |           |          |              |           |          |
|------------------------|-----|------------|-----------|----------|--------------|-----------|----------|
| Ağırlıklar             |     | Model 1 GA |           |          | Model 2 GA   |           |          |
| w1                     | w2  | $f_{GA1}$  | $f_{GA2}$ | Süre(sn) | $f_{GA1\ 1}$ | $f_{GA2}$ | Süre(sn) |
| 1                      | 0   | 132        | 35        | 45       | 125          | 10        | 2825     |
| 0,9                    | 0,1 | 132        | 0         | 49       | 127          | 0         | 3237     |
| 0,8                    | 0,2 | 132        | 0         | 52       | 127          | 0         | 3580     |
| 0,7                    | 0,3 | 132        | 0         | 53       | 127          | 0         | 3559     |
| 0,6                    | 0,4 | 132        | 0         | 54       | 127          | 0         | 3453     |
| 0,5                    | 0,5 | 132        | 0         | 45       | 128          | 0         | 3415     |
| 0,4                    | 0,6 | 132        | 0         | 49       | 128          | 0         | 3223     |
| 0,3                    | 0,7 | 132        | 0         | 41       | 127          | 0         | 3456     |
| 0,2                    | 0,8 | 132        | 0         | 52       | 127          | 0         | 3478     |
| 0,1                    | 0,9 | 132        | 0         | 45       | 127          | 0         | 3518     |

Problemde çıkan sonuca baktığımızda Model2 ‘de gecikmenin olmadığı ve tamamlama süresinin de siparişlerin bölünmesi sayesinde daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu sayede siparişlerin hem bölünebilirliğinin olması hemde uygun bir plan çizelgelemesinin olması gerçek hayat probleminde planın daha etkin ve doğru sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Şekil 18’de gözüktüğü gibi pareto yüzeyde baskın noktalar  $f_{GA1}$  değerinde gözükmemektedir. Yani çözülen çizelgeleme problemindeki sonuca göre geliştirilen her iki modelde  $f_{GA2}$  değerinin, elle yapılan plandan çok daha iyi çıkmıştır. En büyük tamamlanma süresini temsil eden  $f_{GA1}$  ‘de termin sürelerini aşmadan gerçekleştiği için uygun bir üretim çizelgelemesi oluşturulmuştur.



**Şekil 18.** TP6 Pareto yüzeyi gösterimi

Şekil 18 ‘de görüldüğü gibi tüm ağırlıklar da Model 2 hem  $f_{GA1}$  hem de  $f_{GA2}$  amaç fonksiyonlarında daha baskın sonuçlar elde etmiştir.

## SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Paralel Makine Çizelgeleme Problemi (PMÇP) ele alınarak, tekstil sektöründeki konfeksiyon işletmelerinde siparişlerin üretim hatlarına atanması problemi modellenmiştir. Bu doğrultuda, iki farklı model geliştirilmiştir. İlk model (Model 1), siparişlerin bölünemez olduğu durumu ele alırken, ikinci model (Model 2) siparişlerin bölünebilir olduğu durumu dikkate alarak modellenmiştir. Her iki modelde de amaçlar, maksimum tamamlanma süresini ve toplam gecikmeyi minimize etmektir. Modellerin performanslarını karşılaştırmak amacıyla GAMS/CPLEX çözücüsü kullanılarak örnek problemler ve küçük ölçekli test problemleri çözülmüştür.

Problemin bölünebilir olması, PMÇP'nin NP-zor sınıfında yer alan yapısını daha da karmaşık hale getirmiştir. Bu nedenle, orta ve büyük ölçekli problemler için GAMS/CPLEX çözücüsü verilen süre zarfında en iyi çözümü bulamamıştır. Günümüzün küreselleşen ve rekabetçi üretim ortamında zaman kısıtının kritik bir faktör olması nedeniyle, optimal çözüme yakın sonuçlar elde etmek amacıyla meta-sezgisel bir yöntem olan Genetik Algoritma (GA) uygulanmıştır.

Orta ve büyük ölçekli problemler için geliştirilen doğrusal programlama modelleri ile doğrudan çözüm bulunamadığından, aynı mantık çerçevesinde çok amaçlı programlama yaklaşımı olan Ağırlıklandırılmış Toplam Yöntemi (ATY) kullanılarak GA modeli iyileştirilmiştir. Model 2 için sipariş bölünebilirliği stratejileri eklenerek, çözüm sürecinde istenen olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Ancak, siparişlerin bölünmesine izin verilen modelde hazırlık sürelerinin bazı durumlarda olumsuz etkiler yarattığı gözlemlenmiştir. Bu doğrultuda, probleme özgü hazırlık süreleri dikkate alınarak oluşturulan test problemleri çözülmüş ve belirli stratejiler geliştirilerek bu olumsuzluklar minimize edilmiştir.

