

Bütünleşik Hücre Oluşturma ve Parça Çizelgeleme Probleminin Modellenmesi ve  
Bir Sezgisel Çözüm Önerisi

Yeliz Buruk Şahin

**DOKTORA TEZİ**

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Şubat 2017

Modeling of Integrated Cell Formation and Part Scheduling Problem and  
a Heuristic Solution Approach

Yeliz Buruk Şahin

**DOCTORAL DISSERTATION**

Department of Industrial Engineering

February 2017

Bütünleşik Hücre Oluşturma ve Parça Çizelgeleme Probleminin Modellenmesi ve  
Bir Sezgisel Çözüm Önerisi

Yeliz Buruk Şahin

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı  
Endüstri Mühendisliği Bilim Dalında  
DOKTORA TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Şerafettin Alpay

Bu Tez ESOGU Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından \201515A207  
(2015-787)\ no'lu proje çerçevesinde desteklenmiştir.

Şubat 2017

## ONAY

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora öğrencisi Yeliz Buruk Şahin'in DOKTORA tezi olarak hazırladığı "Bütünleşik Hücre Oluşturma ve Parça Çizelgeleme Probleminin Modellenmesi ve Bir Sezgisel Çözüm Önerisi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek "oybirliği" ile kabul edilmiştir.

**Danışman** : Doç. Dr. Şerafettin Alpay

**İkinci Danışman** : -

**Doktora Tez Savunma Jürisi:**

**Üye** : Doç. Dr. Şerafettin Alpay

**Üye** : Prof. Dr. A. Attila İşlier

**Üye** : Prof. Dr. Levent Kandiller

**Üye** : Doç. Dr. Özden Üstün

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. Servet Hasgül

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve  
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN  
Enstitü Müdürü

## ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Şerafettin Alpay danışmanlığında hazırlamış olduğum “Bütünleşik Hücre Oluşturma ve Parça Çizelgeleme Probleminin Modellenmesi ve Bir Sezgisel Çözüm Önerisi” başlıklı DOKTORA tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 22/02/2017

Yeliz Buruk Şahin

İmza

## ÖZET

Bu çalışmada, bütünleşik hücre oluşturma ve parça çizelgeleme problemi için çözüm yaklaşımları geliştirilmiştir. Hücre oluşturma boyutunda, hücre dışı elemanların ve hücre içi boşlukların en küçüklenmesi, çizelgeleme boyutunda ise en büyük tamamlanma zamanının en küçüklenmesi amaçları dikkate alınmıştır. Problemin çözümüne yönelik olarak yeni bir matematiksel model önerilmiş ve modelin başarısı literatürden hareketle türetilen küçük, orta ve büyük boyutlu veri setleri üzerinde denenmiştir. Modelin, küçük boyutlu veri setleri üzerinde makul sürede en iyi çözümleri elde ettiği görülmüştür. Ele alınan problemin NP-zor yapıda olması sebebiyle, geliştirilen model türetilen orta ve büyük boyutlu problemlerin çözümünde yetersiz kaldığından yeni bir genetik algoritma yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen yaklaşımın başarılı çözümler verdiği, türetilen orta ve büyük boyutlu test problemleri üzerinde gösterilmiştir. Ayrıca, önerilen genetik algoritma yaklaşımı ile büyük boyutlu bir gerçek hayat problemi de başarıyla çözdürülmüş ve mevcut duruma kıyasla sağlanan katkılar raporlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Hücre oluşturma, Çizelgeleme, Matematiksel model, Genetik algoritma, Hücre dışı eleman, Hücre içi boşluk

## SUMMARY

In this study, solutions approaches for the integrated cell formation and part scheduling problem were developed. While in the scope of the cell formation, exceptional elements and voids were being considered, the make-span of the jobs was considered in the side of scheduling. A new mathematical model was developed and the performance of the model was tested on the small, medium and large sized data sets derived from the relevant literature. The test results show that the model could obtain best results for the small sized problem sets in reasonable computation times. Because of the NP-hard nature of the considered problem, the proposed model couldn't be effective to obtain best results for medium and large sized test problems, so a new genetic algorithm was proposed. It was shown that the developed GA could give successful results on the medium and large sized test problems. Additionally, a real life problem was solved effectively by the new genetic algorithm and contributions obtained compared to the current situation were reported.

**Keywords:** Cell formation, Scheduling, Mathematical model, Genetic algorithm, Exceptional element, Void

## TEŞEKKÜR

Maddi ve manevi yardımlarını yaşam boyu olduğu gibi, tez çalışmalarım süresince de hiç eksik etmeyen canım aileme ve çalışma sürecimde desteğini esirgemeyen eşime teşekkür ederim.

Doktora tez çalışmalarımı yürütürken bana sürekli destek vererek tezimin bu noktaya gelmesini sağlayan danışman hocam sayın Doç. Dr. Şerafettin Alpay'a tüm katkılarından dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım süresince bilgi ve tecrübelerini hiçbir zaman benden esirgemeyen ve tez izleme komitesinde yer alarak beni yönlendirmeye çalışan sayın hocalarım Prof. Dr. A. Attila İşlier ve Prof. Dr. Levent Kandiller'e katkılarından dolayı çok teşekkür ederim. Tez savunma jürimde yer alan sayın Doç. Dr. Özden Üstün ve Yrd. Doç. Dr. Servet Hasgöl hocalarıma değerli katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım. Yanı sıra eğitim hayatım boyunca edindiğim bilgi ve tecrübelerime katkı sunan tüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalışması, ESOGU Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından "201515A207 (2015-787)" no'lu proje kapsamında desteklenmiştir.



## İÇİNDEKİLER

|  | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| <b>ÖZET .....</b>  | <b>vi</b>    |
| <b>SUMMARY .....</b>   | <b>vii</b>   |
| <b>TEŞEKKÜR .....</b>  | <b>viii</b>  |
| <b>ŞEKİLLER DİZİNİ.....</b>  | <b>xi</b>    |
| <b>ÇİZELGELER DİZİNİ.....</b>  | <b>xii</b>   |
| <b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....</b>   | <b>xiii</b>  |
| <b>1.GİRİŞ VE AMAÇ .....</b>   | <b>1</b>     |
| <b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....</b>  | <b>4</b>     |
| 2.1. Hücresel Üretim Sistemleri .....  | 4            |
| 2.1.1. Hücre oluşturma problemi.....   | 8            |
| 2.1.2. Hücre yerleşimi problemi.....   | 13           |
| 2.1.3. Kaynak atama problemi.....  | 13           |
| 2.1.4. Parça çizelgeleme problemi.....   | 14           |
| 2.2. Bütünleşik Hücre Oluşturma ve Parça Çizelgeleme Problemi .....                    | 20           |
| 2.3. Hücresel İmalatta Parça Çizelgelemeyi Dikkate Alan Çalışmalar.....                | 24           |
| <b>3. YÖNTEM .....</b>   | <b>31</b>    |
| 3.1. Bütünleşik Hücre Oluşturma ve Parça Çizelgeleme Probleminin<br>Tanımlanması ..... | 31           |
| 3.2. Matematiksel Model, Doğrusallaştırma ve Boyut Analizi.....                        | 32           |
| 3.3. Geliştirilen Genetik Algoritma Temelli Çözüm Yaklaşımı .....                      | 48           |
| 3.3.1. Problemin kromozom gösterimi.....   | 50           |
| 3.3.2. Uyum fonksiyonu, seçim ve genetik operatörler.....                              | 53           |
| 3.3.3. Parametre tasarımı .....  | 60           |
| 3.3.4. Genetik algoritma parametrelerinin ve düzeylerinin belirlenmesi .....           | 62           |
| <b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>  | <b>66</b>    |

## İÇİNDEKİLER (devam)

|  | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| <b>5. OTOMATİV SEKTÖRÜNDE BİR UYGULAMA.....</b>  | <b>71</b>    |
| <b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>   | <b>77</b>    |
| <b>KAYNAKLAR DİZİNİ .....</b>  | <b>80</b>    |
| <b>EK AÇIKLAMALAR .....</b>  | <b>90</b>    |
| Ek Açıklama A: Problem seti (Fattahi vd., 2007).....   | 90           |
| Ek Açıklama B: Gams kodu.....  | 98           |
| Ek Açıklama C: Matlab kodu.....  | 104          |
| Ek Açıklama D: Uygulama problemi verileri .....  | 113          |
| Ek Açıklama E: Uygulama problemi için deney tasarımı planı .....                                 | 115          |
| Ek Açıklama F: Varyans analizi sonuçları .....   | 119          |
| Ek Açıklama G: Farklı ağırlıklar için a) ortalama ve b) sinyal gürültü oranı<br>grafikleri ..... | 120          |
| Ek Açıklama H: Mevcut sistem çizelgeleme sonuçları.....  | 124          |
| Ek Açıklama I: En iyi çözümler için hücre oluşturma ve çizelgeleme sonuçları ....                | 125          |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>  | <b>129</b>   |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>Sekil</u>   | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| 2.1. (a) Parça makine matrisi, (b) Parça makine blok diyagonal matrisi (c) İyileştirilmiş parça makine matrisi (Singh ve Rajamani, 1996) ..... | 9            |
| 2.2. Hücre oluşturma ve çözüm tekniklerinin sınıflandırılması (Papaioannou ve Wilson, 2010) .....  | 12           |
| 3.1. Gantt şeması (sayısal örnek-1) .....  | 39           |
| 3.2. Gantt şeması (sayısal örnek-2) .....  | 41           |
| 3.3. Genetik algoritma akış şeması .....   | 49           |
| 3.4. Kromozom gösterimi .....  | 50           |
| 3.5. Hücreye atama kısmı (rassal değerlerle gösterim) .....  | 51           |
| 3.6. Hücreye atama kısmı (gerçek değerlerle gösterim) .....  | 51           |
| 3.7. Makineye atama kısmı (rassal değerlerle gösterim) .....   | 52           |
| 3.8. Makineye atama kısmı (gerçek değerlerle gösterim) .....   | 52           |
| 3.9. İşlem sıralama kısmı (rassal değerlerle gösterim) .....   | 52           |
| 3.10. İşlem sıralama kısmı (gerçek değerlerle gösterim).....   | 53           |
| 3.11. (a) Çizelge Matrisi (b) Başlangıç makine belirteci (MB) (c) Başlangıç parça belirteci (PB).....  | 53           |
| 3.12. (a) Başlangıç makine belirteci (MB) (b) Başlangıç parça belirteci (PB).....  | 54           |
| 3.13. Problemin çözümü için geliştirilen program akış diyagramı .....  | 57           |
| 3.14. Önerilen kromozom yapısı için tek nokta çaprazlama gösterimi .....   | 59           |
| 3.15. Önerilen kromozom yapısı için iki nokta çaprazlama gösterimi .....   | 59           |
| 3.16. Önerilen kromozom yapısı için dağıtık çaprazlama gösterimi .....   | 60           |
| 3.17. Ortalamalar için ana etkiler grafiği (SFJSCF_7) .....  | 65           |
| 3.18. S/N için ana etkiler grafiği (SFJSCF_7) .....  | 65           |
| 4.1. Matematiksel model ve GA sonuçlarının karşılaştırılması (iki hücre) .....   | 69           |
| 4.2. Matematiksel model ve GA sonuçlarının karşılaştırılması (üç hücre) .....  | 69           |
| 4.3. Orta ve büyük boyutlu problemlerde sapma değerlerinin incelenmesi (iki hücre) ..  | 70           |
| 4.4. Orta ve büyük boyutlu problemlerde sapma değerlerinin incelenmesi (üç hücre)...   | 70           |
| 5.1. Farklı ağırlıklar dikkate alınarak elde edilen çözümlerin karşılaştırılması .....   | 75           |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

| <u>Cizelge</u>   | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| 2.1. Hücresel üretimin tasarımı ve uygulanması aşamasında dikkate alınması gerekli sorular .....                                 | 5            |
| 2.2. İş atölyesi problemine bir örnek .....  | 22           |
| 2.3. Esnek iş atölyesi problemine bir örnek .....  | 24           |
| 2.4. Hücre oluşturma ve çizelgeleme problemlerini birlikte dikkate alan çalışmalar....   | 29           |
| 3.1. Örnek esnek atölye ortamı veri seti (3 iş ve 5 makine) .....  | 37           |
| 3.2. $p_{i,j,k}$ verileri (sayısal örnek-1) .....  | 37           |
| 3.3. Atama sonuçları (sayısal örnek-1) .....   | 38           |
| 3.4. Hücre oluşturma matrisi (sayısal örnek-1).....  | 38           |
| 3.5. Çizelgeleme sonuçları (sayısal örnek-1).....  | 39           |
| 3.6. Örnek esnek atölye ortamı veri seti (7 iş ve 7 makine).....   | 39           |
| 3.7. Atama sonuçları (sayısal örnek-2) .....   | 40           |
| 3.8. Hücre oluşturma matrisi (sayısal örnek-2).....  | 40           |
| 3.9. Çizelgeleme sonuçları (sayısal örnek-2) .....   | 40           |
| 3.10. Matematiksel model için boyut analizi (kısıt ve eşitlik temelinde - örnek problem SFJSCF_7, $i=3,j=3,k=5,c=2, l=4$ ) ..... | 42           |
| 3.11. Matematiksel model için boyut analizi (değişken temelinde - örnek problem SFJSCF_7, $i=3,j=3,k=5,c=2, l=4$ ) .....         | 43           |
| 3.12. Türetilen test problemleri ve ilgili parametreler (küçük boyut).....   | 45           |
| 3.13. Türetilen test problemleri ve ilgili parametreler (orta/büyük boyut) .....   | 46           |
| 3.14. Çizelgeleme amacına yönelik elde edilen en iyi sonuçlar .....  | 47           |
| 3.15. Seçilen GA faktör ve düzeyleri .....   | 62           |
| 3.16. L18 Taguchi deney tasarımı planı (küçük boyut) .....   | 63           |
| 3.17. Varyans analizi sonuç tablosu (SFJSCF_7).....  | 63           |
| 3.18. Ortalamalar ve S/N için yanıt tablosu (SFJSCF_7) .....   | 64           |
| 4.1. Türetilen test problemlerine ilişkin sonuçlar (küçük boyut).....  | 67           |
| 4.2. Türetilen test problemlerine ilişkin sonuçlar (orta/büyük boyut) .....  | 68           |
| 5.1. Farklı ağırlıklar için belirlenen en iyi parametre düzeyleri .....  | 74           |
| 5.2. Uygulama problemi en iyi çözüm sonuçları ve mevcut durumla karşılaştırma.....   | 74           |

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**

| <b><u>Kısaltmalar</u></b> | <b><u>Açıklama</u></b>                 |
|---------------------------|--|
| BBAA                      | Bakteriyel Besin Arama Algoritması     |
| EATÇP                     | Esnek Atölye Tipi Çizelgeleme Problemi |
| GA                        | Genetik Algoritma                      |
| HDE                       | Hücre Dışı Eleman                      |
| HİB                       | Hücre İçi Boşluk                       |
| KKA                       | Karınca Kolonisi Algoritması           |
| TA                        | Tabu Arama                             |
| TB                        | Tavlama Benzetimi                      |

## 1. GİRİŞ VE AMAÇ

İmalat sanayinde artan rekabet koşulları ve müşteri beklentileri işletmeleri ürün tasarım ve imalatında farklı seçeneklere yönlendirmiştir. Günümüz koşullarında işletmeler, müşteri beklentilerini karşılayabilmek üzere, farklı ürün çeşitliliğini, makul fiyat ve kalitede sağlamak zorunda kalmıştır. Ürün çeşitliliğindeki artış ile birlikte, ürün talep hacimlerinin azalması kullanım oranlarının azalmasıyla sonuçlanmıştır. Bununla birlikte, her bir farklı ürün tasarım gereksinimi, donanım ve yatırım maliyetlerini yükseltmekte, daha karmaşık bir üretim sistemi ortaya çıkarmakta, yanı sıra imalatta esnekliği azaltmaktadır.

Klasik üretim sistemlerinden akış tipi ve atölye tipi üretim ortamları günümüz müşteri ihtiyaçlarını karşılamakta yetersiz kalmış, pazar ihtiyaçlarına cevap verememiştir. Sözü edilen zorlukların üstesinden gelmek üzere, tasarım imalat ilişkisini bütünleştirecek daha esnek ve etkili bir sistem ihtiyacı doğmuştur. Grup teknolojisi bu konuda önde gelen felsefelerdendir. Grup teknolojisi, benzer parçaları geometrik, işlem ve fonksiyonel benzerliklerine göre gruplayarak tasarım ve imalat fonksiyonları arasında bir uyum elde etmeyi amaçlamaktadır. Öncelikli amacı, büyük imalat sistemlerinden küçük alt sistemler oluşturmak üzere ayrıştırmaktır (Singh, 1995). Wu vd. (2009) tarafından yapılan bir diğer tanıma göre, grup teknoloji, parça ve üretim süreçlerindeki benzerliklere dayanan bir imalat felsefesidir ve imalat ortamındaki uygulamaları hücreli üretim olarak adlandırılmaktadır.

Atölye ortamında karşılaşılan en önemli kararlardan biri işlerin çizelgelenmesidir. Çizelgeleme, kısıtlı kaynakların makinalara zamana dayalı olarak tahsis edilmesidir (Pinedo, 2002). Çizelgeleme, çok amaçlı bir karar verme sürecidir. Günümüz işletmelerinde, çizelgeleme kararları önemli bir rekabet unsuru haline gelmiş durumdadır. İşlerin tek bir işlem ile tamamlanabildiği problem tek makineli sistem olarak adlandırılır. Aynı işlemi gerçekleştirebilen birden fazla makinenin mevcut olduğu problem ise paralel makineli sistem olarak adlandırılır. Paralel makinelerin işleri gerçekleştirebilme süresinin aynı ya da farklı olma durumuna göre de sistem özdeş ya da özdeş olmayan paralel makineli sistem olarak isimlendirilir. İşlerin birden fazla işlem gerektirdiği durumlarda ise çok makineli sistem söz konusudur. Akış tipi ve atölye tipi sistemleri bu gruptadır. Akış tipi, aynı rotaya sahip  $n$  tane işin seri  $m$  makinenin her birinde işlem görmesidir. Benzer şekilde,  $m$  makineli

bir atölyede her işin önceden belirlenmiş rotasını izlediği durumda atölye tipi olarak adlandırılır. Değişen koşullarla birlikte, daha esnek üretim sistemlerine ihtiyaç artmıştır. Bu çalışmaya da konu olan EATÇP (esnek atölye tipi çizelgeleme problemi)'nde, klasik atölye tipinde olduğu gibi bir makine yerine, farklı işlerin farklı alternatif makinelerde aynı ya da farklı sürelerde işlenebilirliğini mümkün kılmaktadır. Diğer ifadeyle, klasik atölye tipinin geliştirilmiş halidir. EATÇP'nde iki alt problem mevcuttur. Bunlar, ilgili parça işleminin hangi alternatif makinede gerçekleştirileceği ve makinelerde işlerin gerçekleştirilme sırasının kararıdır.

Çalışmalarda, ilk başvuru olan çözüm yöntemi matematiksel eniyileme teknikleri olsa da, son yıllarda artan oranlarda sezgisellere başvurulmaktadır. Karaboğa (2004)'e göre sezgisel algoritma kullanılmasının pek çok nedeni vardır. İlgilenilen problemin yapısı kesin çözümü bulmaya elverişli olmayabilir. Sezgisel algoritmalar, karar verici açısından anlaşılması ve uygulanması kolay olabilir. Yanı sıra, öğrenme amaçlı ve kesin çözümü bulmak için bir araç olabilir. Modellemede pek çok gerçek hayat problemi özelliği varsayımlarla ihmal edildiğinden, sezgisel algoritmanın alt en iyi çözümleri daha iyi bir seçenek olabilir. En iyi çizelgenin elde edildiği düşünüldüğünde bile, uygulamada elde edilen ve en iyi çözümü vermeyen bir çizelge daha iyi olabilir. Bunun sebebi, amaç fonksiyonunda hesaba katılmayan özel kısıtları daha iyi sağlayabilir olmasıdır.

Bu çalışmada, hücreli üretim sistemlerinin oluşturulmasında esnek atölye tipi üretim ortamı dikkate alınmıştır. Esnek atölye ortamında, her bir işlem alternatif makine kümesinden bir makinede gerçekleştirilebilir ve klasik atölye tipinin geliştirilmiş halidir. Amaç, en iyi atama ve sıralamayı elde etmektir.

İkinci bölümde, hücreli üretim sistemleri, sistemin tasarımında başlıca kararlar, bütünleşik hücre oluşturma ve parça çizelgeleme problemi üzerinde durulmuştur. Ayrıca, hücre oluşturma boyutunu dikkate alan güncel literatür çalışmaları incelenmiş, yanı sıra esnek atölye ortamında hücre oluşturma problemini dikkate alan çalışmalara ayrıntılı yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde, problemin doğru bir şekilde tanımlanabilmesi ve küçük boyutlarda en iyi çözümün araştırılabilmesi için yeni bir doğrusal olmayan matematiksel model

geliştirilmiş ve doğrusallaştırılmıştır. Büyük boyutlu gerçek hayat problemlerini çözmek üzere yeni bir Genetik Algoritma (GA) çözüm yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen çözüm yaklaşımının etkinliğini arttırmak üzere, deney tasarımı yaklaşımıyla parametre eniyilemesi gerçekleştirilmiştir.