Gerçekleştirilen analizler, sipariş bölünebilirliğinin üretim sürecine esneklik kazandırdığını ve toplam üretim süresini optimize etme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, siparişlerin bölünmesi ek planlama süreçleri gerektirdiğinden, bu stratejinin uygulanabilirliği işletmelerin operasyonel dinamikleri çerçevesinde dikkatle değerlendirilmelidir. Gelecek çalışmalarda, PMÇP'nin bölünebilir siparişler bağlamında daha kapsamlı şekilde ele alınması, farklı sipariş türleri ve kısıtlarla genişletilerek daha karmaşık üretim ortamlarına uyarlanması önerilmektedir. Ayrıca, geliştirilen modellerin büyük ölçekli veri kümeleri üzerinde test edilmesi, etkinliklerinin daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini sağlayacaktır.

Gelecek alışmalar için oneriler olarak hibrit optimizasyon yaklaşımları GA gibi sezgisel yöntemlerin yanı sıra, Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Tavlama Benzetimi (SA) ve Karınca Kolonisi Optimizasyonu (ACO) gibi farklı sezgisel ve metasezgisel algoritmaların kombinasyonu ile hibrit modeller geliştirilebilir. Derin ğrenme ve yapay zeka uygulamaları kullanılabilir. Makine ğrenmesi ve derin öğrenme teknikleri kullanılarak üretim sürecindeki karar mekanizmaları iyileştirilebilir. Özellikle, geçmiş veri setlerinden öğrenerek daha etkili çizelgeleme stratejileri öneren veri odaklı modeller geliştirilebilir.

Ayrıca gerçek zamanlı optimizasyon ile dinamik üretim ortamlarında gerçek zamanlı çizelgeleme yapılabilmesi için online optimizasyon yöntemleri araştırılabilir. Üretim sürecinde meydana gelen değişikliklere anında uyum sağlayan adaptif algoritmaların entegrasyonu değerlendirilebilir. Kesintili ve esnek üretim modelleriyle Model 2’de ele alınan sipariş bölünebilirliği konusu, daha karmaşık üretim senaryolarına uygulanarak, farklı üretim hatlarında kesintili iş akışı ve esnek üretim stratejileri ile genişletilebilir.

Çok amaçlı optimizasyon teknikleri ile çalışmadaki toplam gecikme süresi ve maksimum tamamlanma süresinin yanı sıra, maliyet, enerji tüketimi ve kaynak kullanım verimliliği gibi ek hedefler dikkate alınarak çok amaçlı optimizasyon modelleri geliştirilebilir.

## KAYNAKÇA

- Abderrabi, F. G. (2021). Flexible job shop scheduling problem with sequence dependent setup time and job splitting: Hospital catering case study, . Applied Sciences -Basel.
- Abreu, L., & Prata, B. (2019). A genetic algorithm with neighborhood search procedures for unrelated parallel machine scheduling problem with sequence-dependent setup times. *Journal of Modelling in*, Vol.5(No.3), 809-828. doi:DOI 10.1108/JM
- Akyol, E., & Saraç, T. (2017). Paralel Makina Çizelgeleme Problemi için bir Karma Tamsayılı Programlama Modeli: Ortak Kaynak Kullanımı. *Fen Bilimleri Dergisi Part C:Tasarım ve Teknoloji*, 109-126.
- Allahverdi, A., Ng, C., Cheng, T., & Kovalyov, M. (2006). A survey of scheduling problems with setup times or costs. *European Journal of Operational Research*, 187(3), 985-1032.
- Arnaout, J.-P. (2020). A worm optimization algorithm to minimize the makespan on unrelated parallel machines with sequence-dependent setuo times. *Annals of Operations Research* (285), 273-293. doi:<https://doi.org/10.1007/s10479-019-03138-w>
- Baeldung . (2024). Genetic Algorithms: Crossover Probability and Mutation Probability. <https://www.baeldung.com/cs/genetic-algorithms-crossover-probability-and-mutation-probability>.
- Baruch Mor, G. M. (2025). Scheduling problems on parallel machines with machine-dependent generalized due-dates. *Annals of Operations Research*.
- Brucker , P. (2001). *Scheduling Algoritms*. Springer.
- Bushra , A., & Arafat , A. (2024). Genetic algorithms: theory, genetic operators, solutions, and applications. *Evolutionary Intelligence*, 1245-1256.
- Caniyilmaz, E., Benli, B., & İlkay, M. (2015). An artificial bee colony algorithm approach for unrelate parallel machine scheduling with processing set restrictions,job sequence-dependent setup times, and due date. *Int J Adv Manuf Technol*, 77, 2105–2115. doi:DOI 10.1007/s00170-014-6614-9
- Carvalho, D., & Nascimento, M. (2022). Hybrid matheuristics to solve the integrated lot sizing

- and scheduling problem on parallel machines with sequence-dependent and non-triangular setup. *European Journal of Operational Research*(296), 158-173.
- Ceylan, Z., Karan, R., Bakırcı, Ç., & Sabuncu, S. (2019). Sıra Bağımlı Hazırlık Süreli Tek Makine Çizelgeleme Problemi: Beyaz Eşya Sektöründe Bir Uygulama. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 3(1), 14-21.
- Christian Perez Bernal, M. A. (2025). Optimizing energy efficiency in unrelated parallel machine scheduling problem through reinforcement learning . *Informations Sciences* .
- Chua, G., Ravindran, A., L. Senga, J., & Viswanathan, S. (2023). Job scheduling for maximum revenue on uniform, parallel machines with major and minor setups and job splitting. *Computers & Industrial Engineering*, 178.
- CUI, W. z. (2024). Integrating Order Splitting and Acceptance with Batch Delivery in Parallel Machine Scheduling. *SYSTEMS*, 12(354).
- Çalışkan, E., İşleyen, S., & Çerçioğlu, H. (2021). A mixed integer mathematical model for loading problem in seru manufacturing systems and matheuristic solution approach. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(2), 793-806.  
doi:10.17341/gazimmfd.603882
- Cota, L., Guimar, F., Oliveira, F., & Souza, M. (2017). An Adaptive Large Neighborhood Search with Learning Automata for the Unrelated Parallel Machine Scheduling Problem. *IEEE*. doi:978-1-5090-4601-0/17/\$31.00
- Dağ, S. (2012). Akış Tipi Çizelgeleme Problemlerinin Sezgisel Yöntemlerle Optimizasyonu. İstanbul: İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Doktora tezi.
- Demir, A., & Gelen Mert, M. (2022). A new selection strategy for multi objective genetic algorithm: MultiMoora Rank Selection. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37(4), 2119-2131.
- Duran, E., Öztürk, C., & Örnek, M. A. (2024). Combinatorial optimization methods for yarn dyeing. *Flexible Services and Manufacturing Journal*.  
doi:<https://doi.org/10.1007/s10696-024-09541-1>

- Elyasi, M., Selçuk, Y., Özener, O., & Çoban, E. (2024). Imperialist competitive algorithm for unrelated parallel machine scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, 110086(190).
- Emrah B. Edis, C. O. (2012). Paralel makinelerde işlerin ve makine operatörlerinin birlikte çizelgelenmesi problemine çözüm yaklaşımları. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 27(3), 527-535.
- Eroğlu Y. Duygu, Özmutlu, H., & Köksal, S. (2014). A genetic algorithm for the unrelated parallel machine scheduling problem with job splitting and sequence-dependent setup times - loom scheduling. *TEKSTİL ve KONFEKSİYON*(29(1)), 67-72.
- Feifeng Zheng, K. J. (2022). Unrelated parallel machine scheduling with processing cost, machine, eligibility and order splitting. *Computers& Industrial Engineering*, 171.
- Garey, M., D.S., J., & Sethi, R. (1976). The Complexity of Flowshop and Jobshop Scheduling. *Mathematics of Operations Research*, 1(2), 117-129.
- Gonzalez, P., & Framinan, J. (2018). Single machine scheduling with periodic machine availability. *Computers & Industrial Engineering*, 18-188.
- Holland, J. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. University of Michigan Press.
- Jatinder N.D. Gupta, E. F. (2006). Flowshop scheduling research after five decades. *European Journal of Operational Research*, 699-711.
- Kaçar, T., & Olgun, M. O. (2020). Bir metal Fabrikası İçin iş Çizelgeleme Yazılımı Hazırlanması. *BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 1(7), 421-443.  
doi:10.35193/bseufbd.589585
- Kaya , S., & Fırlalı, N. (2018). Çok amaçlı esnek atölye tipi çizelgeleme problemlerinin çözümünde meta sezgisel yöntemlerin kullanımı. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 3, 222-233.
- Kaya, S., & Karaçizmeli, İ. (2018). Hazırlık Zamanlı Ortak Teslim Tarihli Özdeş Paralel Makine Çizelgeleme Problemlerinin Çok Amaçlı Çözümü. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 205-213. <http://dergipark.gov.tr/humder> adresi