Dördüncü bölümde, önerilen yaklaşım literatür problemlerinden türetilen test problemleri üzerinde denenmiş ve elde edilen sonuçlar matematiksel modelin kısıtlı sürede elde ettiği sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Beşinci bölümde, otomotiv sektöründe faaliyet göstermekte olan bir firmanın imalat atölyelerinde esnek atölye tipi çizelgeleme ortamında üretim hücreleri oluşturma ve parça çizelgeleme problemlerinin eşzamanlı çözümü araştırılmıştır. Söz konusu işletme, kamyon parçaları üretimi ve montajı faaliyetlerini yerine getirmektedir. Gerçekleştirilen çalışmada, kritik imalat atölyeleri üzerinde çalışılmıştır. Önerilen yaklaşımlardan matematiksel model GAMS 24.6.1 yazılımında, geliştirilen GA ise MATLAB R2012a yazılımında kodlanmıştır. Literatürden yola çıkılarak türetilmiş test problemleri ve gerçek hayat uygulaması için başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Son bölümde, çalışma sonucu elde edilen bulgular tartışılmış, gelecek çalışma konuları için öneriler sunulmuştur.



## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

### 2.1 Hücresel Üretim Sistemleri

Hücresel üretim, grup teknolojisi felsefesinin üretimdeki uygulamasıdır. Hücresel üretim sistemleri, atölye tipi imalatın esnekliği ile akış atölyesinin etkinliğini birleştirmiştir. Hücresel üretim sistemlerinde, kaynaklar üretim hücreleri olarak adlandırılan birimlere dağıtılır ve bu hücrelerde parça ailesi olarak adlandırılan belirli ürünler üretilir. Böylelikle, benzer özellikteki parçalar, parça aileleri olarak gruplandırılmaktadır.

Hücresel üretimin başarılı uygulamalarına ilişkin derlemelere Wemmerlov ve Hyer (1989), Singh ve Rajamaani (1996) ve Wemmerlov ve John (1997)'da yer verilmiştir. Wemmerlöv ve Hyer (1986)'a göre hücresel üretimin amacı hazırlık maliyetlerini ve akış sürelerini azaltmak ve böylece stokları düşürmek, yanı sıra pazara yanıt verme süresini kısaltmaktır. Wemmerlov ve John (1997) ise hücresel üretimi, üretim planlama ve kontrolü süreçlerini basitleştiren başlıca faktör olarak tanımlamıştır.

Sınırlı sayıda parça ile ilgilenen birimlerin oluşturulması sayesinde, hücresel üretimde her bir hücrede bağımsız şekilde üretim kontrolü sağlanabilmektedir. Hücresel üretimin faydaları görülebilen ve görülemeyen faydalar olarak sınıflanabilir. Görülebilen faydalardan ilki, parça aileleri için gerekli makinelerin yakın konumlandırılmasıdır. Böylece, toplam parça taşıma mesafesi kısalmaktadır. İkinci olarak, ortalama süreç içi stok düzeylerinin azalmasıyla ardışık işlemler arasında parça tedarik süreleri kısalmaktadır. Üçüncü olarak, parça ailelerindeki parçalar eş ya da benzer işlemlere sahip olduğundan üretim hücresinde ardışık sıralanabilir. Son olarak, yakın konumlanmış makinelerde görevli işçiler birbirine hatalı parçalar konusunda geri bildirim sağlayabilir ve böylece kalite kontrol süreci kolaylaşır. İşçilerin uzmanlık düzeylerinde artış, daha az yeniden işlem maliyetli yüksek kalitede güvenilir üretim elde edilir. Özetle, hücresel üretim sistemleri ile, teslim zamanlarının, parça tedarik sürelerinin, malzeme akış ve taşıma sürelerinin, hazırlık sürelerinin, süreç içi stokların ve bitmiş ürün stoklarının en küçüklenmesi sağlanabilmektedir (Wemmerlöv ve Hyer, 1989). Üretim hücrelerinin bazı görülemeyen avantajları da mevcuttur. Öncelikle, başarılı bir ekip çalışmasını destekleyen bir felsefeye

dayanması itibariyle organizasyonun rekabet edebilirliğini arttırır. Yanı sıra, üretim hücreleri çalışanlara yüksek motivasyon ve daha iyi bir çalışma tatmini sağlar. Ek olarak, hücresel üretim otomasyona bir hazırlıktır ve bilgisayar desteğiyle bütünleştiğinde, üretim faaliyetleri daha ekonomik ve otomatik bir şekil kazanır.

Diğer taraftan, literatürde hücresel üretimin bazı dezavantajlarından bahsedilmiştir. Yüksek yatırım maliyeti gereksinimi ve makine/işçilik kullanım oranlarının düşük olabilmesi riski önde gelen sebeplerdir. Bağımsız hücreler oluşturabilmek için bazı makinaların sayısının arttırılması gerekli olmaktadır. Ancak, söz edilen dezavantajlar işletmeleri hücresel üretim sistemlerini kullanmaktan vazgeçmeye yöneltmemiştir.

İşlier (2015), hücresel üretimin kuramsal ve uygulamaya dönük kavramlarını incelemiş, yapay zeka vb. uygulamalarla hücresel üretim uygulamalarını daha başarılı hale getirecek önerilerde bulunmuştur. Bu kapsamda yazar, hücresel üretimde tasarım ve uygulama aşamasında dikkate alınması gerekli bazı noktalara Çizelge 2.1’de değinmiştir.

Çizelge 2.1. Hücresel üretimin tasarımı ve uygulanması aşamasında dikkate alınması gerekli sorular

| <b>Konu</b>       | <b>Cevaplanması gerekli sorular</b>  |
|-------------------|--|
| Problemin oluşumu | Hücresel imalat uygulaması kaçınılmaz mı, gerekli mi, yararlı mı, faydalı mı en azından olurlu mu? |
| Problemin kapsamı | Kaç hücre oluşturulması makul?   |
| Problem ortamı    | Problem grup teknolojisi, esnek üretim sistemleri ya da yalın üretim kapsamında ele alınabilir mi? |
| Talep Şekli       | Uzun dönemde üretim kararlı mı?  |
| Rotalar           | Rota verileri kesin mi? Alternatifler geliştirilebilir mi?   |
| Makineler         | Makine yetenekleri tanımlanmış mı?   |
| İnsan kaynakları  | Liderler mevcut mu?  |
| Takımlar          | Takımlar paylaşımlı olacak mı ya da arttırılabilir mi?   |
| Parçalar          | Tüm parçalar üretilecek mi? Dış yaptırım düşünülebilir mi?   |
| Beklentiler       | Hedef ve beklentiler belirli mi?   |
| Kapasite          | Mevcut makine sayısı ve yükleri biliniyor mu?  |
| Alan              | Mevcut alan büyüklük ve kalite yönlü yeterli mi?   |

Hücresel üretim sistemlerinin etkinliğini ölçmek üzere, çalışmalarda izleyen bazı amaçlar dikkate alınmıştır. Literatürde en çok karşılaşılan amaçlar, hücre içi ve hücreler arası taşımaların en küçüklenmesi, hücre içi boşlukların en küçüklenmesi, tek hücrede gerçekleştirilen parça işlemleri sayısının en büyüklenmesi, makine ve hücre kullanım oranlarının en büyüklenmesi, hazırlık süresi ve süreç içi stokların azaltılarak toplam maliyetin en küçüklenmesi, sermaye yatırımının en küçüklenmesi, makine yatırım maliyetlerinin en küçüklenmesi ve hücre yüklerinin dengelenmesidir. Hücre oluşturma problemine ilişkin oluşan başlıca maliyetler ise; hazırlık maliyeti, makine yatırım maliyeti, dış yaptırım maliyeti, takım kullanım maliyeti, makine işletim maliyeti, parça taşıma maliyeti, makine tamir maliyetleri, bakım maliyeti ve makine yeniden yerleşim maliyetleridir.

Literatürde hücre oluşturma problemlerinde öne çıkan üretim faktörleri Saxena (2011)'de izleyen şekilde belirtilmiştir:

Alternatif rotalar: Gerçek üretim sistemlerinde, bir parçanın üretimi birden fazla süreç planına göre gerçekleştirilebilmektedir. Alternatif süreç planları, hücresel üretim sistemleri tasarımını esnek hale getirebilmektedir. Daha düşük malzeme taşıma maliyeti sağlanabilmektedir.

Dinamik hücre oluşturma: günümüz koşulları, dönemsel olarak değişen ürün karmasını ile değişken taleplere hızlı cevap verme süresini gerektirir. Sonuç olarak, bir dönem için olası en iyi hücre yapılandırması, bir sonraki dönem için uygun olmayabilir. Bu sebeple, problemi dönemsel olarak dinamik ele almak daha iyi çözüm verebilir.

İşyükü dengeleme: Bir hücredeki toplam iş yükü, hücre içinde gerçekleştirilen işlemlerin işlem süreleri toplamına eşittir. İş yükünün dengeli olması, tamamlanma zamanı, akış süresi, gecikmeler gibi performans göstergelerini iyileştirir. Yanı sıra, süreç içi stokları azaltır, malzeme akışlarını iyileştirir ve bazı hücrelerin aşırı bazılarının ise az kullanımını önler.

Takım gereksinimi: bir parça ilgili makinedeki tüm ya da bazı takımlara ihtiyaç duyabilir. Birden fazla makinenin aynı takımlara sahip olması durumunda ise, parça için alternatif rotalardan söz edilebilir.

Makine yakınlık kısıtları: bazı makinelerin yakın konumlandırılması söz konusu iken, bazı makineler ise güvenlik vb. gerekçelerle uzak konumlandırılmak durumundadır.

İşlemlerin sırası: Bir parçanın üretimi için gerekli operasyonların gerçekleştirilme sırasını ifade etmektedir. Bu parametrenin göz ardı edilmesi malzemenin hücreler arası kat ettiği uzaklığının belirlenmesinde de hatalı ölçüme yol açmaktadır.

Hazırlık süresi: makine ya da malzeme üzerindeki takım ya da kalıp değişimlerini ifade eder. Parçaların makinelerdeki işleme sırasının bu süreyi kısaltabileceği söylenebilir.

Hücre büyüklüğü kısıtı: hücreler arası taşımalar ile doğrudan ilişkili olup, büyük ölçüde taşıma maliyetlerini etkiler.

Hücreler arası uzaklıklar: parça hareketlerini etkiler, dış elemanların maliyetini en küçüklemek için toplam taşıma mesafesinin en küçüklenmesi gerekmektedir.

Tesis yerleşimi: makinelerin konumu hücre içerisindeki konumu parça hareketlerini/ taşımaları doğrudan etkiler.

Operatör atama: operatörlerin beceri ve uzmanlık düzeylerinin dikkate alınarak makinelere ve parçalara atanması ürün kalitesinde artış, sürelerde kısalma gibi pek çok fayda sağlar.

Makine Kapasitesi: makineler için elverişli çalışma süresi ya da kapasite sınırlıdır. Bu durum, üretim hacmi ve süre kısıtlarını etkilemez.

Özdeş makineler: aynı parça operasyonlarını aynı sürede gerçekleştirebilen birden fazla makine söz konusu olabilir.

İşleme süresi/maliyeti: hücre yükleri, üretim hacmi ve gerekli makine sayıları açısından, alternatif rotalarda parçaların işlenme süreleri hücre yüklerini de belirlemek adına dikkate alınmalıdır.

Parti büyüklüğü belirleme: pek çok çalışma, üretim dönemlerindeki parça taleplerini dikkate almamaktadır. Bu parametre makineler ve hücreler arası hareket sayısı ve toplam uzaklığı etkilemektedir.

Makine bozulmaları: makine tamir maliyetleri, makine eskimesine bağlı üretim sürelerinde artış ve üretim kayıp maliyeti gibi göstergeleri önemli ölçüde etkiler.

Hücresel üretim süreci temelde, hücre oluşturma, hücresel yerleşim, kaynak atama ve parça çizelgeleme olmak üzere dört aşamadan oluşmaktadır. Farklı kaynaklarda bu konular ayrı ayrı ya da birlikte ele alınmıştır. İzleyen alt bölümlerde konulara ilişkin ayrıntılı bilgiler verilmiştir.

### **2.1.1 Hücre oluşturma problemi**

Hücrelerin oluşturulması, hücresel üretimde hücre tasarımının başlangıç faaliyeti olarak düşünülebilir. Bu aşama, parça aileleri ve makinaları gruplayarak oluşturulacak hücrelere atanmalarını içerir. Bununla birlikte, hücre oluşumunun geleneksel yöntemlere kıyasla bazı dezavantajları da mevcuttur. Bunlar, hücrenin tasarım karakteristikleri ve hücrelerin değerlendirilmesi için tekniklerin sınırlı olmasıdır (İrani, 1999).

Parçaların makinelerdeki işlem gereksinimleri rota kartları aracılığı ile belirlenir. Bu bilgi 0-1 parça makine matrisi olarak ifade edilen matriste gösterilir. Örnek bir parça makine matrisi Şekil 2.1 (a)'da verilmiştir. Satır ( $p$  tane) ve sütunlardan ( $m$  tane) oluşan yapı,  $p$  parçasının  $m$  makinesinde işlem gereksinimi olup olmadığını ifade etmektedir. Bu gösterimde, işlem sırası göz ardı edilmiştir. Ayrıca, makine kapasitelerin olası atanabilecek parçalar için yeterli olduğu varsayılmıştır (Singh ve Rajamani, 1996).

Şekil 2.1 (b)'de iki parça ailesi ve gruba karşı gelen bir hücre yapısı görülmektedir. Birinci ve ikinci parçalar ile birinci ve ikinci makineler birinci hücreye, üçüncü dördüncü ve

beşinci parçalar ile üçüncü ve dördüncü makineler ikinci hücreye atanmıştır. Atamaya göre, birinci üçüncü ve beşinci parçalar her iki hücreyi de ziyaret etmek durumundadır. Bu durum diyagonal bloklar dışında kalan “1”ler ile anlaşılmakta ve hücre dışı eleman (HDE-exceptional element) olarak adlandırılmaktadır. Diğer taraftan, ikinci parçanın aynı hücrede yer alan birinci makinede işlem görmeyeceği söylenebilir. Bu durum, diyagonal blok içerisinde yer alan “0”lardan anlaşılmakta olup, hücre içi boşluk (HİB-void) olarak adlandırılır.

|                   |   |               |   |   |   |   |   |  |               |   |   |   |   |   |   |
|-------------------|---|---------------|---|---|---|---|---|--|---------------|---|---|---|---|---|---|
|                   |   | Parça ( $p$ ) |   |   |   |   |   |  | Parça ( $p$ ) |   |   |   |   |   |   |
|                   |   |               | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |  |               |   | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Makine<br>( $m$ ) | 1 | 1             | 0 | 1 | 0 | 0 |   |  | Makine        | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
|                   | 2 | 0             | 1 | 1 | 0 | 1 |   |  | ( $m$ )       | 2 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
|                   | 3 | 1             | 0 | 0 | 1 | 0 |   |  | 3             | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
|                   | 4 | 0             | 0 | 1 | 0 | 1 |   |  | 4             | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
|                   |   | (a)           |   |   |   |   |   |  | (b)           |   |   |   |   |   |   |
|                   |   | Parça ( $p$ ) |   |   |   |   |   |  | Parça ( $p$ ) |   |   |   |   |   |   |
|                   |   |               | 1 | 4 | 3 | 5 | 2 |  |               |   | 1 | 4 | 3 | 5 | 2 |
| Makine<br>( $m$ ) | 1 | 1             | 0 | 0 | 0 | 0 |   |  | Makine        | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
|                   | 3 | 1             | 1 | 0 | 0 | 0 |   |  | ( $m$ )       | 3 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
|                   | 2 | 0             | 0 | 1 | 1 | 1 |   |  | 2             | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
|                   | 4 | 0             | 0 | 1 | 1 | 1 |   |  | 4             | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
|                   |   | (c)           |   |   |   |   |   |  | (c)           |   |   |   |   |   |   |

Şekil 2.1. (a) Parça makine matrisi, (b) Parça makine blok diyagonal matrisi  
(c) İyileştirilmiş parça makine matrisi (Singh ve Rajamani, 1996)

En uygun tasarım matrisi, hücre dışı eleman ve hücre içi boşlukların en küçüklenmesi yoluyla sağlanabilir (Miltenburg ve Zhang, 1991). İyileştirilmiş bir tasarım matrisine Şekil 2.1 (c)'de yer verilmiştir.

Literatürde hücre oluşumuna ilişkin pek çok derleme çalışması mevcuttur (Nourie vd., 2013; Reisman vd., 1997; Selim vd.,1998; Singh, 1993). Offadille vd. (1994) ve Singh (1993) de bu konudaki tekniklerin bir derlemesini sunmuşlar, hücre üretilen hücre oluşturma konusuna ilişkin var olan tekniklerin yararları ve kısıtlılıklarını tartışmışlardır. Ek olarak, Ghosh vd. (2010) hücre üretilen hücre oluşturma çalışmalarına ilişkin bir derleme yayınlamışlardır. Joines vd. (1996) hücre oluşturma probleminin çözümünde kullanılan teknikleri sınıflandırmıştır.

Pek çok imalat verisini içeren durum için birçok matematiksel programlama yaklaşımı geliştirilmiştir (Kusiak, 1987; Shtub, 1989; Choobineh, 1988; Wei and Gaither, 1990; Boctor, 1991; Zhu vd., 1995). Son yıllarda da pek çok araştırmacı, hücre oluşturma problemini optimal çözmeye çalışmışlardır (Defersha ve Chen, 2006; Niakan vd., 2016; Shiyas ve Pillai, 2014). Won ve Lee (2004), aynı hücredeki makine benzerliklerinin toplamını en büyüklemek amacıyla, p-medyan yaklaşımını önermiştir. Foulds vd. (2006), makine tadilatlarına dayalı bir karma tamsayı matematiksel model geliştirmişlerdir. Diaby ve Nsakanda (2006), hücreli imalat sisteminde parça rotalarını da dikkate alan bir kapsamlı tamsayı programlama modeli önermiştir. Parçalar için birçok alternatif süreç planı mevcuttur ve alternatif makinelerde işlem maliyetleri farklıdır. Amaçlar, toplam malzeme taşıma, üretim, dış yaptırım ve hazırlık maliyetlerinin, makine kapasitelerini aşmadan, tüm parça taleplerini karşılayacak şekilde en küçüklenmesidir.

Parça makine matrisi göz önünde bulundurulduğunda, iki temel amaç söz konusu olmaktadır. Bunlar, hücreler arası taşımaları en küçüklemeyi hedefleyen hücre dışı eleman kavramı ve makine kullanımlarının bir ölçütü olan hücre içi boşluk kavramıdır. Hücre oluşturma problemine ilişkin, hücre dışı eleman ve hücre içi boşluk amaçlarının en küçüklenmesini dikkate alan örnek bir model izleyen şekildedir (Arkat vd., 2011):

#### İndisler

|     |               |                   |
|-----|---------------|-------------------|
| $i$ | iş indisi     | $1 \leq i \leq n$ |
| $j$ | makine indisi | $1 \leq j \leq m$ |
| $k$ | hücre indisi  | $1 \leq k \leq c$ |

#### Parametreler

|          |   |
|----------|---|
| $m$      | makine sayısı   |
| $n$      | parça sayısı  |
| $c$      | hücre sayısı  |
| $U_k$    | $k$ . hücredeki en büyük makine sayısı  |
| $L_k$    | $k$ . hücredeki en küçük makine sayısı  |
| $a_{ij}$ | $\begin{cases} 1, i. \text{ parçanın } j. \text{ makinede işlenmesi gerekliyse} \\ 0, \text{ dd} \end{cases}$ |

### Karar Değişkenleri

$$X_{i,k} = \begin{cases} 1, i. \text{ parça } k. \text{ hücreye atanırsa} \\ 0, \text{ dd} \end{cases}$$

$$Y_{j,k} = \begin{cases} 1, j. \text{ makine } k. \text{ hücreye atanırsa} \\ 0, \text{ dd} \end{cases}$$

### Amaç Fonksiyonu ve Kısıtlar

$$Enk EE = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^m a_{ij} - \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^c X_{ik} Y_{jk} a_{ij} \right) \quad (2.1)$$

$$Enk HİB = \sum_{k=1}^c \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_{ik} Y_{jk} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_{ik} Y_{jk} a_{ij} \right) \quad (2.2)$$

$$\sum_{j=1}^m Y_{jk} \geq L_k \quad \forall k \quad (2.3)$$

$$\sum_{j=1}^m Y_{jk} \leq U_k \quad \forall k \quad (2.4)$$

$$\sum_{k=1}^c Y_{jk} = 1 \quad \forall j \quad (2.5)$$

$$\sum_{k=1}^c X_{ik} = 1 \quad \forall i \quad (2.6)$$

$$Y_{jk}, X_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k \quad (2.7)$$

(2.1) no'lu amaç fonksiyonu hücre dışı elemanlarını (2.2) no'lu amaç fonksiyonu hücre içi boşlukların en küçüklenmesini amaçlar.

(2.3) ve (2.4) no'lu kısıtlar hücre boyutları için önceden belirlenmiş atanabilir en küçük ve en büyük makine sayısını belirler.

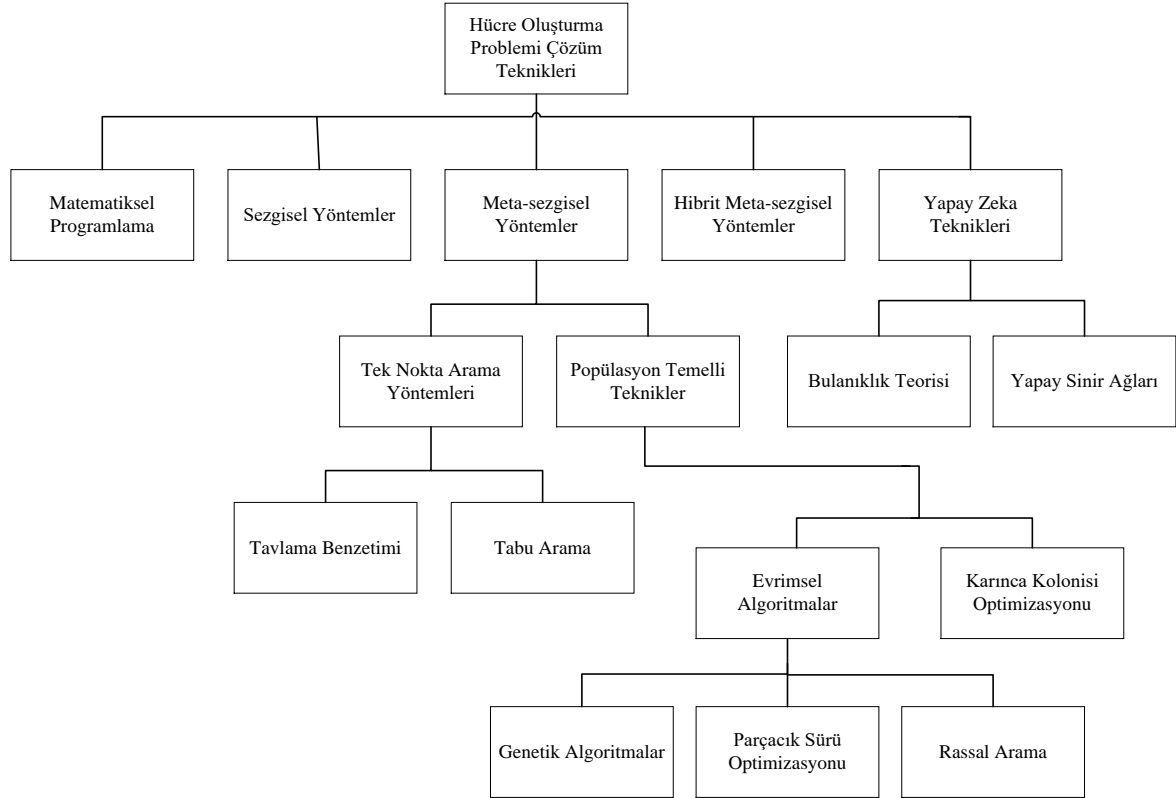
(2.5) no'lu kısıt, her bir makinenin bir hücreye atanmasını garanti eder.

(2.6) no'lu kısıt, her bir parçanın bir parça ailesine atanması gerekliliğini gösterir.

(2.7) no'lu kısıt modelin karar değişkenlerinin 0-1 tamsayı değer alması gerektiğini gösterir.



Şekil 2.2’de Papaioannou ve Wilson (2010) tarafından hücre oluşturma problemi çözüm teknikleri sınıflandırılmıştır. Problemi en iyi çözmeye yönelik tekniklerin yanı sıra, hücre oluşturma probleminin karmaşıklığı sebebiyle, büyük boyutlu gerçek hayat problemlerinin çözümü için çok sayıda sezgisel ve meta-sezgisel yaklaşım denenmiştir.



Şekil 2.2. Hücre oluşturma problemi çözüm tekniklerinin sınıflandırılması (Papaioannou ve Wilson, 2010)

Önde gelen yaklaşımlar, genetik algoritma (Defersha ve Chen, 2008; Deljoo, vd., 2010, Kesen vd., 2010; Zolfaghari ve Liang, 2004), tavlama benzetimi (Safaei vd., 2008; Wu vd., 2008), parçacık sürü eniyilemesi (Andres ve Lozano, 2006; Anvari vd., 2010), karınca kolonisi eniyilemesi (Liv vd., 2010; Prabhakaran vd., 2005), tabu arama (Chung vd., 2011; Foulds vd., 2006; Hamedı vd., 2012) ve bakteriyel besin arama algoritmasıdır (Liu vd. 2016a; Liu vd., 2016b; Nouri ve Hong, 2013).

### 2.1.2 Hücree yerleşimi problemi

Hücrelerin oluşturulması, doğrudan makine ve hücre yerleşimine dayanan parça taşıma maliyetlerinin dikkate alınmasına bağlıdır. Hücresel yerleşimde, hücre dışı eleman kavramı ve darboğaz makinalar önem taşır. Hücre büyüklüğü azaldıkça hücre sayısı ve hücreler arası taşımalar artar, öte yandan hücre büyüklüğü arttıkça hücrelerin yönetimi ve iş çizelgelemesi karmaşıklaşır ve zorlaşır. Taşıma süreleri, hücrelerin atölye içindeki yerleşimine ve makinelerin hücreler içindeki konumlarına bağlı olarak değişir (Arvindh ve Irani, 1994).

Hücre içi ve hücreler arası makine yerleşimi özellikle üretim hacimlerinin yüksek olduğu ortamlarda daha kritiktir. Hücresel imalatta yerleşimi dikkate alan pek çok çalışma mevcuttur (Chiang ve Lee, 2004; Chan vd., 2006; Akturk ve Turkcan, 2000; Wu vd., 2007a).

### 2.1.3 Kaynak atama problemi

Hücresel üretimde dikkate alınması gereken iki temel kaynak kısıtı mevcuttur. Bunlar işçi ve makine kısıtlarıdır. Birden fazla faaliyeti yerine getirebilecek çok yetenekli makine ve işçilere ihtiyaç duyulmaktadır. Makine ve işçi esnekliği yönüyle bakıldığında, makine ve işçiler kapasite ve yetenekleri açısından farklıdır. İstenen durum, her bir işçinin her bir makinede her bir işlemi gerçekleştirebilme ve her makinenin her bir parçayı işleyebilme durumları olsa da, bu gerçek hayatta ulaşılabilir değildir. Gerçek hayattaki durum, farklı makinelerin ve benzer şekilde işçilerin, kabiliyetleri çerçevesinde farklı uzmanlık düzeyinde parça işleyebilmesi, sonuç olarak işlenen parçada süre, kalite, maliyet yönlü farklılıklar ortaya çıkmasıdır.

Literatürde pek çok problem makine ve parçaların hücrelere atanması konusunu ele almıştır (Hosseinabadi Farahani ve Hosseini, 2011; Peker ve Kara, 2004; Yang ve Yang, 2008). Pek çok klasik hücresel üretim çalışması, benzer parça ailelerini üretebilecek makine parça kümelerini oluştururken, insan kaynağını çoğunlukla göz ardı etmiştir. Sonuç olarak, daha iyi bir hücresel üretim sistemi tasarımı için insan faktörünün ve makine kabiliyetlerinin dikkate alınması kaçınılmaz olacaktır (Liu vd., 2016b).

İnsan kaynağının kullanımı konusunda üretim hücreleri, makine yoğun ve işçi yoğun hücreler olmak üzere temelde iki gruba ayrılmıştır. Makine yoğun hücrelerde, işçi çalışması kısıtlıdır. Yanı sıra işlem süreleri makine performansından oldukça etkilenmektedir. İşçi, ham malzeme ve yarı mamulün yüklenmesini, boşaltılmasını yapar ve kalite kontrol faaliyetini gerçekleştirir. Bu ortamda, işlem süreleri çok değişkenlik göstermez. Diğer taraftan, işçi yoğun üretim hücrelerinde, işlemler temel olarak işçi tarafından gerçekleştirilir ve bu sebeple süreler oldukça değişkendir. İmalat sektörüne göre, üretim hücreleri bu iki sınıftan birine girebilmektedir. Örneğin, kutu içecek endüstrisinde makine yoğun bir ortam varken, mücevher üretimi işçi yoğun bir sektördür.

Min ve Shin (1993), bir işletmede hücreli üretim sisteminin tam anlamıyla uygulanabilmesinin insan faktörünün de göz önünde bulundurulmasıyla sağlanabileceğini vurgulamaktadır. Hücreli imalatın, insan ve makine hücrelerinin birlikte şekillenmemesi durumunda tam anlamıyla başarılı olamayacağını belirtmişlerdir. Bidanda vd. (2005), hücreli üretim sistemlerinde yapılan çalışmalarda insan faktörünün etkililiği konusunda yapılan çalışmaların yetersiz olduğunu açıkça vurgulamış, bunun pek çok sebebinden en önemlisinin, çalışmalarda insan faktörünün dikkate alınmasının güçlüğü olarak yorumlamıştır.

Bu sebeplerle, hücreli üretim sistemlerinin tasarımında insan faktörünün etkisine de yer verilmiştir (Min ve Shin, 1993; Süer ve Bera, 1998; Li, 2003; Ertay ve Ruan, 2005; Süer vd. 2009; Aryanezhad, vd. 2009; Mahdavi vd. 2010; Saxena ve Jain, 2011; Tavakkoli Moghaddam vd., 2012; Mahdavi vd., 2012; Nikoofarid ve Aalaei, 2012; Rafiei ve Ghodsi, 2013; Egilmez vd., 2014; Saeidi vd., 2014; Bootaki vd., 2014; Sahin ve Alpay, 2016; Niakan vd., 2016; Liu vd., 2016a). Ayrıca, Buruk Sahin ve Alpay (2016)'da hücreli üretim sistemlerinde işçi atama problemi üzerine son yıllardaki çalışmalardan oluşan bir derleme yayınlamışlardır.

#### **2.1.4 Parça çizelgeleme problemi**

Hücreli üretim sisteminde işlerin çizelgelenmesinde, hücreler arasında gerçekleştirilebilecek parça hareketleri işlem süresini ve işlerin tamamlanma zamanını kısaltabilmektedir. Böylece, makine maliyetleri ve işçilerin sabit ve değişken maliyetleri

yönlü bir kazanç mümkün olabilmektedir. Diğer taraftan, parçaların bu hareketleri hücreler arası malzeme taşıma maliyetlerini de yükseltebilmektedir. Yanı sıra, pek çok gerçek hayat probleminde de parçaların işlemleri arasında öncelik kısıtları mevcuttur. Sonuç olarak, yöneticiler hangi parçanın mevcut hücrede kalarak işlenebileceğine ya da diğer bir hücreye taşınacağına karar vermek durumundadır.

Parçaların sadece atandığı hücrede tüm işlemlerini tamamlaması çoğu zaman mümkün olmayabilir. Hücredeki makine sayısını arttırmak da çoğu zaman ekonomik olmadığından, hücreler arası taşıma oluşmaktadır. Böyle bir durum, esasında bağımsız hücre oluşumunu bozduğundan hücresel imalatın felsefesine aykırıdır. Ancak, işletmelerin düşük maliyetlerde üretim yapma amacı bunu zorunlu kılmıştır (Tian vd., 2016). Hücresel imalatta çizelgeleme problemi dikkate alınırken, pratikte parçaların esnek rotalarda işlem görebilirliği önemli bir konu olarak dikkate alınmıştır. Hücresel imalat sisteminin tasarımında, işlerin toplam akış süresini de en küçükleyecek bir sıralama ve çizelgelemeyi de dikkate almak önemlidir. Hücre oluşturma, parça ailelerinin ve hücreleri oluşturacak makine gruplarının tanımlanmasını içerir. Hücre oluşturma probleminde, parça-makine-hücre birlikte düşünülmüştür. Ancak, gerçek hayatta, hücre oluşturma problemi zaman ve sıra boyutu ile birlikte dikkate alındığında, eşzamanlı olarak parça makine çizelgesinin de oluşturulması daha gerçekçi ve uygulanabilir sonuçlar üretmektedir. Parçaların ilgili makinelerde hangi sıra ve zamanda çizelgeleneceği, hücresel üretimin başarısını etkileyecek önemli unsurlardandır.

Çizelgeleme boyutunda, çizelgenin başarısını değerlendirmek üzere literatürde mevcut pek çok performans ölçütü söz konusudur. En yaygın ölçütler, akış süresinin en küçüklenmesi, en büyük tamamlanma zamanının en küçüklenmesi, en büyük gecikmenin ve geciken toplam iş sayısının en küçüklenmesi şeklindedir (Sipper ve Bulfin, 1997).

Çizelgeleme problemi tek başına ele alındığında bile, Hall vd. (1991) farklı atölye ortamlarında (tek makine, paralel makine vs.) çizelgeleme problemlerinin karmaşıklıkları konusunda kapsamlı bir araştırma yayınlamışlardır. Atölye tipi ortamda çizelgelemenin NP-zor olduğu da bilinmektedir (Garey vd., 1976), öyle ki en basit seneryoda bile kesin çözüm yöntemleri ile sonuca ulaşmak zordur. Üstelik, en iyi çözüme ulaşmada hesaplama süre ve

maliyetleri çoğu zaman kabul edilebilir düzeydeyken, iyi bir alt çözümün kabul edilebilir olduğu ifade edilir.

Bu çalışmada esnek atölye tipi çizelgeleme ortamı dikkate alınmıştır. Bu konuya ilişkin literatürde pek çok çalışma mevcuttur. Problemin en iyi çözümünün araştırıldığı matematiksel modelleme çalışmalarında çizelgelemede koruyucu bakım, süreç içi stok kısıtları, sıra bağımlı hazırlık süreleri ile sıra bağımsız hazırlık süreleri gibi konular dikkate alınmıştır (Gao et al., 2007; Imanipour, 2006; Lin ve Jia-zhen, 2009). Yanı sıra, problemin büyük boyutlarını çözmek üzere GA (Pezzalla vd., 2007; Ho vd., 2007, Zhang vd., 2011), tabu arama algoritması (Brandimarte, 1993; Mastrolilli ve Gambardella, 2002; Mehrabad ve Fattahi, 2007), karınca kolonisi algoritması (Rossi ve Dini, 2007; Xing vd., 2010) ve tavlama benzetimi (Loukil vd., 2007) gibi teknikler kullanılmıştır.

Çalışmada ele alınan EATÇP'ne ilişkin önde gelen modelleme teknikleri olan ve Fattahi vd. (2007) tarafından önerilen pozisyon tabanlı model ile Özgüven vd. (2010) tarafından önerilen sıra tabanlı modeller aşağıda sunulmuş olup, amaç fonksiyonları en büyük tamamlanma zamanının en küçüklenmesidir.

### İndisler

|        |                                    |                        |
|--------|------------------------------------|------------------------|
| $i, h$ | iş indisi                          | $1 \leq i, h \leq n$   |
| $j, g$ | işlem indisi                       | $1 \leq j, g \leq J_i$ |
| $k$    | makine indisi                      | $1 \leq k \leq m$      |
| $l$    | işlemlerin $k$ . makinedeki sırası | $1 \leq l \leq d_k$    |
| $u$    | zaman periyodu indisi              |                        |

### Parametreler

|             |  |
|-------------|--|
| $n$         | toplam iş sayısı   |
| $m$         | toplam makine sayısı   |
| $J_i$       | $i$ . işe ait işlemlerin toplam sayısı   |
| $a_{kij}$   | $O_{ij}$ işleminin gerçekleştirilebileceği yetenekli makine kümesi $M_{ij}$                        |
| $a_{kij} =$ | $\begin{cases} 1, O_{ij} \text{ i. makinede gerçekleştirilebiliyorsa} \\ 0, \text{dd} \end{cases}$ |
| $p_{kij}$   | $O_{ij}$ 'nin $k$ . makinede işlem süresi  |

$M$  büyük bir sayı  
 $E_k$   $k$ . makinede gerçekleştirilebilir işlemler kümesi

### Karar Değişkenleri

$C_{enb}$  enbüyük tamamlanma zamanı  
 $s_{ijk}$   $O_{ij}$ 'nin  $k$ . makinede başlama zamanı  
 $c_{ijk}$   $O_{ij}$ 'nin  $k$ . makinede tamamlanma zamanı  
 $c_i$   $i$ . işin tamamlanma zamanı  
 $x_{ijkl} = \begin{cases} 1, & O_{ij} \text{ k. makinede l. öncelikte işlenirse} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$   
 $v_{ijk} = \begin{cases} 1, & O_{ij} \text{ k. makinede gerçekleştirilirse} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$   
 $z_{ijhghk} = \begin{cases} 1, & k. \text{ makinede } O_{ij}, O_{hg} \text{'yi izliyorsa} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$   
 $w_{ijkku} = \begin{cases} 1, & O_{ij} \text{ u. periyot boyunca makine tarafından işleniyorsa} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$   
 $t_{ij}$   $O_{ij}$ 'nin başlama zamanı  
 $Tm_{kl}$   $k$ . makinenin  $l$ . öncelikte işleme başlama zamanı  
 $d_k$   $k$ . makineye atanan işlemler sayısı  
 $ps_{ij}$   $O_{ij}$  işleminin makine seçiminden sonra işlem süresi

### Model 1 (Pozisyon Tabanlı Yaklaşım)

$$C_{enb} \geq t_{ij} + ps_{ij} \quad \forall i, j = J_i \quad (2.8)$$

$$\sum_k p_{kij} v_{ijk} = ps_{ij} \quad \forall i, j \quad (2.9)$$

$$t_{ij} + ps_{ij} \leq t_{ij+1} \quad \forall i, \forall j = 1, \dots, J_i - 1 \quad (2.10)$$

$$Tm_{kl} + ps_{ij} x_{ijkl} \leq Tm_{kl+1} \quad \forall i, j, k \quad \forall l = 1, \dots, d_k - 1 \quad (2.11)$$

$$Tm_{kl} \leq t_{ij} + M(1 - x_{ijkl}) \quad \forall i, j, k, l \quad (2.12)$$

$$Tm_{kl} + M(1 - x_{ijkl}) \geq t_{ij} \quad \forall i, j, k, l \quad (2.13)$$

$$v_{ijk} \leq a_{kij} \quad \forall i, j, k \quad (2.14)$$

$$\sum_i \sum_j x_{ijkl} = 1 \quad \forall k, l \quad (2.15)$$

$$\sum_k v_{ijk} = 1 \quad \forall i, j \quad (2.16)$$

$$\sum_l x_{ijkl} = v_{ijk} \quad \forall i, j, k \quad (2.17)$$

$$t_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \quad (2.18)$$

$$ps_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \quad (2.19)$$

$$Tm_{kl} \geq 0 \quad \forall k, l \quad (2.20)$$

$$x_{ijkl} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k, l \quad (2.21)$$

$$v_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k \quad (2.22)$$

(2.8) no'lu kısıt ile en büyük tamamlanma zamanı hesaplanır.

(2.9) no'lu kısıt seçilen makinedeki işlem süresini tanımlar.

(2.10) no'lu kısıt işlem sırasının korunmasını sağlar.

(2.11) no'lu kısıt, her bir makinenin aynı anda yalnız bir işlemi gerçekleştirmesini sağlar.

(2.12) ve (2.13) no'lu kısıtlar  $O_{ij}$  işleminin ancak atandığı makine işleme müsaitse ve bir önceki işlemi tamamlanmış ise başlayabilmesini garanti eder.

(2.14) no'lu kısıt, her bir işlemi gerçekleştirebilir yetenekte makineleri tanımlar.

(2.15) no'lu kısıt, işlemleri makinelere atar ve atanmış işlemleri ilgili makinelerde sıralar.

(2.16) ve (2.17) no'lu kısıtlar her bir işlemin yalnız bir makinede ve bir öncelikte gerçekleştirilmesini sağlar.

(2.18) ve (2.22) no'lu kısıtlar ile arasındakiler karar değişkenlerinin yapısını tanımlar.

Model 2 (Sıra Tabanlı Yaklaşım)

$$C_{enb} \geq c_i \quad \forall i \quad (2.23)$$

$$c_i \geq \sum_{k \in M_{ij}} c_{ijk} \quad \forall i, j = J_i \quad (2.24)$$

$$s_{ijk} + c_{ijk} \leq M v_{ijk} \quad \forall i, j, \forall k \in M_{ij} \quad (2.25)$$

$$c_{ijk} \geq s_{ijk} + p_{kij} - M(1 - v_{ijk}) \quad \forall i, j, \forall k \in M_{ij} \quad (2.26)$$

$$s_{ijk} \geq c_{hjk} - M(z_{ijhjk}) \quad \forall i \leq h, \forall j, g, \forall k \in M_{ij} \cap M_{hg} \quad (2.27)$$

$$s_{hjk} \geq c_{ijk} - M(1 - z_{ijhjk}) \quad \forall i \leq h, \forall j, g, \forall k \in M_{ij} \cap M_{hg} \quad (2.28)$$

$$\sum_{k \in M_{ij}} s_{ijk} \geq \sum_{k \in M_{ij}} c_{ij-1k} \quad \forall i, \forall j = 2, \dots, J_i \quad (2.29)$$

$$\sum_{k \in M_{ij}} v_{ijk} = 1 \quad \forall i, j \quad (2.30)$$

$$s_{ijk} \geq 0, c_{ijk} \geq 0 \quad \forall i, j, k \quad (2.31)$$

$$c_i \geq 0 \quad \forall i \quad (2.32)$$

$$v_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k \quad (2.33)$$



$$z_{ijhgk} \in \{0,1\} \quad \forall i \leq h, \forall j, g, \forall k \quad (2.34)$$

$$\in M_{ij} \cap M_{hg}$$

(2.23) no'lu kısıt ile en büyük tamamlanma zamanı hesaplanır.

(2.24) no'lu kısıt tüm işlerin son işlemlerinin tamamlanma zamanlarını hesaplamayı sağlar.

(2.25) no'lu kısıt  $O_{ij}$  işlemi  $k$ . makineye atanmadıysa, ilgili işlemin ilgili makinede başlangıç ve bitiş zamanlarını sıfıra eşitler.

(2.26) no'lu kısıt, başlangıç ve bitiş zamanları arasındaki sürenin en azından  $k$ . makinedeki işlem süresi kadar olmasını sağlar.

(2.27) ve (2.28) no'lu kısıtlar  $O_{ij}$  ve  $O_{hg}$  işlemlerinin aynı makinede aynı anda yapılamamasını garanti eder.

(2.29) no'lu kısıt, işin işlemleri arasındaki öncelik ilişkisini garanti eder.