- Kılıç, G. (2023). Sıra Bağımlı İlişkisiz Paralel Makine Çizelgeleme Problemi İçin Yeni Bir Sezgisel Algoritma Önerisi. Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Doktora Tezi İşletme Ana Bilim Dalı.
- Kim, Y.-H., & Kim, R.-S. (2020). Insertion of new idle time for unrelated parallel machine scheduling with job splitting and machine breakdowns. *Computers & Industrial Engineering*(147). doi:<https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106630>
- Lange, R., Chen, Y., Zahavy, C., & Schaul, T. (2023). Discovering Attention-Based Genetic Algorithms via Meta-Black-Box Optimization. arXiv preprint arXiv:2304.03995.
- Lee, J. H., & Kim, H. J. (2021). A heuristic algorithm for identical parallel machine scheduling: splitting jobs, sequence dependent setup times, and limited setup operators. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 33, 992-1026.
- Li, D., Wang, J., Qiang, R., & Chiong, R. (2021). A hybrid differential evolution algorithm for parallel machine scheduling of lace dyeing considering colour families, sequence-dependent setup and machine eligibility. *International Journal of Production Research*, 59(9), 2722-2738. doi:<https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1740341>
- Liu, H. (2009). A multi-swarm approach to multi-objective flexible job-shop scheduling problems,. *Fundamenta Informaticae*, 465-489.
- Lv, Z., Zhao, Y., Kang, H., Gao, Z., & Qin, Y. (2024). An Improved Harris Hawk Optimization Algorithm for Flexible Job Shop Scheduling Problem. *Computers, Materials& Continua*. doi:DOI: 10.32604/cmc.2023.045826
- M. Parichehreh, H. G.-F. (2024). An energy efficient unrelated parallel machine scheduling problem with learning effect of operators and deterioration of jobs. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 9651-9676.
- Miettinen. (1998). *Nonlinear Multiobjective Optimization*. Almany: Springer Science & Business Media, 1999.
- Milad Asadpour, Z. H. (2022). A green model for identical parallel machines scheduling problem considering tardy jobs and job splitting property. *Sustainable Operations and*

Computers, 149-155.

Mohammad Arani, M. M. (2024). Unrelated Parallel Machine Scheduling Problem Considering Job Splitting, Inventories, Shortage, and Resource: A Meta-Heuristic Approach . Systems .

Mohammad Yaghtin, Y. J. (2025). Multiobjective unrelated parallel machines scheduling problem with periodic maintenance activities and dependent processing times . Journal of Modelling Management, 474-494.

Mourtos, I., Vatikiotis, S., & Zois, G. (2023). Scheduling Jobs on Unrelated Machines with Job Splitting and Setup Resource Constraints for Weaving in Textile Manufacturing. Hal Open Science, 424-434.

Ostovaria, A., Benyoucef, L., Benderbal, H., & Delorme, X. (2024). Economic Sustainable RMS: Lp-metric vs Epsilon Constraint Socio-Economic Sustainable RMS: Lp-metric vs Epsilon Constraint. Procedia Computer Science, 232, 456-464.

Özfiat M., P. (2013). Üretim çizelgeleme. Manisa: Celal Bayar Üniversitesi Rektörlük Matbaası.

Pinedo, M. L. (2016). Scheduling: Teory, Algorithms, and Systems. Springer.

Ren, W. W. (2020). Multi-objective optimisation for energy-aware flexible job-shop scheduling problem with assembly operations. International Journal of Production Research.

Ruiz, R., Maroto, C., & Alcaraz, J. (2006). Two new robust genetic algorithms for the flowshop scheduling problem. Omega The International Journal of Management Science, 461 – 476.

Sang-Hyun CHOL, H.-J. K. (2024). Reinforcement Learning For Unrelated Parallel Machine Scheduling With Release Dates, Setup Times, And Machine Eligibility. Proceedings of the 2024 Winter Simulation Konferans .