(2.30) no'lu kısıt, bir işlemin yalnızca bir makinede gerçekleşebileceğini ifade eder.

(2.31) ve (2.34) no'lu kısıtlar ile arasındakiler karar değişkenlerinin yapısını ifade eder.

## 2.2 Bütünleşik Hücre Oluşturma ve Parça Çizelgeleme Problemi

Çizelgeleme, birçok imalat ve hizmet sektöründe karşılaşılan bir karar verme sürecidir. Bu süreçte, kaynakların işlere atanması ve zaman aralığında sıralanması hedeflenir. Çizelgeleme probleminin amacı bir ya da daha çok amacı en iyilemektir (Pinedo, 2002). Yaygın olarak kullanılan amaçlar, işlerin tamamlanma zamanının en küçüklenmesi, akış/ortalama akış süresinin en küçüklenmesi, en büyük/toplam/toplam ağırlıklı gecikmenin en küçüklenmesi, geciken iş sayısının en küçüklenmesi ve ağırlıklı geciken işlerin sayısının en küçüklenmesi şeklindedir.

İmalat sistemlerinde, genelde işler daha önce belirlenmiş makinelerde bilinen işlenme sürelerinde işlem görürler. Atölye yerleşiminin düzenlenmesi, makine çeşitlerine ve özelliklerine, üretim akışlarına ve kaynaklarına sayısına bağlı olarak değişkenlik gösterir. En çok bilinen atölye ortamları Pinedo (2002)'de tanıtılmıştır.

Tek Makine Çizelgeleme Ortamı:

Atölyedeki tüm işleri gerçekleştirecek sadece bir makine mevcuttur. Tek makine ortamı, olası makine ortamlarının en basit halidir ve diğer karmaşık atölye ortamlarının özel bir şeklidir.

Paralel Makineli Çizelgeleme Ortamı:

Tek makineli ortam modelinin genelleştirilmiş halidir. İşler, herhangi bir paralel makinede işlem görebilir. Paralel biçiminde kaynaklar uygulamada sıklıkla görüldüğünden, gerçek dünyada oldukça yaygındır.

Akış Tipi Çizelgeleme Ortamı:

Seri durumunda  $n$  tane makine mevcuttur. Her bir iş  $m$  makinenin tamamında, aynı sırada işlenir. Ayrıca bir makinede işlemini tamamlayan iş diğer makinede kuyruğa girer ve kuyruklar ilk giren ilk çıkar disiplinine göre çalışır. Bütün işler her makinesinden geçer ve her işin aynı rotası vardır. Eğer bir kademede birden fazla paralel makine mevcut ise, akış atölyesi esnek akış atölyesi olarak isimlendirilir. Bu durumda, iş bu paralel makinelerden birinde işlem görür.

Esnek Akış Tipi Çizelgeleme Ortamı:

İşlerin aynı rotayı kullanmak durumunda olduğu, ancak rota üzerindeki aşamalar için aynı işi yapabilen paralel makineler mevcuttur. Her bir iş, her bir aşamada sadece bir makinede işlem görmek durumundadır.

Atölye Tipi Çizelgeleme Ortamı:

Toplamda  $m$  tane makine mevcuttur, her bir iş  $m$  makinede işlem görür. Atölye tipi üretim ortamında, işler makineleri farklı sıralarda ziyaret edebilir. Bu açıdan, akış tipi ve atölye tipi ortam birbirinden ayrılır. Akış tipi, atölye tipinin özel bir halidir ve her işin kendine ait rotası vardır. Bütün işler bütün makinelere aynı sırada uğramak zorunda değildir.

Atölye tipi ortamda çizelgeleme problemi literatürde sıklıkla karşılaşılan problemlerdendir. Genel olarak,  $n \times m$  ile gösterilir ve burada,  $n$  iş sayısını,  $m$  makine sayısını ifade eder. Her bir  $j$  işi  $i$ . makede daha önceden belirlenmiş rotasında işlem görür. Her bir  $j$ . işin  $i$ . makede işlenmesi  $(i,j)$  işlemi olarak adlandırılır ve işlem süresi  $p_{ij}$  ile gösterilir.

Genel varsayımlar izleyen şekildedir:

- Toplamda  $n$  tane iş vardır ve  $J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$  ile gösterilir.
- Toplamda  $m$  tane makine vardır ve  $M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$  ile gösterilir.
- İşlemler  $(i,j)$ ,  $\{O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{in}\}$  birden fazla makede işlenebilir.
- Her bir iş, her bir makede önceden belirlenmiş bir rotada işlenir.
- Bir makine bir anda birden fazla işlemi gerçekleştiremez.
- İşlerin bölünmesine izin verilmez.
- Tüm işler  $t$  anında sistemde hazır (  $t = 0$  ).
- Tüm makineler  $t$  anında boş durumdadır (  $t = 0$  ).
- Parçanın ardışık işlemleri aynı makede gerçekleştirilebilir.
- Makinelerin hazırlık süreleri işlem sürelerine dahil edilmiştir ve makineler arası taşıma süreleri ihmal edilmiştir.

Çizelge 2.2’de, örnek bir atölye tipi üretim problemine ilişkin işlemler, atandığı makineler ve işlem süreleri gösterilmiştir. Örneğin, ilk parça sırasıyla birinci, dördüncü ve ikinci makinelerde işlem görecektir. İşlem süreleri sırasıyla, 4, 2 ve 3’tür.

Çizelge 2.2. İş atölyesi problemine bir örnek

| İşler | İşlemler | Makineler | İşlem Süreleri |
|-------|----------|-----------|----------------|
| 1     | 1        | 1         | 4              |
|       | 2        | 4         | 2              |
|       | 3        | 2         | 3              |
| 2     | 1        | 3         | 5              |
|       | 2        | 1         | 6              |
|       | 3        | 2         | 2              |

*Esnek Atölye Tipi Çizelgeleme Ortamı:*

Operasyonların bir makine seti içinden herhangi bir makinede yapılmasına izin verildiği atölye tipi çizelgeleme probleminin genişletilmiş halidir. Esnek atölye tipi çizelgelemede, her makine birden fazla operasyonu gerçekleştirebilir. Böylece, her bir iş alternatif makinelerden birinde işlenebilir.

EATÇP, iş atölyesinde çizelgelemenin gerçek hayat imalat ortamına daha yakın olan genelleştirilmiş halidir. Esnek iş atölyesinde temel fark, işlerin karşı gelen her bir işlem için tanımlanmış seçimlik makine kümesinden herhangi makinede işlenebilmesidir. Diğer varsayımlar iş atölyesine benzerdir (Chen et al. 1999). Tam Esnek Atölye Tipi üretim sistemlerinde tüm operasyonlar sistemde bulunan bütün makineler tarafından işlenebilmektedir. Kısmi Esnek Atölye Tipi üretimde ise, her operasyonu işleyebilen tanımlı bir makine kümesi bulunmaktadır. Esnek atölye tipi ortamda çizelgeleme problemi, atölye tipi ortama göre daha zor bir problem olup, NP-zor problem kümesine girmektedir (Gao vd., 2007).

Sonuç olarak, çizelgelemede atama ve sıralama olmak üzere iki önemli karar söz konusudur. İlki, ilgili işlemi gerçekleştirebilecek seçimlik makine kümesi içinden her bir işlem için en uygun makinenin seçilmesi ve ikincisi ise seçilen bir ya da daha çok amaç fonksiyonunu eniyileyecek şekilde işlemlerin atandığı makinelerde uygun şekilde sıralanmasıdır.

Çizelge 2.3'te 3 iş, 4 makine içeren örnek bir çizelge gösterilmiştir. Her bir işlem için 4 adet makine arasından uygun alternatifler gösterilmiştir. Çizelge'de işlemin ilgili makinede işlenemiyor olması durumu "\*" ile gösterilmiştir. Diğer sayılar, işlemin makinede işlenmesi durumunda gerçekleşecek işlem sürelerini göstermektedir.

Çizelge 2.3. Esnek iş atölyesi problemine bir örnek

| İşler | İşlemler | M 1 | M 2 | M 3 | M 4 |
|-------|----------|-----|-----|-----|-----|
| 1     | 1        | 3   | 4   | *   | *   |
|       | 2        | *   | *   | 4   | 5   |
| 2     | 1        | 5   | *   | 2   | *   |
|       | 2        | *   | 10  | 7   | 8   |
|       | 3        | 1   | *   | *   | 6   |
| 3     | 1        | *   | *   | 7   | 6   |
|       | 2        | *   | 8   | *   | 4   |
|       | 3        | 2   | *   | 5   | 11  |

EATÇP'nin bu iki alt problemden oluşan yapısı iki ayrı çözüm yaklaşımı oluşmasına neden olmuştur. Hiyerarşik yaklaşım diye adlandırılan ilk yaklaşımda, işlerin makinelere atanmasını ve sıralanmasını iki ayrı problem olarak ele alınıp çözülmeye çalışılır. Bu şekilde parçalanmış problemin karmaşıklığı azaltılmaya çalışılır. Bütünleşik yaklaşım diye isimlendirilen yaklaşımla ise atama ve sıralama problemleri bir bütün olarak çözülmeye çalışılır (Fattahi vd., 2007).

#### Açık Atölye Tipi Çizelgeleme Ortamı:

Bütün işlerin her bir makineye uğramak zorunda olduğu  $m$  adet makine vardır. Fakat işlerin makinelere uğramaları konusunda herhangi bir rotalama kısıtı yoktur. Farklı işler farklı rotalara sahip olabilir.

### **2.3 Hücreyel İmalatta Çizelgeleme Yaklaşımını Dikkate Alan Çalışmalar**

Çizelgeleme ve hücre oluşumu konularını birlikte dikkate alan çalışmalar klasik hücre oluşturma problemleri konusunda yapılan çalışmalara göre oldukça sınırlıdır. Genel olarak, hücreyel çizelgeleme ortamları parçaların aynı sıradaki makinelerde işlendiği akış atölyesi ve parçaların farklı süreç rotalarını dikkate alarak işlendiği iş atölyesi olmak üzere iki gruba ayrılır. Esnek atölye tipi çizelgeleme ortamında hücre oluşumu konusu ile ilgili olarak yapılan çalışmalar, söz konusu literatürde oldukça azdır. Bu iki konuyu birlikte, eşzamanlı ya da ardışık olarak dikkate alan az sayıda çalışma mevcuttur. Söz konusu çalışmalar, ele aldıkları amaç fonksiyonu, çözüm tekniği ve gelişime açık yönleriyle ele alınmıştır.

Wu vd. (2007b), hücrenel üretim sisteminde hücre oluşturma, makine yerleşimi ve çizelgeleme kararlarını birlikte dikkate almışlardır. Parça işleme sıralarının belirli olduğu çizelgeleme problemi için en büyük tamamlanma zamanını en küçükmeye çalışmış ve bütünleşik hücre tasarımı problemini çözmek üzere bir hiyerarşik GA geliştirmişlerdir. Önerilen sezgisel operatörlerle algoritmanın daha iyi sonuç verdiği, yanı sıra eşzamanlı çözümün ardışık çözüme kıyasla daha başarılı olduğu görülmüştür.

Venkataramanaiah (2008), tavlama benzetimi yaklaşımı geliştirerek ağırlıklı toplam en büyük tamamlanma zamanı, akış süresi ve boş geçen süreleri en küçükmeye çalışmıştır. Algoritmanın başarısı, iki kıyaslama algoritmasıyla karşılaştırılmıştır. Bunlar, en büyük tamamlanma zamanının ve akış süresinin en küçüklenmesini ele alan sezgisellerdir. Önerilen algoritmanın kıyasla başarılı sonuçlar elde edebildiği gözlenmiştir.

Wang vd. (2010), hücre oluşturma ve parça çizelgeleme bütünleşik kararında, üretilecek partiler ve ilgili makine grupları hücrelere atanırken, toplam gecikme ceza maliyetini en küçükleme amacını dikkate almışlardır. Problemin küçük boyutları için, doğrusal olmayan karma tamsayılı matematiksel model ve büyük boyutlu gerçek hayat problemleri için de rassal arama algoritması önermişlerdir.

Tang vd. (2010) çalışmalarında, hücrenel üretim sistemlerinde parçaların çizelgelenmesi problemini ardışık olarak, farklı hücrelere atanmış parça işlemleri için ortaya çıkan malzeme taşımalarının en küçüklenmesi amacı ile birlikte dikkate almışlardır. Parçaların makinelerde işleme sırasını belirlerken, toplam ağırlıklı gecikmenin en küçüklenmesi hedeflenmiş ve doğrusal olmayan bir matematiksel programlama modeli geliştirilmiştir. Büyük boyutlu problemlerin çözümü için bir rassal arama algoritması önermişlerdir.

Kesen vd. (2010), sanal üretim hücrelerinde iş çizelgeleme problemi için GA'ya dayalı bir sezgisel yaklaşım geliştirmişlerdir. Çizelgeleme kararları, işlerin makinelere atanması ve işlerin her bir makinedeki başlama zamanlardır. Farklı işler için, işlem sırası ve rota seçenekleri yanı sıra her bir tipte birden fazla özdeş makine olabileceği varsayılmıştır. Amaç fonksiyonları; ağırlıklı tamamlanma zamanı ve toplam taşıma mesafesinin en küçüklenmesidir. Önerilen GA sezgiselinin etkinliği karma tamsayılı programlama modeli ile karşılaştırılmıştır.

Ghezavati ve Saidi-Mehrabad (2010), parçaların makinelerde işleme sürelerinin rassal olduğu bütünleşik hücre oluşturma ve çizelgeleme problemini ele almışlardır. Amaç fonksiyonları; en büyük gecikme maliyetini, hücre dışı elemanlar için dış yaptırım maliyetini ve kaynakların yetersiz kullanımını en küçükmektir. Problemden, parçaların yalnızca atandığı hücrelerde işlenebileceği varsayılmıştır ve hücreler arası taşımaya izin yoktur. Bu sebeple, hücre dışı elemanlar dış yaptırıma yönlendirilmişlerdir. Çözüm için GA ve tavlama benzetimine dayalı hibrit bir yaklaşım önerilmiştir.

Gholipour-Kanani vd. (2011), parçaların imalat hücresi içerisindeki sırasını dikkate alan hücre içi çizelgelemenin yanı sıra, hücrelerin sırasını dikkate alan hücreler arası çizelgeleme konularını dikkate alır. Tamamlanma zamanı, hücreler arası taşıma maliyetleri, gecikmeler ve sıra bağımlı hazırlık sürelerinin en küçükleme amaçları ve yeni bir çok kriterli matematiksel model önerirler. Modelin büyük boyutları için, rassal aramaya dayalı metasezgisel bir yaklaşım önerilmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Aryanezdah vd. (2011), montaj işlemleri ve ürün yapısını içeren, üretim hücreleri oluşturulması yanı sıra eşzamanlı olarak çizelgeleme problemini de dikkate alan yeni bir model önermişlerdir. Önerilen model doğrusallaştırılmış ve karma tamsayılı programlama tekniği ile çözülmüştür. Modelin büyük ölçekli problemlerde çözümünün elde edilebilmesi için yeni bir GA önerilmiştir.

Li vd. (2013), hücreli üretim probleminde parça çizelgeleme konusunu dikkate almışlardır. Karınca kolonisi eniyileme yaklaşımını dikkate alarak esnek rotalar ve hücreler arası taşımalar üzerinde çalışmışlardır. Başarı ölçütleri; ortalama akış süresi, en büyük tamamlanma zamanı, ortalama gecikme, geciken parçaların oranı ve hücreler arası taşımaların oranıdır.

Tang vd. (2014), hücre oluşturma ve parça çizelgeleme problemi için, hücreler arası taşımaları dikkate alan “Lagrange gevşetmesi” tekniğini kullanmışlardır. Karma tamsayılı doğrusal olmayan matematiksel model ile toplam gecikme ceza maliyetini en küçükmeyi amaçlamışlardır. Problemin çözümü için, hücre oluşturma ve parça çizelgeleme olmak üzere iki alt problem dikkate alınmış, matematiksel eniyileme ve rassal arama yaklaşımlarıyla alt problemler için çözüm araştırılmıştır.

Rafiei vd. (2016) tekli zaman periyodunda, karma tamsayılı doğrusal olmayan bir model geliştirerek, hücre oluşturma ve iş çizelgeleme probleminin çözümünde işlem ve taşıma maliyetlerini enazlamayı hedeflenmişlerdir. Hibrit tavlama benzetimi ve GA yaklaşımını kullanılarak problemin büyük boyutlarında çözüm araştırılmıştır.

Feng vd. (2016), bütünleşik hücre oluşturma ve çizelgeleme probleminin çözümü için doğrusal olmayan karma tamsayılı programlama modeli geliştirmişlerdir. Model çoklu makine, alternatif süreç rotaları, değişken hücre sayısı gibi tasarım seçeneklerini içermektedir. Amaç fonksiyonu akış süresinin en küçüklenmesidir. Büyük boyutlu problemlerin çözümü için iyileştirilmiş bir GA önerilmiştir.

Liu ve Wang (2016), hücre oluşturma ve iş çizelgelemesi probleminde çok yönlü makine ve işçilerin ele alındığı doğrusal olmayan bir tamsayılı bir matematiksel model önermişlerdir. Yanı sıra, her bir parça işleminin farklı makine ve işçiler tarafından farklı sürelerde yapılabileceği varsayılmıştır. Hibrit tavlama benzetimi ile işlerin tamamlanma zamanının en küçüklenmesi amaçlanmıştır.

Rafei vd. (2016), hücre oluşturma ve parça çizelgeleme problemini birlikte dikkate alan karma tamsayılı doğrusal olmayan bir model önermişlerdir. İşlem ve taşıma maliyetlerinin en küçüklenmesi hedeflenmiştir. Önerilen modelin büyük boyutlu versiyonlarının çözümü için hibrit bir tavlama benzetimi GA önerilmiştir. Çalışmada, atölye tipi üretim ortamında sıra bağımlı hazırlık süreleri, yanı sıra amaç fonksiyonu olarak işlem tamamlanma zamanı ile hücre içi ve hücreler arası taşıma maliyetleri dikkate alınmıştır.

Liu vd. (2016b), hücre oluşturma ve iş çizelgelemesi probleminin çözümünü çok işlevli işçi ve makine ortamında araştırmışlardır. Parçaların hücreler arası hareketleri ile işlem süreleri ve tamamlanma zamanı azaltılabilirken, hücreler arası taşıma maliyeti de artmaktadır. Amaç, malzeme taşıma maliyetlerini ve yanı sıra makine ve işçilerin sabit ve değişken maliyetlerini azaltmaktır. Kesikli bakteriyel besin arama algoritması (BBAA) kullanılarak problemin büyük boyutları için çözüm araştırılmış, sonuçlar klasik BBAA ve GA ile kıyaslanmıştır. Önerilen yöntemin diğer iki algoritmaya kıyasla daha başarılı sonuçlar ürettiği görülmüştür.



Yılmaz vd. (2016), çoklu hibrit hücresel imalat sistemlerinde işçi kaynağını da dikkate alan parti çizelgeleme problemi üzerinde çalışmışlardır. Problem, partilerin işlenme sırası, işlem başlangıç zamanları ile işçilerin partilere atanması kararlarını içerir. Problemin küçük boyutları için 0-1 tamsayılı bir doğrusal matematiksel model geliştirilmiş olup, büyük boyutların çözümü için hibrit hücrelerde parti çizelgeleme sezgiseli olarak adlandırılan sezgisel önerilmiştir.

Tian vd. (2016), müzakere yaklaşımını kullanarak hücresel imalatta koalisyon tabanlı çizelgeleme yaklaşımı önermişlerdir. Problemin amacı ortalama gecikmenin en küçüklenmesidir. Sonuçlar, en büyük tamamlanma zamanı, ortalama akış süresi, geciken parça oranı gibi bazı göstergelerde de iyileşme sağlandığını göstermiştir.

Esnek atölye tipi çizelgeleme ortamında hücre oluşumu konusu ile ilgili olarak yapılan çalışmalar, ele aldıkları amaç fonksiyonu, çözüm tekniği ve dikkat çeken önemli noktalarıyla Çizelge 2.4'te özetlenmiştir.

Çizelge 2.4. Hücre oluşturma ve çizelgeleme problemlerini birlikte dikkate alan çalışmalar

| <i>Referans</i>                           | <i>Amaçlar</i>   | <i>Tek/Çok amaçlı yaklaşım</i> | <i>Problem tipi</i>                 | <i>Çözüm yöntemi</i>                                     | <i>Probleme ilişkin önemli noktalar</i>  |
|---|--|--------------------------------|-------------------------------------|--|--|
| <b>Tang vd. (2010)</b>                    | Enk ağırlıklı toplam gecikme   | Tek Amaçlı                     | Doğrusal olmayan matematiksel model | Rassal Arama   | Farklı başlangıç çözümler oluşturma<br>HDE yoluyla malzeme taşımalarını enk                          |
| <b>Kesen vd. (2010)</b>                   | Enk ağırlıklı tamamlanma zamanı<br>Enk toplam katedilen mesafe                                       | Ağırlıklı Toplam               | Karma tamsayıli matematiksel model  | GA temelli sezgisel                                      | Sanal imalat hücreleri   |
| <b>Ghezavati ve Saidi-Mehrabad (2010)</b> | Enk enb gecikme maliyeti<br>Enk HDE için dış yaptırım maliyeti<br>Enk düşük kaynak kullanım maliyeti | Ağırlıklı Toplam               | Karma tamsayıli matematiksel model  | Hibrit GA/TB yaklaşımı                                   | Stokastik parça işlem süreleri   |
| <b>Aryanezdah vd. (2011)</b>              | Enk çevrim süresi  | Tek Amaçlı                     | Karma tamsayıli matematiksel model  | GA   | Montaj işlemleri ve ürün ağacı   |
| <b>Li vd. (2013)</b>                      | Enk toplam tamamlanma zamanı<br>Enk ortalama gecikme<br>Enk ortalama hücreler arası taşıma           | Çok Amaçlı                     | Matematiksel model gösterimi        | KKA, çoklu ajanları kullanan feromon temelli yaklaşım    | Makine kabiliyetleri<br>Salıverme zamanı<br>Makine kuyruk uzunluğu<br>Hücreler arası taşıma süreleri |
| <b>Tang vd. (2014)</b>                    | Enk toplam gecikme ceza maliyeti   | Tek Amaçlı                     | Karma tamsayıli matematiksel model  | Matematiksel model<br>Rassal arama<br>Lagranj gevşetmesi | Hücreler arası taşımalar   |

Çizelge 2.4. Hücre Oluşturma problemi ve çizelgeleme problemini birlikte dikkate alan çalışmalar (devam)

| <i>Referans</i>           | <i>Amaçlar</i>  | <i>Çok amaçlı yaklaşım</i> | <i>Problem tipi</i>                                 | <i>Çözüm yöntemi</i>                                     | <i>Probleme ilişkin önemli noktalar</i>  |
|---------------------------|---|----------------------------|---|--|--|
| <b>Rafiei vd. (2016)</b>  | Enk işlem maliyeti<br>Enk hücre içi ve hücreler arası taşıma maliyeti | Ağırlıklı toplam           | Karma tamsayılı doğrusal olmayan matematiksel model | Hibrit GA/TB   | Sıra bağımlı hazırlık süreleri   |
| <b>Feng vd. (2016)</b>    | Enk toplam tamamlanma zamanı  | Tek Amaçlı                 | Karma tamsayılı doğrusal olmayan matematiksel model | İyileştirilmiş GA  | Çoklu makine Alternatif süreç rotası Değişken hücre sayısı                       |
| <b>Liu ve Wang (2016)</b> | Enk tamamlanma zamanının  | Tek Amaçlı                 | Doğrusal olmayan 0-1 tamsayılı matematiksel model   | Öncelik kuralı ile desteklenmiş hibrit tavlama benzetimi | Çok fonksiyonlu makine Çok yetenekli işçi İşlem sırası Maksimum hücre kapasitesi |
| <b>Yılmaz vd. (2016)</b>  | Enk ortalama akış süresi<br>Enk toplam işçi sayısı                    | Hedef Programlama          | Doğrusal 0-1 tamsayılı matematiksel model           | Hibrit hücrelerde parti çizelgeleme sezgiseli            | Ortalama akış süresi için alt ve üst sınırlar Toplam işçi sayısı                 |
| <b>Tian vd. (2016)</b>    | Enk ortalama gecikme  | Tek Amaçlı                 | -   | Koalisyon tabanlı çizelgeleme sezgiseli                  | Esnek rotalar  |
| <b>Ele alınan Çalışma</b> | Enk HDE<br>Enk HİB<br>Enk enb tamamlanma zamanı                       | Ağırlıklı Toplam           | Doğrusal karma tamsayılı matematiksel model         | Genetik Algoritma  | İşlem sırası Esnek rotalar   |

### 3. YÖNTEM

#### 3.1 Bütünleşik Hücre Oluşturma ve Parça Çizelgeleme Probleminin Tanımlanması

Gerçek hayat problemlerinde karşılaşılan en gerçekçi çizelgeleme ortamlarından biri atölye tipi üretim ortamı olarak bilinen, işlerin kendi rotalarının olduğu durumda makinelerdeki iş sıralarının ve zamanlarının belirlenmesidir. Daha da gerçekçi noktada, bir parçanın belirli bir işleminin özdeş ya da özdeş olmayan makinelerde işlenebilirliğidir. Bu konu literatürde, esnek atölye tipi çizelgeleme kapsamında ele alınır. Karşılaşılan bu esneklik, parçanın işlenmesi için alternatif bir rota faydası sağlarken, öte yandan sistem karmaşıklığını oldukça arttırmaktadır. Esnek atölye ortamında hücre oluşturma konusunu ele alınan çalışmalar incelendiğinde, çoğunlukla tek bir amaç dikkate alınarak probleme çözüm araştırıldığı gözlenmiştir. Ancak, hücre oluşturma ve çizelgeleme konusundaki amaçların birlikte dikkate alınması etkili çözümler elde etmek adına daha yararlı olacaktır.

İzleyen bölümde, belirtilen problem için problem tanımı ve varsayımlar doğrultusunda, geliştirilen matematiksel modele yer verilmektedir. Literatürde yer alan benzer konulu çalışmalarda kullanılan matematiksel modellerden esinlenilerek, yukarıdaki özel durumların dikkate alındığı yeni bir model geliştirilmiştir.

#### Varsayımlar

1. Bazı makineler bazı parçaları, bir makine bir anda yalnız bir parçayı işleyebilir.
2. Her bir tip makineden bir tane olduğu varsayılmıştır.
3. Her bir makine ve parça yalnız bir hücreye atanabilir.
4. Bazı parçaların bazı işlemleri için birden fazla makine seçeneği mevcuttur, bu durumda makinelerin parçayı işleme süresi aynı ya da farklı olabilir.
5. Parçaların bazı işlemleri farklı hücrelere atanmış makinelerde gerçekleştirilecek olabilir. Bu parçalar, hücre dışı eleman olarak adlandırılır.
6. Parçaların hücre içerisinde ve hücreler arasında, makineler arası taşınmalar ihmal edilmiştir.
7. İşlemlerin işlenme sırası belirli ve sabittir.
8. İşlemlerin makinelerde işlenme süresi biliniyor ve sabittir.

9. Parça işlemleri için gerekli hazırlık süreleri işlenme süresine dahil kabul edilmiştir.
10. İşlerin bölünmediği varsayılmıştır.
11. Her bir iş parçasının sıfır anında hazır olduğu, sistemde kaynak (malzeme, operatör vs.) eksikliği ve makine bozulmaları olmadığı varsayılmıştır.
12. Her bir işin  $i$ . işlemi ancak ilgili işin  $(i-1)$ . işlemi ve ilgili makinedeki bir önceki sıradaki iş tamamlandıktan sonra başlayabilir.
13. Her bir hücreye atanabilecek makine ve parça sayısı için alt/üst sınırlar mevcuttur.

### 3.2 Matematiksel Model, Doğrusallaştırma ve Boyut Analizi

Problemin doğru bir şekilde gösterimi ve en iyi çözümün elde edilebilmesi için problemin matematiksel olarak modellenmesi uygun bir yoldur. Bu bölümde, problemi temsil edebilecek yeni bir matematiksel model geliştirilmiştir.

#### İndisler

|     |               |                     |
|-----|---------------|---------------------|
| $i$ | iş indisi     | $1 \leq i \leq n$   |
| $j$ | işlem indisi  | $0 \leq j \leq n_i$ |
| $k$ | makine indisi | $0 \leq k \leq m$   |
| $l$ | sıra indisi   | $0 \leq l \leq l_i$ |
| $c$ | hücre indisi  |                     |

#### Parametreler

|           |  |
|-----------|--|
| $O_{ij}$  | $i$ . işin $j$ . işlemi  |
| $p_{ijk}$ | $i$ . işin $j$ . işleminin $k$ . makinede işlenme süresi   |
| $a_{ijk}$ | $= \begin{cases} 1, & i. parçanın j. işlemi k. makinede gerçekleştirilebilir \\ 0, & dd \end{cases}$ |
| $M$       | büyük pozitif bir sayı   |

#### Karar Değişkenleri

$$x_{i,j,k,l,c} = \begin{cases} 1, & i. işi k. makinede l. sırada c. hücrede gerçekleştiriliyorsa \\ 0, & dd \end{cases}$$

$$z_{k,c} = \begin{cases} 1, & k. makine c. hücreye atanırsa \\ 0, & dd \end{cases}$$

$$y_{i,c} = \begin{cases} 1, i. \text{ parça } c. \text{ hücreye atanırsa} \\ 0, \text{ dd} \end{cases}$$

$$v_{i,k,c} = \begin{cases} 1, i. \text{ parça } k. \text{ makinede } c. \text{ hücrede işleniyorsa} \\ 0, \text{ dd} \end{cases}$$

$t_{i,j}$   $O_{ij}$  nin başlama zamanı

$Tm_{k,l}$   $k. \text{ makinede } l. \text{ sıradaki işin başlama zamanı}$

HDE hücre dışı eleman

HİB hücre içi boşluk

$C_{enb}$  son işin tamamlanma zamanı

$Z_{amac}$  skalerleştirilmiş amaç fonksiyonu değer

### Amaç Fonksiyonu ve Kısıtlar

$$Enk Z_{amac} = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l \sum_c x_{i,j,k,l,c} z_{k,c} (1 - y_{i,c}) \quad (3.1)$$

$$+ \sum_i \sum_k \sum_c y_{i,c} z_{k,c} (1 - v_{i,k,c}) + C_{enb}$$

$$\sum_k \sum_l \sum_c x_{i,j,k,l,c} = 1 \quad \forall i, j \quad (3.2)$$

$$\sum_i \sum_j x_{i,j,k,l,c} \leq 1 \quad \forall k, l, c \quad (3.3)$$

$$\sum_l \sum_c x_{i,j,k,l,c} \leq a_{i,j,k} \quad \forall i, j, k \quad (3.4)$$

$$t_{i,j+1} \geq t_{i,j} + \sum_k \sum_l x_{i,j,k,l,c} p_{i,j,k} \quad \forall i, j < n_j, c \quad (3.5)$$

$$Tm_{k,l+1} \geq Tm_{k,l} + \sum_i \sum_j x_{i,j,k,l,c} p_{i,j,k} \quad \forall k, l < l_i, c \quad (3.6)$$

$$Tm_{k,l} \leq t_{i,j} + M (1 - x_{i,j,k,l,c}) \quad \forall i, j, k, l, c \quad (3.7)$$

$$Tm_{k,l} \geq t_{i,j} - M(1 - x_{i,j,k,l,c}) \quad \forall i,j,k,l,c \quad (3.8)$$

$$C_{enb} \geq t_{i,j} + \sum_k \sum_l x_{i,j,k,l,c} p_{i,j,k} \quad \forall i,j,c \quad (3.9)$$

$$\sum_c z_{k,c} = 1 \quad \forall k \quad (3.10)$$

$$\sum_k z_{k,c} \geq 1 \quad \forall c \quad (3.11)$$

$$\sum_c y_{i,c} = 1 \quad \forall i \quad (3.12)$$

$$\sum_i y_{i,c} \geq 1 \quad \forall c \quad (3.13)$$

$$x_{i,j,k,l,c} \leq a_{i,j,k} z_{k,c} \quad \forall i,j,k,l,c \quad (3.14)$$

$$z_{k,c} \in \{0,1\} \quad \forall k,c \quad (3.15)$$

$$y_{i,c} \in \{0,1\} \quad \forall i,c \quad (3.16)$$

$$x_{i,j,k,l,c} \in \{0,1\} \quad \forall i,j,k,l,c \quad (3.17)$$

$$Tm_{k,l} \geq 0 \quad \forall k,l \quad (3.18)$$

$$t_{i,j}, C_{enb}, Z_{amac} \geq 0 \quad \forall i,j \quad (3.19)$$

- (3.1) nolu eşitlik ile skalerleştirilmiş amaç fonksiyonları ifade edilmiştir. Modelin amaç fonksiyonlarından ilki, hücre dışı elemanların en küçüklenmesidir. Diğer bir ifadeyle, parça işleminin ilgili parçanın atandığı hücreden farklı bir hücrede işlem görmesi sonucu ortaya çıkan ceza değeridir. İkinci amaç, hücre içi boşlukların en küçüklenmesidir. Üçüncü amaç ise, parçaların makinelerde çizelgelenmesi sonucu ortaya çıkacak en büyük tamamlanma zamanının en küçüklenmesidir.
- (3.2) nolu kısıta göre, her bir işin her bir işlemi elverişli makinelerden yalnız birine, bir sıraya ve bir hücreye atanmalıdır.

- (3.3) nolu kısıt, makinenin tüm yeteneklerinin tamamıyla kullanılmayabileceğini göstermektedir. Aynı işlemleri gerçekleştirebilecek makine seçenekleri söz konusu olduğundan, bazı makinelere atama yapılmaması olasıdır.
- (3.4) nolu kısıta göre, her bir işlem sadece önceden belirlenmiş yetenekteki makinede gerçekleştirilebilir.
- (3.5) nolu kısıt işlerin işlemlerinin başlangıç zamanları arasındaki öncelik ilişkilerini korumaktadır.
- (3.6) nolu kısıt makinenin ilgili sırasına işlemin atanması için önceki sıradaki işlerin tamamlanmasını gerektirmektedir.
- (3.7) ve (3.8) nolu kısıtlar ile, ilgili işlemin makinenin bir sırasında işleme başlayabilmesi için işlem ve makine uygunluğu sağlanmalıdır.  $x_{i,j,k,l,c} = 1$  ise, diğer deyişle  $i$ . işin  $j$ . işlemi  $k$ . makinede  $l$ . sırada ve  $c$ . hücrede gerçekleşecekse,  $t_{i,j} = Tm_{k,l}$  olmalıdır. Bu durumda,  $i$ . işin  $j$ . işleminin başlama anı,  $k$ . makinede  $l$ . sıradaki işin başlama anına eşit olacaktır.
- (3.9) nolu kısıt, her bir işin tamamlanma zamanını hesaplayarak, aralarından en büyüğünü tespit etmektedir.
- (3.10) nolu kısıt, her bir makinenin bir hücreye atanmasını sağlamaktadır.
- (3.11) nolu kısıt, her bir hücreye atanan makine sayısı için alt sınırı ifade etmektedir.
- (3.12) nolu kısıt her bir parçanın bir hücreye atanmasını sağlamaktadır.
- (3.13) nolu kısıt, her bir hücreye atanacak parça sayısı için alt sınırı garanti etmektedir.
- (3.14) nolu kısıt, işin ancak ilgili makinenin atandığı hücrede yapılabilirliğini garanti etmektedir.
- (3.15) ve (3.19) nolu kısıtlar ile arasındakiler, 0-1 tamsayılı karar değişkenlerini ve sıfır ya da pozitif değer alan karar değişkenlerini göstermektedir.

### Önerilen Modelin Doğrusallaştırılması

Önerilen matematiksel model doğrusal olmayan yapıdadır.  $F_{i,j,k,l,c}$ ,  $S_{i,j,k,l,c}$ ,  $U_{i,k,c}$ ,  $H_{i,k,c}$  değişkenleri kullanılarak, amaç fonksiyonunda 0-1 karar değişkenlerinin çarpımı olarak ifade edilen terimler doğrusallaştırılmıştır. Doğrusal olmayan terimler,  $F_{i,j,k,l,c} = x_{i,j,k,l,c} * z_{k,c}$ ,  $S_{i,j,k,l,c} = x_{i,j,k,l,c} * z_{k,c} * y_{i,c}$ ,  $U_{i,k,c} = y_{i,c} * z_{k,c}$ ,  $H_{i,k,c} = y_{i,c} * z_{k,c} * v_{i,k,c}$



olmak üzere, izleyen karar değişkeni ve kısıtlar eklenerek model doğrusal karma tamsayılı hale getirilmiştir.

$$x_{i,j,k,l,c} + z_{k,c} \geq 2 * F_{i,j,k,l,c} \quad \forall i, j, k, l, c \quad (3.20)$$

$$x_{i,j,k,l,c} + z_{k,c} \leq 1 + F_{i,j,k,l,c} \quad \forall i, j, k, l, c \quad (3.21)$$

$$x_{i,j,k,l,c} + z_{k,c} + y_{i,c} \geq 3 * S_{i,j,k,l,c} \quad \forall i, j, k, l, c \quad (3.22)$$

$$x_{i,j,k,l,c} + z_{k,c} + y_{i,c} \leq 2 + S_{i,j,k,l,c} \quad \forall i, j, k, l, c \quad (3.23)$$

$$y_{i,c} + z_{k,c} \geq 2 * U_{i,k,c} \quad \forall i, k, c \quad (3.24)$$

$$y_{i,c} + z_{k,c} \leq 1 + U_{i,k,c} \quad \forall i, k, c \quad (3.25)$$

$$y_{i,c} + z_{k,c} + v_{i,k,c} \geq 3 * H_{i,k,c} \quad \forall i, k, c \quad (3.26)$$

$$y_{i,c} + z_{k,c} + v_{i,k,c} \leq 2 + H_{i,k,c} \quad \forall i, k, c \quad (3.27)$$

$$v_{i,k,c} \leq \sum_j \sum_l x_{i,j,k,l,c} \quad \forall i, k, c \quad (3.28)$$

$$F_{i,j,k,l,c}, S_{i,j,k,l,c}, U_{i,k,c}, H_{i,k,c}, v_{i,k,c} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k, l, c \quad (3.29)$$

Sonuç olarak elde edilen model, kısıtlar (3.2)-(3.29), eşitlik (3.30)-(3.31) ve izleyen skalerleştirilmiş izleyen amaç fonksiyonu (3.32) ve kısıt (3.33) ile ifade edilebilmektedir.

$$HDE = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l \sum_c (F_{i,j,k,l,c} - S_{i,j,k,l,c}) \quad (3.30)$$

$$HİB = \sum_i \sum_k \sum_c (U_{i,k,c} - H_{i,k,c}) \quad (3.31)$$

$$Enk Z_{amac} = HDE + HİB + C_{enb} \quad (3.32)$$

$$HDE, HİB, Z_{amac} \geq 0 \quad (3.33)$$

Matematiksel Modelin Örnek Problemler Üzerinde Gösterimi

Modelin çalışma biçimini göstermek adına, esnek atölye ortamı literatür problemlerinden Fattahi ve Mehrabad (2007) çalışmasındaki “SFJS7” ve “MFJS5” problemleri ele alınmıştır.

Sayısal Örnek 1: Problem, 3 iş, 3 işlem ve 5 makineli ortamı içermektedir. Örnek problemde, oluşturulacak hücre sayısının 2 olduğu durum gösterilmiştir. İşlem sıraları, makine seçenekleri ve parça işlemleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir. Çizelge 3.1’de verilen bilgilere göre, ilk parçanın birinci işlemi birinci makinede 117 birim zamanda, ikinci makinede ise 125 birim zamanda gerçekleştirilebilecektir. Her bir parçanın ilgili makinelerdeki işlenme süreleri Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Örnek esnek atölye ortamı veri seti (3 iş ve 5 makine)

| iş | işlem     |           |           |
|----|-----------|-----------|-----------|
|    | 1         | 2         | 3         |
| 1  | $m_1=117$ | $m_2=130$ | $m_4=150$ |
|    | $m_2=125$ | $m_4=140$ | $m_5=160$ |
| 2  | $m_1=214$ | $m_2=66$  | $m_3=65$  |
|    | $m_3=150$ | $m_3=55$  | $m_5=78$  |
| 3  | $m_1=87$  | $m_3=80$  | $m_4=190$ |
|    | $m_2=62$  | $m_4=70$  | $m_5=100$ |

Çizelge 3.2.  $p_{i,j,k}$  verileri (sayısal örnek-1)

| parça.işlem | makine |     |     |     |     |
|-------------|--------|-----|-----|-----|-----|
|             | 1      | 2   | 3   | 4   | 5   |
| 1.1         | 117    | 125 | —   | —   | —   |
| 1.2         | —      | 130 | —   | 140 | —   |
| 1.3         | —      | —   | —   | 150 | 160 |
| 2.1         | 214    | —   | 150 | —   | —   |
| 2.2         | —      | 66  | 55  | —   | —   |
| 2.3         | —      | -   | 65  | —   | 78  |
| 3.1         | 87     | 62  | —   | —   | —   |
| 3.2         | —      | —   | 80  | 70  | —   |
| 3.3         | —      | —   | —   | 190 | 100 |

Önerilen bütünleşik hücre oluşturma ve çizelgeleme problemi GAMS 24.2.1 yazılımı ile çözülmüştür. Küçük boyutlu bu test problemi için, hücrelere atanabilecek en küçük

makine ve parça sayısı bir olarak seçilmiştir. Sonuç olarak, bütünleşik çözümde parça ve makinelerin iki hücreli durum için hücelere atama sonuçlarına Çizelge 3.3'de yer verilmiştir.

Çizelge 3.3. Atama sonuçları (sayısal örnek-1)

| Hücre | Makine     | Parça |
|-------|------------|-------|
| 1     | M1, M2, M4 | P1    |
| 2     | M3,M5      | P2,P3 |

Sonuçlara göre, iki hücreli ortam dikkate alındığında birinci, ikinci ve dördüncü makineler ile birinci parça ilk hücreye; üçüncü ve beşinci makineler ile ikinci ve üçüncü parçalar ikinci hücreye atanmalıdır. Parça ve makinelere ilişkin elde edilen hücre oluşturma matrisine Çizelge 3.4'te yer verilmiştir.