Saraç , T., & Tutumlu , B. (2022). İşlerin bölünebildiği ilişkisiz Paralel Makine Çizelgeleme problemi için iki amaçlı bir matematiksel model. Journal of the Faculty of Engineering and Gazi University, 37:4, 2293-2307. doi:10.17341/gazimmfd.967343

- Saraç , T., & Tutumlu, B. (2022). İlişkisiz paralel makine çizelgeleme probleminde eniyi makine sayısının belirlenmesi için bir doğrusal tamsayılı matematiksel model ve çözüm yaklaşımları. *Journal of the faculty of Gazi University*, 37(1), 329-345.
- Soleimani, H., Ghaderi, H., Tsai, P.-W., & Zarbakhshnia, N. (2020). Scheduling of unrelated parallel machines considering sequence-related setup time, start time-dependent deterioration, position-dependent learning and power consumption minimization. *Journal of Cleaner Production*, 249. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119428>
- Şenbay, Ç. (2021). Bir iplik fabrikasında siparişlerin çizelgelenmesi. *ESOGÜ Müh Mim Fak Derg.* 2021, 29(1), 64-76.
- Tapkan, P., Özbakır, L., Kulluk, S., & Telcioğlu, B. (2018). Modelling and solving railway crew rostering problem. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(3), 953-965.
- Tutumlu, B. (2021). İşlerin Bölünebildiği Esnek Atölye Tipi Çizelgeleme Problemi için Bir Matematiksel Model ve Melez Bir Genetik Algoritma. Eskişehir: Eskişehir Osmangazi Üniversitesi fen bilimleri enstitüsü.
- Villa, F., Vallada, E., & Fanjul-Peyro, L. (2018). Heuristic algorithms for the unrelated parallel machine scheduling problem with one scarce additional resource. *Expert Systems With Applications*(93), 28-38.
- Wang, C., Liu, C., Zhang, Z.-h., & Zeng, L. (2016). Minimizing the total completion time for parallel machine scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, 97, 170-182.
- Wang, W.-L., Wang, H.-Y., Zhao, Y.-W., Zhang, L.-P., & Xu, X.-L. (2012). Parallel machine scheduling withs plitting jobs by a hybrid differential evolution algorithm. *Computers & Operations Research*, 40, 1196-1206.
- Xin GUO, Q. D. (2024). An effective multi-stage evolutionary algorithm for distributed scheduling with splitting jobs in heterogeneous factories. *Engineering Optimization*, 57(3), 688-716.
- Yeh, W.-C., Lai, P.-J., Lee, W.-C., & Chuang, M.-C. (2014). Parallel-machine scheduling to

minimize makespan with fuzzy. Information Sciences(269), 142-158.

Zekun Huang, S. G. (2025). A Two-Stage Multi-Objective Evolutionary Algorithm for the Dual-Resource Constrained Flexible Job Shop Scheduling Problem with Variable Sublots. Process, 13(487).



## ÖZGEÇMİŞ

| Kişisel Bilgiler                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Adı Soyadı:</b>                                                                                                                                                                                                                                   | Filiz IŞIK                                                                                  |
| <b>Doğum tarihi:</b>                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                             |
| <b>Doğum Yeri:</b>                                                                                                                                                                                                                                   | Merkez/Mersin                                                                               |
| <b>Uyruğu:</b>                                                                                                                                                                                                                                       | T.C.                                                                                        |
| <b>Adres:</b>                                                                                                                                                                                                                                        | Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi A blok<br>Endüstri mühendisliği Bölümü           |
| <b>Tel:</b>                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                             |
| <b>E-mail:</b>                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                             |
| Eğitim                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                             |
| <b>Lise:</b>                                                                                                                                                                                                                                         | Mersin Şevket Pozcu Lisesi                                                                  |
| <b>Lisans:</b>                                                                                                                                                                                                                                       | Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Endüstri<br>Mühendisliği                    |
| <b>Yüksek lisans:</b>                                                                                                                                                                                                                                | Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri<br>Mühendisliği Anabilim Dalı (2025) |
| Yabancı Dil Bilgisi                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                             |
| <b>İngilizce:</b>                                                                                                                                                                                                                                    | İyi                                                                                         |
| Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                             |
|                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                             |
| Tezden Üretilmiş Yayınlar                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                             |
| 1. Konfeksiyon Sektöründe Siparişlerin Bölünebilirlik Durumuna Göre İki Amaçlı İlişkisiz Paralel Üretim Hattı Çizelgeleme Probleminin Doğrusal Karma Tamsayılı Modellenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi Mart 2025 |                                                                                             |