Çizelge 3.4. Hücre oluşturma matrisi (sayısal örnek-1)

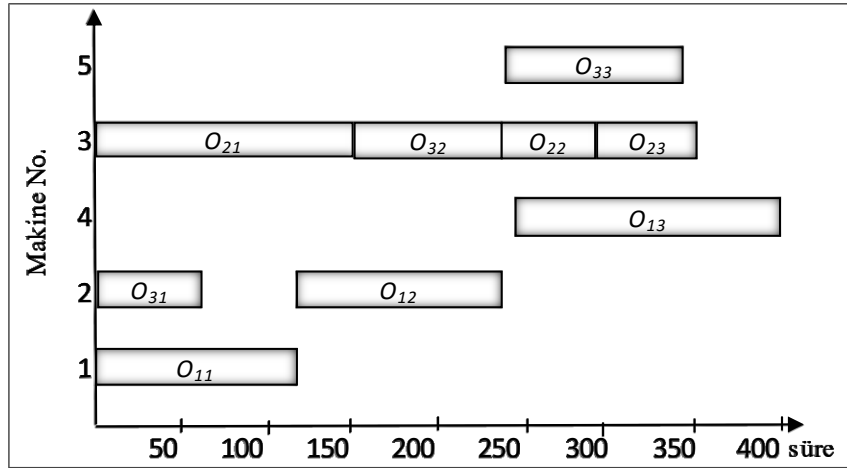
| Hücre No. | Parça No. | Makine No. |   |   |     |   |
|-----------|-----------|------------|---|---|-----|---|
|           |           | 1          | 2 | 4 | 3   | 5 |
| 1         | 1         | 1          | 2 | 3 |     |   |
| 2         | 2         |            |   |   | 1,2 | 3 |
|           | 3         |            | 1 |   | 2   | 3 |

İki hücre oluşumunun dikkate alındığı sonuçlara göre, birinci parçanın ilk işlemi birinci makinede, ikinci işlemi ikinci makinede ve son işlemi dördüncü makinede gerçekleşecektir. Benzer şekilde, ikinci parçanın birinci ve ikinci işlemleri üçüncü makinede, son işlemi beşinci makinede gerçekleşecektir. Üçüncü parçanın işlemleri ise sırasıyla, ikinci, üçüncü ve beşinci makinelerde gerçekleşecektir. Hücre içerisindeki sıfırlar hücre içi boşluğu oluşturmaktadır. Bu örnekte, hücre içi boşluk sıfırdır. Hücre dışındaki değerler hücre dışı elemanı oluşturmakta olup, bu örnek için değeri "1"dir.

GAMS 24.6.1 model çözüm sonuçlarına göre, parçalara ilişkin işlemlerin gerçekleştirilmesine ilişkin çizelgeleme sonuçlarına Çizelge 3.5'de yer verilmiştir. Gantt şemasına ise Şekil 3.1'de yer verilmiş olup, en büyük tamamlanma zamanı 397 birim zamandır.

Çizelge 3.5. Çizelgeleme sonuçları (sayısal örnek-1)

|            |  |
|------------|--|
| <b>M1:</b> | (O <sub>11</sub> : 0-117)  |
| <b>M2:</b> | (O <sub>31</sub> : 0-62) (O <sub>1,2</sub> : 117-247)  |
| <b>M3:</b> | (O <sub>21</sub> : 0-150) (O <sub>32</sub> : 150-230) (O <sub>22</sub> : 230-285)<br>(O <sub>23</sub> : 285-350) |
| <b>M4:</b> | (O <sub>13</sub> : 247-397)  |
| <b>M5:</b> | (O <sub>33</sub> : 230-330)  |



Şekil 3.1. Gantt şeması (sayısal örnek-1)

*Sayısal Örnek 2:* Problem, 7 iş, 3 işlem ve 7 makineli ortamı içermektedir. Örnek problemde, oluşturulacak hücre sayısının 3 olduğu durum gösterilmiştir. İşlem sıraları, makine seçenekleri ve parça işlemleri Çizelge 3.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6. Örnek esnek atölye ortamı veri seti (7 iş ve 7 makine)

| iş | İşlem     |           |           |   |           |           |           |
|----|-----------|-----------|-----------|---|-----------|-----------|-----------|
|    | 1         | 2         | 3         | 1 | 2         | 3         |           |
| 1  | $m_1=247$ | $m_4=140$ | $m_4=150$ | 5 | $m_2=123$ | $m_4=150$ | $m_5=110$ |
|    | $m_2=223$ | $m_2=130$ | $m_5=160$ |   | $m_3=145$ | $m_3=123$ | $m_6=85$  |
|    | $m_3=100$ | $m_7=123$ | $m_7=200$ |   | $m_1=128$ | $m_5=192$ | $m_2=100$ |
| 2  | $m_1=214$ | $m_3=87$  | $m_5=178$ | 6 | $m_2=145$ | $m_4=150$ | $m_5=120$ |
|    | $m_3=150$ | $m_2=66$  | $m_6=95$  |   | $m_3=320$ | $m_3=123$ | $m_6=240$ |
|    |           |           | $m_7=150$ |   | $m_4=154$ | $m_5=192$ | $m_7=180$ |
| 3  | $m_1=87$  | $m_7=145$ | $m_4=190$ | 7 | $m_3=145$ | $m_3=124$ | $m_5=145$ |
|    | $m_2=62$  | $m_3=180$ | $m_5=100$ |   | $m_2=157$ | $m_5=168$ | $m_6=165$ |
|    |           | $m_4=105$ | $m_6=153$ |   |           |           | $m_7=178$ |
| 4  | $m_1=87$  | $m_3=250$ | $m_4=145$ |   |           |           |           |
|    | $m_2=65$  | $m_5=173$ | $m_6=136$ |   |           |           |           |

Bütünleşik çözümde parça ve makinelerin üç hücreli durum için seçilen sürede matematiksel model ile elde edilen olurlu bir çözüm için hücrelere atama sonuçlarına Çizelge 3.7'de yer verilmiştir. Parça ve makinelere ilişkin elde edilen hücre oluşturma matrisine Çizelge 3.8'de yer verilmiştir. HİB değeri 3, HDE değeri 6 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 3.7. Atama sonuçları (sayısal örnek-2)

| Hücre | Makine     | Parça      |
|-------|------------|------------|
| 1     | M3, M4     | P1, P6     |
| 2     | M2, M5, M6 | P2, P4, P7 |
| 3     | M1, M7     | P3, P5     |

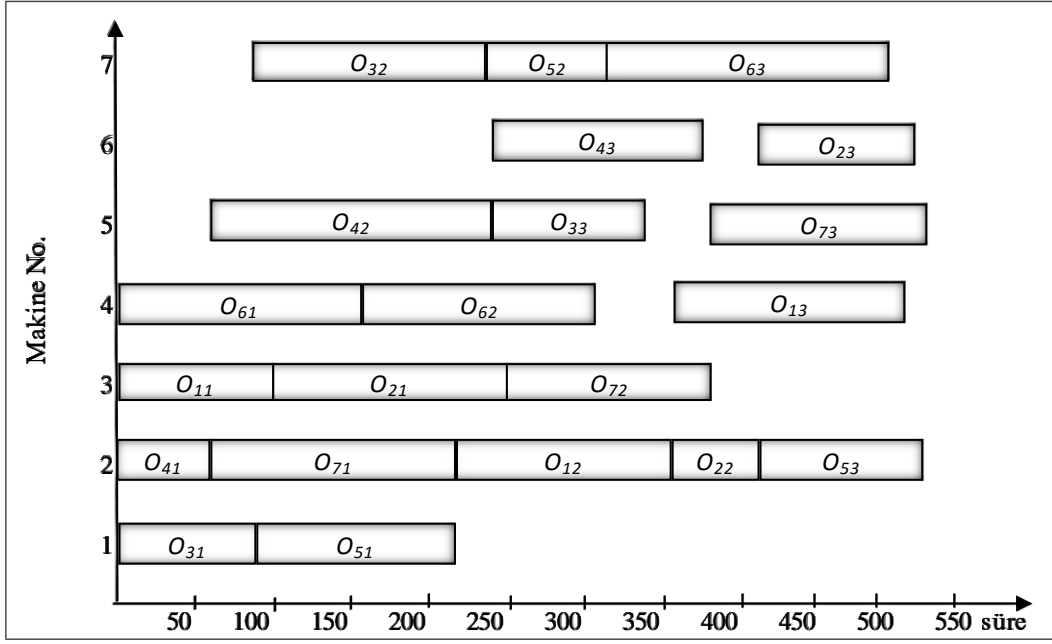
Çizelge 3.8. Hücre oluşturma matrisi (sayısal örnek-2)

| Hücre No. | Parça No. | Makine No. |     |   |   |   |   |   |
|-----------|-----------|------------|-----|---|---|---|---|---|
|           |           | 3          | 4   | 2 | 5 | 6 | 1 | 7 |
| 1         | 1         | 1          | 3   | 2 |   |   |   |   |
|           | 6         | 0          | 1,2 |   |   |   |   | 3 |
| 2         | 2         | 1          |     | 2 | 0 | 3 |   |   |
|           | 4         |            |     | 1 | 2 | 3 |   |   |
|           | 7         | 2          |     | 1 | 3 | 0 |   |   |
| 3         | 3         |            |     |   | 3 |   | 1 | 2 |
|           | 5         |            |     | 3 |   |   | 1 | 2 |

GAMS 24.6.1 model çözüm sonuçlarına göre, parçalara ilişkin işlemlerin gerçekleştirilmesine ilişkin çizelgeleme sonuçlarına Çizelge 3.9'da yer verilmiştir. Gantt şemasına ise Şekil 3.2'de yer verilmiş olup, en büyük tamamlanma zamanı 519 birim zamandır.

Çizelge 3.9. Çizelgeleme sonuçları (sayısal örnek-2)

|            |  |
|------------|--|
| <b>M1:</b> | (O <sub>31</sub> : 0-87) (O <sub>51</sub> : 87-215)  |
| <b>M2:</b> | (O <sub>41</sub> : 0-65) (O <sub>71</sub> : 65-222) (O <sub>12</sub> : 222-352)<br>(O <sub>22</sub> : 352-418) (O <sub>53</sub> : 418-518) |
| <b>M3:</b> | (O <sub>11</sub> : 0-100) (O <sub>21</sub> : 100-250) (O <sub>72</sub> : 250-374)  |
| <b>M4:</b> | (O <sub>61</sub> : 0-154) (O <sub>62</sub> : 154-304) (O <sub>13</sub> : 352-502)  |
| <b>M5:</b> | (O <sub>42</sub> : 65-238) (O <sub>33</sub> : 238-338) (O <sub>73</sub> : 374-519)   |
| <b>M6:</b> | (O <sub>43</sub> : 238-374) (O <sub>23</sub> : 418-513)  |
| <b>M7:</b> | (O <sub>32</sub> : 87-232) (O <sub>52</sub> : 232-318) (O <sub>63</sub> : 318-498)   |



Şekil 3.2. Gantt şeması (sayısal örnek-2)

### Matematiksel Model Boyut Analizi ve Literatürden Türetilen Problemler

Bu kısımda, geliştirilen matematiksel modele ilişkin boyut analizine yer verilmiştir. Çizelge 3.10'da matematiksel model için kısıt ve eşitlikler temelinde ve Çizelge 3.11'de değişkenler temelinde boyut analizi sunulmuştur. Yanı sıra, önceki bölümde yer alan sayısal örnek SFJSCF\_7 için sayısal sonuçlar gösterilmiştir.

Çizelge 3.10. Matematiksel model için boyut analizi (kısıt ve eşitlik temelinde – örnek problem SFJSCF\_7  $i=3, j=3, k=5, c=2, l=4$ )

| Kısıt no                              | İndisler        | Kısıt Sayısı   | Problem için kısıt ve eşitlik sayıları |
|---------------------------------------|-----------------|--|--|
| 2                                     | $i, j$          | $i*j$  | 9                                      |
| 3                                     | $k, l, c$       | $k*l*c$  | 40                                     |
| 4                                     | $i, j, k$       | $i*j*k$  | 45                                     |
| 5                                     | $i, j, c$       | $i*(j-1)*c$  | 12                                     |
| 6                                     | $k, l, c$       | $k*(l-1)*c$  | 30                                     |
| 7                                     | $i, j, k, l, c$ | $i*j*k*l*c$  | 360                                    |
| 8                                     | $i, j, k, l, c$ | $i*j*k*l*c$  | 360                                    |
| 9                                     | $i, j, c$       | $i*j*c$  | 18                                     |
| 10                                    | $k$             | $k$  | 5                                      |
| 11                                    | $c$             | $c$  | 2                                      |
| 12                                    | $i$             | $i$  | 3                                      |
| 13                                    | $c$             | $c$  | 2                                      |
| 14                                    | $i, j, k, l, c$ | $i*j*k*l*c$  | 360                                    |
| 17                                    | $i, j, k, l, c$ | $i*j*k*l*c$  | 360                                    |
| 18                                    | $i, j, k, l, c$ | $i*j*k*l*c$  | 360                                    |
| 19                                    | $i, j, k, l, c$ | $i*j*k*l*c$  | 360                                    |
| 20                                    | $i, j, k, l, c$ | $i*j*k*l*c$  | 360                                    |
| 21                                    | $i, k, c$       | $i*k*c$  | 30                                     |
| 22                                    | $i, k, c$       | $i*k*c$  | 30                                     |
| 23                                    | $i, k, c$       | $i*k*c$  | 30                                     |
| 24                                    | $i, k, c$       | $i*k*c$  | 30                                     |
| 25                                    | $i, k, c$       | $i*k*c$  | 30                                     |
| 27                                    | -               | 1  | 1                                      |
| 28                                    | -               | 1  | 1                                      |
| 29                                    | -               | 1  | 1                                      |
| <b>Toplam kısıt ve eşitlik sayısı</b> |                 | $7*(i*j*k*l*c) - i*c + k*l*c + i*j*(1+2c+k) + k*c*(5*i+l-1) + k + 2*c + i + 3$ | 2839                                   |

Çizelge 3.11. Matematiksel model için boyut analizi (değişken temelinde – örnek problem SFJSCF\_7  $i=3, j=3, k=5, c=3, l=4$ )

| Değişken                      | İndisler        | Değişken Sayısı                               |      |
|-------------------------------|-----------------|---|------|
| $z_{kc}$                      | $k, c$          | $k*c$   | 10   |
| $y_{ic}$                      | $i, c$          | $i*c$   | 6    |
| $x_{ijklc}$                   | $i, j, k, l, c$ | $i*j*k*l*c$                                   | 360  |
| $S_{ijklc}$                   | $i, j, k, l, c$ | $i*j*k*l*c$                                   | 360  |
| $F_{ijklc}$                   | $i, j, k, l, c$ | $i*j*k*l*c$                                   | 360  |
| $U_{ijklc}$                   | $i, j, k, l, c$ | $i*k*c$                                       | 30   |
| $H_{ijklc}$                   | $i, j, k, l, c$ | $i*k*c$                                       | 30   |
| $t_{ij}$                      | $i, j$          | $i*j$   | 9    |
| $Tm_{kl}$                     | $k, l$          | $k*l$   | 20   |
| $C_{enb}$                     | -               | 1   | 1    |
| $HDE$                         | -               | 1   | 1    |
| $HIB$                         | -               | 1   | 1    |
| $Z_{amac}$                    | -               | 1   | 1    |
| $v_{ikc}$                     | $i, k, c$       | $i*k*c$                                       | 30   |
| <b>Toplam değişken sayısı</b> |                 | $3*(i*j*k*l*c)+k*c*(3*i+1)+c*(k+i)+i*j+k*l+4$ | 1219 |

Literatürde, ele alınan problemi tüm verileriyle temsil edebilecek bir çalışmaya rastlanamamıştır. Ancak, esnek atölye ortamı literatür problemlerinden Fattahi vd. (2007)'deki farklı problem setleri çizelgeleme boyutuyla dikkate alınarak, hücre oluşturma boyutunda bazı parametre eklentileri ile yeni veri setleri türetilmiştir.

Test problemleri türetilirken boyut ( $n/h/m/c$ ),  $n$ : iş sayısı,  $h$ : işlem sayısı,  $m$ : makine sayısı ve  $c$ : hücre sayısı olmak üzere, küçük boyutlular (SFJSCF\_1-10), orta ve büyük boyutlular (MFJSCF\_1-10) şeklindedir. Test problemlerine ilişkin veri setine Ek açıklama A'da yer verilmiştir.

Küçük boyutlu test problemlerine ilişkin sonuçlar dal-sınır tekniği ile elde edilebilmiştir. Problem NP-zor ve kombinatorial yapıda olduğu için, orta ve büyük boyutlarda dal sınır tekniği ile en iyi çözüme ulaşılamamıştır.

Küçük boyutlu (SFJSCF\_1-10) test problemleri için, iki amaç fonksiyonundan biri olan  $C_{enb}$  için dal sınır tekniği ile en iyi değerler elde edilebilmiştir. Ayrıca, hücre içi boşluk ve hücre dışı eleman olmak üzere diğer amaç fonksiyonu değerlerine de yer verilmiştir. Türetilen küçük boyutlu test problemlerine ilişkin sonuçlara Çizelge 3.12'de yer verilmiştir. Orta ve büyük boyutlu (MFJSCF\_1-10) problemlerde, geliştirilen matematiksel model için, Çizelge 3.13'ta amaç fonksiyonu sütununda, sınır değerler ile programın bir saatlik süre



çalıştırılması sonucu elde edilen en iyi tamsayılı değerler gösterilmiştir. Literatürdeki parça makine sayısına bağlı değerlerden hareketle, küçük boyutlu problemlerde hücre sayısı 2, orta boyutlularda 2 ve 3 olarak değerlendirilmiştir.

Fattahi vd. (2007)'nin esnek atölye tipi iş çizelgeleme problemleri için geliştirdiği veri seti 20 test probleminden oluşmaktadır. Test problemleri iki kategoriye ayrılmıştır. İlki, küçük boyutlu esnek atölye tipi çizelgeleme problemleri (SFJS\_1-10) ve ikincisi büyük boyutlu esnek atölye tipi çizelgeleme problemleri (MFJS\_1-10) olarak isimlendirilmiştir. İş sayısı 2'den 12'ye, makine sayısı 2'den 8'e, işlerin işlem sayısı 2'den 4'e ve tüm işlemler de 4'ten 48'e kadar değişkenlik göstermektedir.

Söz konusu test problemlerini ele almış pek çok çalışma mevcuttur. Bagheri vd. (2010), yapay bağışıklık algoritmasının problemin çözümü üzerindeki performansını araştırmışlardır. Başlangıç popülasyonun oluşturulması ve seçim aşamasında pek çok farklı teknik kullanmışlardır. Algoritmanın performansını göstermek üzere, en büyük tamamlanma zamanları bazında Fattahi vd. (2007)'nin sonuçlarına göre iyileşme yüzdelerini dikkate almışlardır. Ozguven vd. (2010), EATÇP için alternatif karma tamsayılı doğrusal bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Çizelgeleme amacına yönelik en iyi sonuçlara ise Çizelge 3.14'te yer verilmiştir.

Çizelge 3.12. Türetilen test problemleri ve ilgili parametreler (küçük boyut)

| Problem          | Boyut<br>(parça, işlem,<br>makine, hücre) | Değişken sayısı<br>(tamsayılı, toplam) | Toplam kısıt ve<br>eşitlik sayısı | Dal Sınır Tekniği |                         |          |
|------------------|---|--|-----------------------------------|-------------------|-------------------------|----------|
|                  |   |  |                                   | CPU<br>süre (s)   | ( $C_{enb}$ , HDE, HİB) | $Z_{MM}$ |
| <b>SFJSCF_1</b>  | (2,2,2,2)                                 | 224, 240                               | 551                               | 0.25              | (66,0,0)                | 66       |
| <b>SFJSCF_2</b>  | (2,2,2,2)                                 | 176, 190                               | 431                               | 0.09              | (107,0,0)               | 107      |
| <b>SFJSCF_3</b>  | (3,2,2,2)                                 | 406, 426                               | 984                               | 4.47              | (221,1,0)               | 222      |
| <b>SFJSCF_4</b>  | (3,2,2,2)                                 | 478, 500                               | 1160                              | 3.4               | (355, 1, 0)             | 356      |
| <b>SFJSCF_5</b>  | (3,2,2,2)                                 | 478, 500                               | 1160                              | 16.0              | (119, 3, 0)             | 122      |
| <b>SFJSCF_6</b>  | (3,3,3,2)                                 | 1362, 1399                             | 3283                              | 56.0              | (320, 0, 0)             | 320      |
| <b>SFJSCF_7</b>  | (3,3,5,2)                                 | 1186, 1219                             | 2839                              | 5.0               | (397, 1, 0)             | 398      |
| <b>SFJSCF_8</b>  | (3,3,4,2)                                 | 1166, 1199                             | 2801                              | 505               | (253,1,0)               | 254      |
| <b>SFJSCF_9</b>  | (3,3,3,2)                                 | 1362,1399                              | 3283                              | 45.27             | (210,2,0)               | 212      |
| <b>SFJSCF_10</b> | (4,3,5,2)                                 | 1578,1614                              | 3758                              | 195               | (516,0,0)               | 516      |

Çizelge 3.13. Türetilen test problemleri ve ilgili parametreler (orta/büyük boyut)

| Problem   | Boyut<br>(iş, işlem,<br>makine, hücre) | Değişken sayısı<br>(tamsayılı, toplam) | Toplam kısıt ve<br>eşitlik sayısı | Dal Sınır Tekniği |                  |            |
|-----------|--|--|-----------------------------------|-------------------|------------------|------------|
|           |  |  |                                   | CPU<br>süre (s)   | (Cenb, HDE, HİB) | * $Z_{MM}$ |
| MFJSCF_1  | (5,3,6,2)                              | 3442,3497                              | 8165                              | 3600              | (469, 2, 2)      | (405,473)  |
|           | (5,3,6,3)                              | 5163,5218                              | 12188                             | 3600              | (468, 3, 0)      | (403,471)  |
| MFJSCF_2  | (5,3,7,2)                              | 4644,4712                              | 11011                             | 3600              | (446, 2, 6)      | (398,454)  |
|           | (5,3,7,3)                              | 6966,7034                              | 16499                             | 3600              | (448, 5, 2)      | (375,455)  |
| MFJSCF_3  | (6,3,7,2)                              | 7082,7167                              | 16758                             | 3600              | (466, 3, 8)      | (388,477)  |
|           | (6,3,7,3)                              | 10623,10708                            | 25057                             | 3600              | (468, 7, 3)      | (344,478)  |
| MFJSCF_4  | (7,3,7,2)                              | 9142,9237                              | 21595                             | 3600              | (565, 1, 8)      | (496,574)  |
|           | (7,3,7,3)                              | 13713,13808                            | 32300                             | 3600              | (565, 5, 5)      | (453,575)  |
| MFJSCF_5  | (7,3,7,2)                              | 9142,9237                              | 21595                             | 3600              | (514, 3, 9)      | (414,526)  |
|           | (7,3,7,3)                              | 13713,13808                            | 32300                             | 3600              | (514, 9, 6)      | (368,529)  |
| MFJSCF_6  | (8,3,7,2)                              | 12462,12574                            | 29400                             | 3600              | (648, 15, 4)     | (614,667)  |
|           | (8,3,7,3)                              | 18693,18805                            | 43995                             | 3600              | (634, 10, 2)     | (547,646)  |
| MFJSCF_7  | (8,4,7,2)                              | 20526,20667                            | 48396                             | 3600              | (881, 23, 5)     | (764,909)  |
|           | (8,4,7,3)                              | 30789,30930                            | 72457                             | 3600              | (920, 17, 3)     | (649,940)  |
| MFJSCF_8  | (9,4,8,2)                              | 28114,28282                            | 66202                             | 3600              | (958, 16, 11)    | (764,985)  |
|           | (9,4,8,3)                              | 42171,42339                            | 99131                             | 3600              | (959, 26, 5)     | (660,990)  |
| MFJSCF_9  | (11,4,8,2)                             | 40694,40894                            | 95680                             | 3600              | (1158, 22, 15)   | (764,1195) |
|           | (11,4,8,3)                             | 61041,61241                            | 143311                            | 3600              | (1346, 20, 7)    | (711,1373) |
| MFJSCF_10 | (12,4,8,2)                             | 49000,49220                            | 115139                            | 3600              | (1361, 18, 12)   | (944,1391) |
|           | (12,4,8,3)                             | 73500,73720                            | 172481                            | 3600              | -                | -          |

\* $Z_{MM}$  (Sınır Değer, En iyi tamsayılı değer): Tamsayılı sınır değer, amaç fonksiyonunun ulaşabileceği en iyi sınır değerdir.

En iyi tamsayılı değer, dal sınır tekniği ile çözüm süreci içerisinde elde edilmiş en iyi değerdir.

Çizelge 3.14. Çizelgeleme amacına yönelik elde edilen en iyi sonuçlar

| Problem   | Ozguven vd. (2010) |                  | (Fattahi vd., 2007) |                  |                     |                  |                     |                  |                     |                  |                  |                  |                  |                  |
|-----------|--------------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|           | CPU                | C <sub>enb</sub> | HTB/TB <sup>a</sup> |                  | HTB/TA <sup>b</sup> |                  | HTA/TA <sup>c</sup> |                  | HTA/TB <sup>d</sup> |                  | BTB <sup>e</sup> |                  | BTA <sup>f</sup> |                  |
|           |                    |                  | CPU                 | C <sub>enb</sub> | CPU                 | C <sub>enb</sub> | CPU                 | C <sub>enb</sub> | CPU                 | C <sub>enb</sub> | CPU              | C <sub>enb</sub> | CPU              | C <sub>enb</sub> |
| SFJSCF_1  | 0.02               | <b>66</b>        | 12                  | <b>66</b>        | 1                   | <b>66</b>        | 1                   | <b>66</b>        | 2                   | <b>66</b>        | 25               | <b>66</b>        | 1                | <b>66</b>        |
| SFJSCF_2  | 0.00               | <b>107</b>       | 13                  | <b>107</b>       | 1                   | <b>107</b>       | 1                   | <b>107</b>       | 3                   | <b>107</b>       | 35               | <b>107</b>       | 1                | <b>107</b>       |
| SFJSCF_3  | 0.02               | <b>221</b>       | 14                  | <b>221</b>       | 1                   | <b>221</b>       | 1                   | <b>221</b>       | 5                   | <b>221</b>       | 40               | <b>221</b>       | 1                | <b>221</b>       |
| SFJSCF_4  | 0.00               | <b>355</b>       | 14                  | <b>355</b>       | 1                   | <b>355</b>       | 1                   | <b>355</b>       | 7                   | <b>355</b>       | 45               | <b>355</b>       | 1                | <b>390</b>       |
| SFJSCF_5  | 0.06               | <b>119</b>       | 14                  | <b>119</b>       | 2                   | <b>119</b>       | 1                   | <b>119</b>       | 9                   | <b>119</b>       | 50               | <b>119</b>       | 1                | <b>137</b>       |
| SFJSCF_6  | 0.03               | <b>320</b>       | 18                  | <b>320</b>       | 3                   | <b>320</b>       | 1                   | <b>320</b>       | 7                   | <b>320</b>       | 50               | <b>320</b>       | 2                | <b>320</b>       |
| SFJSCF_7  | 0.02               | <b>397</b>       | 16                  | <b>397</b>       | 4                   | <b>397</b>       | 1                   | <b>397</b>       | 9                   | <b>397</b>       | 55               | <b>397</b>       | 2                | <b>397</b>       |
| SFJSCF_8  | 0.02               | <b>253</b>       | 17                  | <b>253</b>       | 5                   | <b>253</b>       | 2                   | <b>253</b>       | 10                  | 256              | 35               | <b>253</b>       | 2                | <b>253</b>       |
| SFJSCF_9  | 0.03               | <b>210</b>       | 19                  | <b>210</b>       | 6                   | <b>210</b>       | 2                   | <b>210</b>       | 11                  | <b>210</b>       | 55               | 215              | 3                | 215              |
| SFJSCF_10 | 0.02               | <b>516</b>       | 21                  | <b>516</b>       | 7                   | <b>516</b>       | 4                   | <b>516</b>       | 10                  | <b>516</b>       | 55               | <b>516</b>       | 3                | 617              |
| MFJSCF_1  | 0.44               | <b>468</b>       | 22                  | 479              | 55                  | 491              | 15                  | 469              | 30                  | 469              | 60               | 488              | 9                | 548              |
| MFJSCF_2  | 6.49               | <b>446</b>       | 62                  | 495              | 55                  | 482              | 12                  | 482              | 30                  | 468              | 60               | 478              | 8                | 457              |
| MFJSCF_3  | 4.14               | <b>466</b>       | 82                  | 553              | 70                  | 538              | 20                  | 533              | 50                  | 538              | 107              | 599              | 8                | 606              |
| MFJSCF_4  | 1779               | <b>564</b>       | 102                 | 656              | 85                  | 650              | 27                  | 634              | 80                  | 618              | 195              | 703              | 9                | 870              |
| MFJSCF_5  | 50                 | <b>514</b>       | 105                 | 650              | 110                 | 662              | 40                  | 625              | 64                  | 625              | 240              | 674              | 10               | 729              |
| MFJSCF_6  | 3600               | 635              | 125                 | 762              | 130                 | 785              | 96                  | 717              | 102                 | 730              | 330              | 856              | 50               | 816              |
| MFJSCF_7  | 3600               | 935              | 197                 | 1020             | 290                 | 1081             | 129                 | 964              | 190                 | 947              | 480              | 1066             | 240              | 1048             |
| MFJSCF_8  | 3600               | 905              | 230                 | 1030             | 325                 | 1122             | 405                 | 970              | 182                 | 922              | 610              | 1328             | 370              | 1220             |
| MFJSCF_9  | 3600               | 1192             | 330                 | 1180             | 660                 | 1243             | 660                 | 1105             | 330                 | 1105             | 840              | 1148             | 680              | 1124             |
| MFJSCF_10 | 3600               | 1276             | 425                 | 1538             | 600                 | 1615             | 960                 | 1404             | 430                 | 1384             | 850              | 1546             | 763              | 1737             |

<sup>a</sup>Hiyerarşik yaklaşım, tavlama benzetimi (HTB/TB), <sup>b</sup>Hiyerarşik yaklaşım, tavlama benzetimi ve tabu arama (HTB/TA), <sup>c</sup>Hiyerarşik yaklaşım, tabu arama (HTA/TA), <sup>d</sup>Hiyerarşik yaklaşım, tabu arama ve tavlama benzetimi (HTA/TB), <sup>e</sup>Tavlama benzetimi ile bütünlük yaklaşım (BTB), <sup>f</sup>Tabu arama ile bütünlük yaklaşım (BTA) \*\*koyu yazılı değerler: global en iyi

### 3.3. Geliştirilen Genetik Algoritma Temelli Çözüm Yaklaşımı

En iyi çözümü veren teknikler ile günümüz bilgisayar işlem hızlarıyla makul sürelerde elde etmek sıklıkla mümkün olamamaktadır. Üstelik, gerçek hayatta karşılaşılabılır problemlerde de, çizelgelenecek yüzlerce iş, kullanılabilir onlarca makine olabilmektedir. Bu çalışmada da geliştirilen matematiksel model kullanarak özellikle büyük boyutlu problemlerde en iyi çözüme kısa sürede ulaşmak mevcut bilgisayar yetenekleri ile mümkün olamamıştır. Problem boyutu arttıkça, çözüm süresinin üstel olarak artıyor olması -Çizelge 3.10'daki verilerden de görüleceği gibi- en iyi çözümü veren matematiksel model yerine problemin en iyi çözümünü vermeyen ancak en iyiye yakın çözümü kısa sürede veren sezgisel algoritma kullanımını gerektirmektedir. Bu konuda geliştirilen sezgisel algoritmalar incelendiğinde, literatürde pek çok problemde uygulanan ve başarısı bilinen GA tercih edilmiştir.

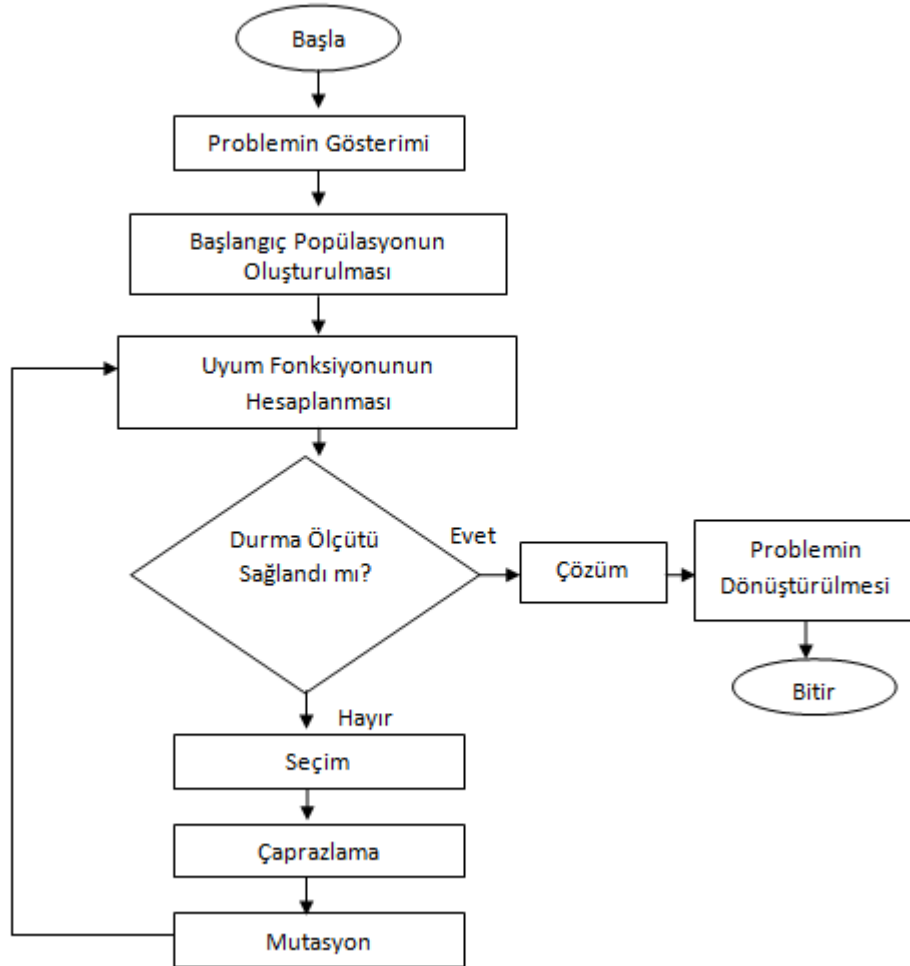
GA, rassal aramaya dayalı bir teknik olup, ilk kez Holland (1975) tarafından tanıtılmıştır. Doğal sistemlerin öğrenme süreçlerini açıklamayı ve bu sistemleri bilgisayar ortamına yansıtarak yapay sistemler oluşturmayı amaçlamışlardır. Goldberg (1988)'in çalışması da GA konusunda bir mihenk taşı konumundadır. Gen ve Cheng (2000) tarafından eniyileme problemlerindeki kullanımı araştırılmıştır.

GA, popülasyon olarak tanımlanan rassal bir başlangıç kümesiyle çözüm araması yönüyle diğer geleneksel arama tekniklerinden ayrılır. GA'da birey bir çözümü temsil etmektedir ve çözüm uzayının bir alt kümesi olan popülasyonun bir elemanıdır. Bireyler, çözümü temsil eden ve kromozom olarak adlandırılan karakter dizilerinden oluşur. Her bir kromozom bir gen kümesinden meydana gelir. Kromozomlar nesiller boyunca uyum fonksiyonu değerleri dikkate alınarak iyileştirilir. Bireyler, kopyalama, çaprazlama ve mutasyon ile gelecek nesilleri oluştururlar. Uyum değeri yüksek olan kromozomların hızla çoğalacağı varsayımı, GA'nın temel teoremini oluşturmaktadır (İşlier, 2001).

GA, doğal seçim mekanizmasını taklit edip en iyi çözüme ulaşmayı hedefleyen bir arama tekniğidir. Süreç bireylerin kodlanması ile başlar. Her bir birey için çözümün kalitesini belirten uyum değeri hesaplanır. Başlangıç popülasyon, popülasyon büyüklüğü kadar rassal bireyin türetilmesiyle elde edilir. Durma ölçütü belirlenir ve bu noktadan sonra

evrim süreci başlar. Diğer deyişle, genetik operatörler uygulanır. Seçim, popülasyondaki uyum değerlerine bağlı olarak ebeveynlere karar verilmesidir. Daha yüksek uyum değerine sahip bireylerin şansı yüksektir. Çaprazlama ve mutasyon operatörleri seçilen ebeveynlere uygulanarak yeni nesiller türetilir. Bir bireye çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin uygulanması çaprazlama ve mutasyon olasılıklarına bağlıdır. Bu işlemler sonrası seçilen bireyler, yeni popülasyonu oluşturur. Durma ölçütü sağlanmışsa, tüm popülasyonlar içindeki en iyi uyum değerine sahip çözüm en iyi sonuçtur, ancak sonucun bütünsel en iyi olması garanti edilemez.

GA'ya ilişkin akış şemasına Şekil 3.3'te yer verilmiştir. Durma ölçütü sağlanıp, tatmin edici bir çözüme ulaşıncaya kadar GA adımları uygulanmaya devam edilir.



Şekil 3.3. Genetik algoritma akış şeması

Problemin bir kromozom şeklinde temsil edilmesi ve uygun parametrelerin belirlenmesi, eldeki probleme bağlı olmaktadır. Her problem için geçerli olabilecek evrensel

bir GA henüz kurulamamıştır. Bu nedenle her problem tipi için ayrı bir kromozom tasarımı gerçekleştirilmesi ve problem parametrelerinin deneysel olarak belirlenmesi gerekmektedir (Grefenstette, 1986).

### 3.3.1 Problemin kromozom gösterimi

GA'da dizi seçimi, ilk ve en önemli basamaktır ve iyi ifade edilmiş diziler ile algoritma çözüm hızı ve kalitesi bakımından üstün sonuçlar üretebilecektir. Literatürde, EATÇP ve hücre oluşturma probleminin ayrı çözümleri için geliştirilmiş pek çok kromozom gösterimi mevcuttur (Rafiei vd., 2016).

Bu bölümde, problem için geliştirilen GA açıklanacak ve elde edilen sonuçlar ile yöntemin başarısı ortaya konulacaktır. Ele alınan hücre oluşturma ve EATÇP'nin bütünsel çözümü için geliştirilen kromozom gösterimi, Şekil 3.4'te de gösterildiği gibi; hücreye atama, makineye atama ve işlem sıralama olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır.

| hücreye atama |    |    |    |    | makineye atama |    |    |       |     |     |     | işlem sıralama |    |     |       |     |     |     |    |
|---------------|----|----|----|----|----------------|----|----|-------|-----|-----|-----|----------------|----|-----|-------|-----|-----|-----|----|
| makine        |    |    |    |    | parça          |    |    | işlem |     |     |     |                |    |     | işlem |     |     |     |    |
| M1            | M2 | M3 | M4 | M5 | P1             | P2 | P3 | O11   | O12 | O13 | O21 | O22            | .. | O11 | O12   | O13 | O21 | O22 | .. |

Şekil 3.4. Kromozom gösterimi

Kromozomun ilk bölümü olan hücreye atama kısmının boyutu, parça ve makine sayısı toplamı kadardır. Dizi içerisindeki her bir değer parça ve makinelerin atanacağı hücre indisini göstermektedir. İkinci bölümü oluşturan makine atama kısmının boyutu toplam işlem sayısı kadardır. Dizi içerisindeki her bir değer, ilgili işlem için makine seçeneği indisini göstermektedir. Dizi soldan sağa sıralı olarak işlemleri ifade etmektedir. Üçüncü kısım olan işlem sıralamada ise dizi boyutu makine atama kısmında olduğu gibi toplam işlem sayısı kadardır ve soldan sağa sıralı olarak işlemleri ifade etmektedir. Bu kısım işlemlerin, Gantt şeması üzerinde yerleşim sırasını göstermektedir. Sonuç olarak kromozom boyutu; parça sayısı + makine sayısı + 2 \* toplam işlem sayısı şeklinde hesaplanmaktadır. Geliştirilen kromozom birinci bölümde yer alan sayısal örnek üzerinde gösterilmiştir. Problemden, 5 makinede 3 parçanın farklı sayıda işlemleri mevcut olup, oluşturulacak hücre sayısı da 3

olarak seçilmiştir. Gösterim, problem için GAMS 24.2.1 yazılımı ile elde edilen en iyi sonuçlar üzerinden yapılmıştır.

Kromozomun ilk parçasını oluşturan hücreye atama kısmına Şekil 3.5'de yer verilmiştir. Bu kısımda, her bir makine ve parça için bir gen tariflenmiştir. Bu genler 0 ve 1 arasında değerler almaktadır. İlgili aralık hücre sayısı kadar parçaya ayrılır ve genin isabet ettiği aralık makine ve parçaların atandığı hücreleri gösterir. Türetilen rassal sayı, söz konusu 3 hücreli problem için,  $[0; 0,33)$  aralığında ise parça veya makinenin birinci hücreye,  $[0,33; 0,66)$  aralığında ise ikinci hücreye ve daha büyük ise üçüncü hücreye atanacağını göstermektedir.

| makine |     |     |     |     | parça |     |     |
|--------|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-----|
| M1     | M2  | M3  | M4  | M5  | P1    | P2  | P3  |
| 0.2    | 0.1 | 0.9 | 0.6 | 0.5 | 0.2   | 0.8 | 0.5 |

Şekil 3.5. Hücreye atama kısmı (rassal değerlerle gösterim)

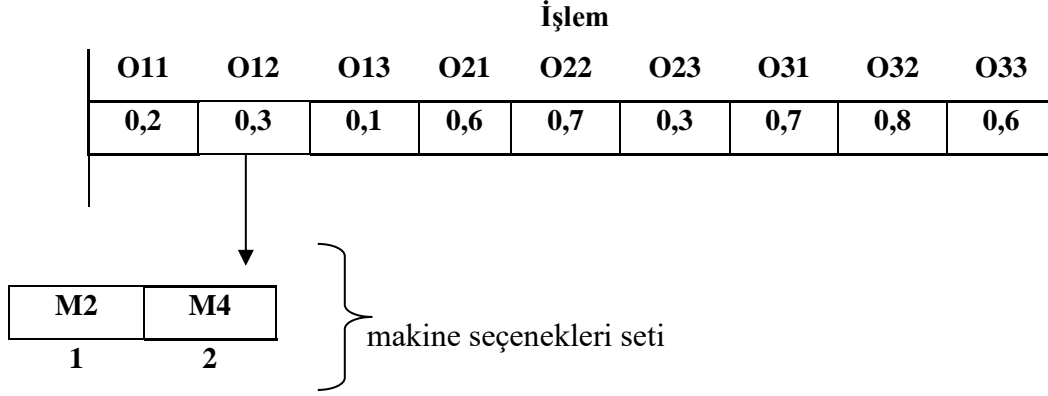
Makine ve parçaların hücrelere atanma sonuçları Şekil 3.6'da gösterilmiş olup, birinci ve ikinci makineler birinci hücreye, dördüncü ve beşinci makineler ikinci hücreye, üçüncü makine de üçüncü hücreye atanmaktadır. Benzer şekilde, birinci parçanın birinci hücreye, ikinci parçanın üçüncü ve ikinci parçanın da üçüncü hücreye ataması yapılmıştır.

| makine |    |    |    |    | parça |    |    |
|--------|----|----|----|----|-------|----|----|
| M1     | M2 | M3 | M4 | M5 | P1    | P2 | P3 |
| 1      | 1  | 3  | 2  | 2  | 1     | 3  | 2  |

Şekil 3.6. Hücreye atama kısmı (gerçek değerlerle gösterim)

Kromozomun ikinci parçası, işlemlerin makinelere atanmasını göstermektedir ve gösterime Şekil 3.7'de yer verilmiştir. Bu kısımda, her bir işlem için bir gen tariflenmiştir. Bu genler 0 ve 1 arasında değerler almaktadır. İlgili aralık o işlemin gerçekleşebileceği makine seçeneği sayısı kadar parçaya ayrılır ve genin isabet ettiği aralık işlemin atandığı makine seçeneğini gösterir. Örnek olarak, birinci işin ikinci işlemi için ikinci ve dördüncü makineler olmak üzere iki makine seçeneği mevcuttur. Dolayısıyla türetilen rassal sayı,  $[0; 0,5)$  aralığında ise işlem ilk indisli ikinci makinede,  $[0,5; 1]$  aralığında ise ikinci indisli dördüncü makinede gerçekleştirilecektir.





Şekil 3.7. Makineye atama kısmı (rassal değerlerle gösterim)

İşlemlerin makinelere atanma gerçek değerli sonuçlarına Şekil 3.8’de yer verilmiştir. Örnek olarak, ikinci makinede, birinci parçanın ikinci işlemi ve üçüncü parçanın birinci işlemi gerçekleşecektir.

| işlem |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| O11   | O12 | O13 | O21 | O22 | O23 | O31 | O32 | O33 |
| 1     | 2   | 4   | 3   | 3   | 3   | 2   | 4   | 5   |

Şekil 3.8. Makineye atama kısmı (gerçek değerlerle gösterim)

Son kısım olan işlem sıralamaya Şekil 3.9’da yer verilmiş olup, boyutu toplam işlem sayısı kadardır. Bu kısım, işlemlerin gantt şeması üzerinde yerleşim sırasını gösterir. Her bir makinede yer alan işlemler için karşı gelen rassal sayılar küçükten büyüğe sıralanarak ve her bir parçanın ilk işleminin önce yapılması sağlanarak sıralama yapılmaktadır. Makinelere yapılan atamalar sonrası, Şekil 3.7’nin sonuçlarından da görüldüğü gibi her bir makinede hangi işlemlerin gerçekleşeceği belirlenmiş olacaktır. İlgili her bir makine için, türetilen rassal sayılar küçükten büyüğe sıralandığında, işlemlerin ilgili makinede işlenme sırası elde edilmektedir.

| O11 | O12 | O13 | O21 | O22 | O23 | O31 | O32 | O33 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0,2 | 0,9 | 0,6 | 0,4 | 0,5 | 0,8 | 0,1 | 0,4 | 0,9 |
| M1  | M2  | M4  | M3  | M3  | M3  | M2  | M4  | M5  |

Şekil 3.9. İşlem sıralama kısmı (rassal değerlerle gösterim)

Şekil 3.10’da her bir makinede gerçekleştirilecek işlemler ve ilgili makinedeki işlenme sıraları gösterilmektedir. Sonuçlar, Şekil 3.9’de karşı gelen rassal sayıların

sıralanması ile elde edilmiştir. Örnek olarak, üçüncü makinede ilk sırada üçüncü parçanın birinci işlemi ve ikinci sırada birinci parçanın ikinci işlemi gerçekleşecektir.

| O11 | O12 | O13 | O21 | O22 | O23 | O31 | O32 | O33 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1   | 2   | 2   | 1   | 2   | 3   | 1   | 1   | 1   |
| M1  | M2  | M4  | M3  | M3  | M3  | M2  | M4  | M5  |

Şekil 3.10. İşlem sıralama kısmı (gerçek değerlerle gösterim)

### 3.3.2 Uyum fonksiyonu, seçim ve genetik operatörler

Problemin uyum değeri üç parçadan oluşmaktadır. İlki, parçaların hücre dışı elemanlar, ikincisi hücre içi boşluklar ve üçüncüsü son işin tamamlanma zamanıdır. Hücre dışı elemanlara ilişkin, parçanın atandığı hücrede gerçekleştirilemeyen işlerinin toplamı dikkate alınırken, hücre içi boşluklar ilgili hücrede makinelerin işlemediği parçalar aracılığı ile hesaplanmakta olup, son işin tamamlanma zamanının hesaplanmasına ilişkin ise geliştirilen algoritma adımları uygulanmıştır. Şekil 3.11. ve Şekil 3.12'deki matrisler ile izleyen algoritma adımları dikkate alınarak iş çizelgesi oluşturulmasını sağlamaktadır.

|    |         |         |     |
|----|---------|---------|-----|
| M1 | (M1,S1) | (M1,S2) |     |
| M2 | (M2,S1) | (M2,S2) |     |
| M3 | (M3,S1) | ...     |     |
| M4 | (M4,S1) |         |     |
| M5 | (M5,S1) |         | ... |
|    | S1      | S2      | S3  |

(a)

|    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|
| M1 | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| M2 | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| M3 | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| M4 | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| M5 | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
|    | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 |

(b)

|    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|
| P1 | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| P2 | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| P3 | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
|    | O1 | O2 | O3 | O4 | O5 |

(c)

Şekil 3.11. (a) Çizelge Matrisi (b) Başlangıç makine belirteci (MB)  
(c) Başlangıç parça belirteci (PB)

|     |     |
|-----|-----|
| M1  | 0   |
| M2  | 0   |
| M3  | 0   |
| M4  | 0   |
| M5  | 0   |
| ... | ... |

|     |     |
|-----|-----|
| P1  | 0   |
| P2  | 0   |
| P3  | 0   |
| ... | ... |

(a)                      (b)

Şekil 3.12. (a) Başlangıç makine uygunluk anı (b) Başlangıç parça uygunluk anı

Böylelikle, işlerin başlangıç ve bitiş zamanları, işler arasındaki boş beklemler, gecikmeler ve tamamlanma zamanları gibi göstergeler tespit edilerek, amaç fonksiyonun işlem çizelgesi ile ilgili parçası hesaplanmıştır.

#### En Büyük Tamamlanma Zamanı Hesaplaması için Geliştirilen Algoritma:

*Adım 1.* Kromozom seç.

*Adım 2.* Toplam işlem sayısı ( $n_{toplam}$ ), sayaç\_1 ve sayaç\_2 belirle. Şekil 3.11(a)'daki makine sıra matrisini oluştur. Satır sayısı ( $i$ ): toplam makine sayısı, Sütun sayısı ( $j$ ): enb  $\{i$ . makineye atanan işlem sayısı}

*Adım 3.* Şekil 3.11 (a)'daki çizelge matrisinde sırayla tüm hücreleri taramaya başla ( $\{M_i, S_j\}$ ,  $\forall i, j$ ). Şekil 3.11 (b)'de sıra atamasını kontrol et. Atama varsa Adım 4'e git. Atama yoksa,  $i$ 'yi bir arttır ve Adım 3'e dön.

*Adım 4.* Şekil 3.11 (c)'de matriste atama varsa ilgili parça işlemini  $\{P_k, O_l\}$  bul. Seçilen kromozomdan alınan (parça, operasyon) çifti atamasının  $\{M_i, S_j\}$  için uygunluğunu ve makine uygunluğunu kontrol et. Her bir iterasyonda bu değerleri güncelle.

İlgili adımda, makine sözü geçen işlemin atanması için uygun mu, yanı sıra parçanın ilgili işlemini yapılmak için uygun mu, diğer ifadeyle önceliği olan işler tamamlanmış mı kontrol et. Şekil 3.11 (b)'de, başlangıçta ilk sütundaki "1"ler tüm

makinelerin ilk sırasının işlem atanması için ilk anda uygun olduğunu ifade etmektedir. İlk sıraya olurlu bir atama yapıldıktan sonra, ilgili makinede ilk sıra “0” değerini alır ve ikinci sıra “1” değerini alır. Böylece, artık ikinci sıraya atama yapılabileceği anlamına gelir. Şekil 3.11 (c)’deki “1”ler ise, her bir parçanın ilk işleminin ilk anda gerçekleştirilebilir olduğunu göstermektedir. Bu kısım, parçanın işlemleri arasındaki öncelik ilişkilerini korur. Yapılan atama ile ilk sıradaki işlem atanmış ise, matrisin ilgili hücresi “0” değerini alır ve bir sonraki işlem “1” değeri ile güncellenir.

Uygunluklar sağlanıyorsa Adım 5’e, sağlanmıyorsa Adım 3’e git.

*Adım 5.* Kabul gören işler için Şekil 3.12 (a) ve (b)’de ifade edilen ilgili makine ve parça için süre değerleri güncelle. Sayac 2’yi bir arttır.  $i=i_{enb}$  ve  $j=j_{enb}$  ise Adım 6’ya, değilse Adım 3’e git.

Şekil 3.12 (a) ve (b), süre değerlerinin her arttırmada güncellenmesi için yararlanılan yardımcı matrislerdir. Her bir atanmış iş sonrasında,  $\{P_k, O_l\}$  için makinenin atama yönlü uygun olup olmadığını (makineye atanmış olan bir önceki sıradaki iş tamamlandı mı kontrolü) ve parçanın işlem önceliği yönlü önceki işlemlerinin tamamlanıp tamamlanmadığı kontrol et. Atanan bir işlemin tamamlanma zamanını ilgili makinede bir önceki sıradaki işin tamamlanma zamanı ve tüm makinelerde bir önceki parça işleminin tamamlanma zamanından büyük olanı seçmek üzere  $T_{i,j} = E_{nb}$  {ilgili makinenin uygunluk anı, parçanın uygunluk anı} hesapla.

*Adım 6.* Durma kriterini kontrol et. Sayac\_2 toplam işlem sayısına eşit ise Adım 7’ye git. Değilse, Sayac\_1 toplam işlem sayısına eşit ise Adım 8’ git, değilse Adım 3’e git.

*Adım 7.* En büyük tamamlanma zamanını ( $C_{enb}$ ) hesapla.  $C_{enb}$ , 3.12 (a) matrisinin en büyük elemanıdır.

*Adım 8.* Cezalı  $C_{enb}$  hesapla. Adım 7’deki  $C_{enb}$  hesaplamasına ek olarak, süre ceza değeri eklenir.

*Adım 9.* Tüm işlemler tamamlandığında dur.

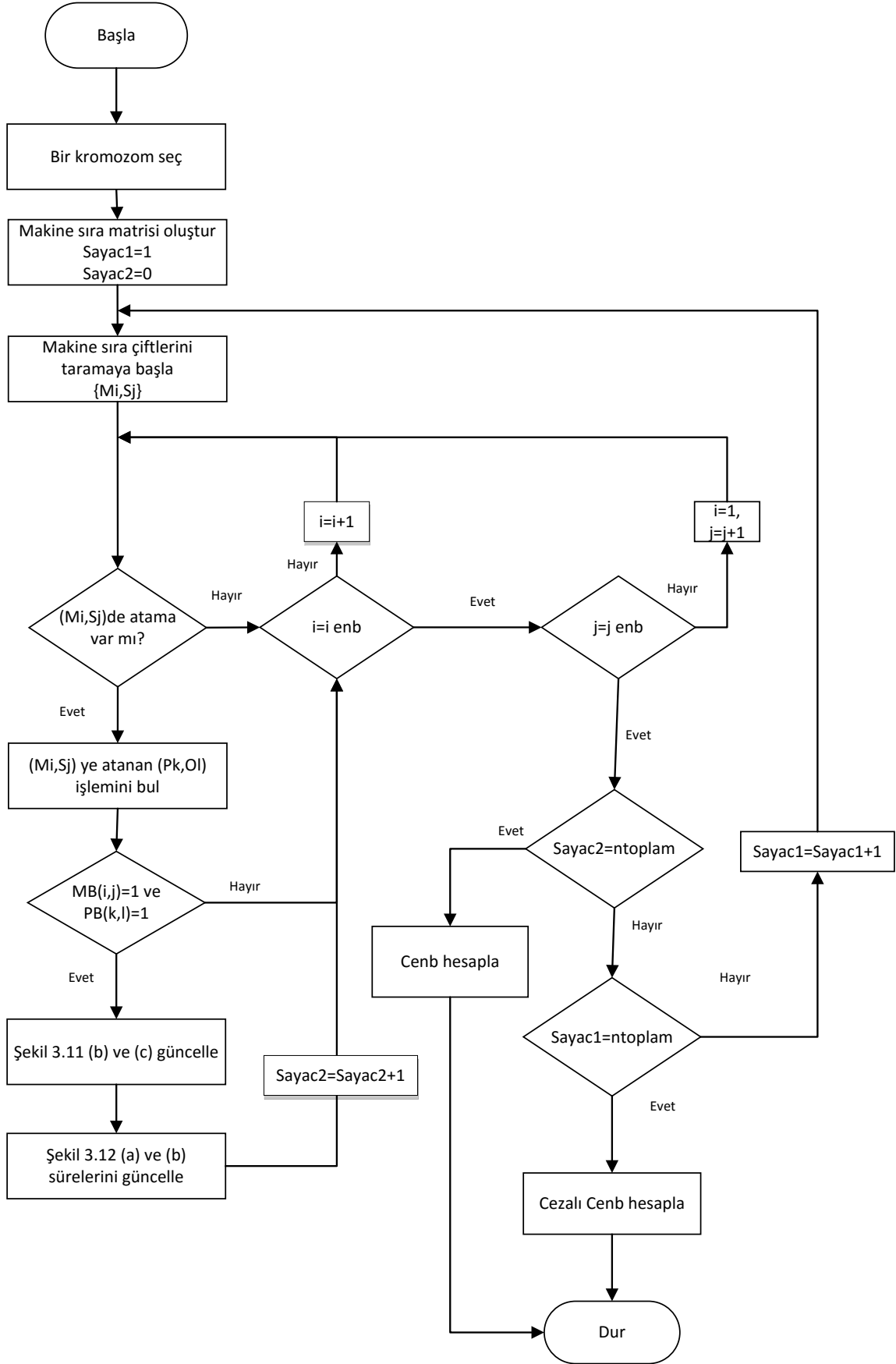
Geliştirilen algoritmaya ilişkin program akış diyagramına Şekil 3.13'te yer verilmiştir.

Matematiksel modelin amaç fonksiyonu değeri, GA'nın uyum değeri olarak atanmış olup, çözüm kalitesinin bir göstergesidir. Popülasyondaki aday çözümlerin kalitesini dikkate almak adına, amaç fonksiyonu ve kısıtlar birlikte değerlendirilmiştir. Parçalar için işlem öncelikleri kısıtlarının sağlanamaması durumu ceza olarak uyum değerine yansıtılmıştır. Uyum değerinin hesaplanmasına ilişkin bileşenler izleyen şekildedir:

$$Uyum\ fonksiyonu = \sum HDE + \sum HİB + C_{enb} + \sum ceza$$

$$\sum ceza = \varepsilon_1 * \sum parça\_ceza + \varepsilon_2 * \sum makine\_ceza + \varepsilon_3 * \sum süre\_ceza$$

Ceza hesabında,  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  ve  $\varepsilon_3$  katsayıları problem boyutuna ve amaç fonksiyonu değerinin büyüklüğüne göre değişkenlik gösterir. Örnek olarak, küçük boyutlu problemlerde “500”, büyük boyutlu problemlerde “2000” olarak varsayılmıştır. Makine ve parçaya ilişkin de bazı kısıtları bozacak durumlar oluşabilir. Örneğin, her hücreye en az bir makine atanmadığı her bir durum için makine cezası, en az bir parça atanmaması durumunda parça cezası ortaya çıkmaktadır. Tamamlanma zamanının hesaplanmasına ilişkin oluşabilecek ceza durumuna, geliştirilen algoritma içerisinde yer verilmiştir. Diğer kısıtlar, geliştirilen kromozom yapısı ile sağlanmış durumdadır.



Şekil 3.13. Problemin çözümü için geliştirilen program akış diyagramı

Ele alınan çalışmada, kromozom yapısı  $(0,1]$  rassal değerlerden oluşturulmuştur. Makine parça atamaları ve sıralamalarını temsil eden bu rassal değerler ile, çaprazlama ve mutasyon sonucu olursuz çözüm elde edilme olasılığı ortadan kaldırılmıştır.

Bu çalışmada, farklı seçim yöntemleri kullanılmıştır. Seçim yöntemlerine ilişkin detaylı bilgi izleyen şekildedir:

Turnuva seçim yönteminde, iki ya da daha fazla birey turnuva oynamak üzere rassal olarak seçilir. Sonrasında, bireylerin uyum fonksiyonu değerleri karşılaştırılır ve en iyi uyum değerine sahip birey yeni nesle aktarılır (Gopalakrishnan ve Kosanovic, 2015).

Rulet seçiminde, her bir kromozomun uyum gücü hesaplanır. Bu güçle orantılı bir seçilme şansı verilir. Bu şansın, bireylere bir rulet çarkı üzerinde ayrılacak dilimlerin genişlikleriyle orantılı olacağı düşünülebilir. Bir ilk hareket vererek döndürülen çarkın, durduğunda geniş dilimlerinin sabit bir işaretin karşısına gelme olasılığı daha yüksektir. Bilgisayar ortamında, kavramca bu çarka benzeyen bir model kurulur. Burada türetilen rassal sayılar işaretin önünde duran noktaya karşı gelmekte, geniş sayı aralıklarıyla temsil edilen geniş dilimlere (başarılı bireylere) daha yüksek seçilme şansı tanınmaktadır (Austin, 1989).

Stokastik seçim yönteminde, ebeveynler bir doğru üzerinde ölçekleriyle orantılı olarak bir paya sahip olurlar. Sonra, algoritmaya göre doğru üzerinde belirlenmiş bir boyutta adım adım ilerlenir. Her adımda varılan ebeveyn seçilir. İlk nokta için üniform rassal sayı ile adım büyüklüğünden küçük bir değer belirlenir.

Çaprazlama ve mutasyon, GA'da iki temel operatördür ve GA'nın performansı temelde bu operatörlerin seçimine bağlıdır. Çaprazlama operatörü, ebeveyn kromozomlarından genler seçer ve her bir ebeveynin özelliklerini ekleyerek yeni bir çocuk kromozom oluşturur.

Tek nokta çaprazlama operatöründe, rassal olarak iki ebeveyn kromozom seçilir. Her bir çift kromozom için 1 ile kromozom uzunluğu arasında rassal bir  $k$  pozisyonu seçilir. Yeni oluşacak genler,  $k+1$  ve kromozom uzunluğu  $l$ 'nin arasındaki genlerin yer değiştirilmesiyle

oluşturulur. Tek nokta çaprazlamaya ilişkin bir gösterim, ( $l=20$ ,  $k=13$ ) Şekil 3.14'te yer almaktadır.

| Hücreye atama |     |     |       |     | Makineye atama |     |     |     |     | İşlem sıralama |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---------------|-----|-----|-------|-----|----------------|-----|-----|-----|-----|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Makine        |     |     | Parça |     | İşlem          |     |     |     |     | İşlem          |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 0.6           | 0.4 | 0.1 | 0.8   | 0.7 | 0.2            | 0.3 | 0.8 | 0.5 | 0.1 | 0.8            | 0.2 | 0.3 | 0.1 | 0.7 | 0.8 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.2 |
| Ebeveyn-1     |     |     |       |     |                |     |     |     |     |                |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 0.1           | 0.5 | 0.4 | 0.2   | 0.5 | 0.2            | 0.4 | 0.8 | 0.6 | 0.3 | 0.9            | 0.8 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.5 | 0.2 | 0.4 | 0.9 | 0.8 |
| Ebeveyn-2     |     |     |       |     |                |     |     |     |     |                |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 0.6           | 0.4 | 0.1 | 0.8   | 0.7 | 0.2            | 0.3 | 0.8 | 0.5 | 0.1 | 0.8            | 0.2 | 0.3 | 0.2 | 0.4 | 0.5 | 0.2 | 0.4 | 0.9 | 0.8 |
| Çocuk-1       |     |     |       |     |                |     |     |     |     |                |     |     |     |     |     |     |     |     |     |

Şekil 3.14. Önerilen kromozom yapısı için tek nokta çaprazlama gösterimi

İki nokta çaprazlama tekniğinde tek noktadan farklı olarak, bir yerine iki kesme noktası belirlenir. İki nokta çaprazlama gösterimine ilişkin bir örneğe Şekil 3.15'de yer verilmiştir.

| Hücreye atama |     |     |       |     | Makineye atama |     |     |     |     | İşlem sıralama |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---------------|-----|-----|-------|-----|----------------|-----|-----|-----|-----|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Makine        |     |     | Parça |     | İşlem          |     |     |     |     | İşlem          |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 0.6           | 0.4 | 0.1 | 0.8   | 0.7 | 0.2            | 0.3 | 0.8 | 0.5 | 0.1 | 0.8            | 0.2 | 0.3 | 0.1 | 0.7 | 0.8 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.2 |
| Ebeveyn-1     |     |     |       |     |                |     |     |     |     |                |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 0.1           | 0.5 | 0.4 | 0.2   | 0.5 | 0.2            | 0.4 | 0.8 | 0.6 | 0.3 | 0.9            | 0.8 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.5 | 0.2 | 0.4 | 0.9 | 0.8 |
| Ebeveyn-2     |     |     |       |     |                |     |     |     |     |                |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 0.6           | 0.4 | 0.1 | 0.8   | 0.7 | 0.2            | 0.4 | 0.8 | 0.6 | 0.3 | 0.8            | 0.2 | 0.3 | 0.1 | 0.7 | 0.8 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.2 |
| Çocuk-1       |     |     |       |     |                |     |     |     |     |                |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 0.1           | 0.5 | 0.4 | 0.2   | 0.5 | 0.2            | 0.3 | 0.8 | 0.5 | 0.1 | 0.9            | 0.8 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.5 | 0.2 | 0.4 | 0.9 | 0.8 |
| Çocuk-2       |     |     |       |     |                |     |     |     |     |                |     |     |     |     |     |     |     |     |     |

Şekil 3.15. Önerilen kromozom yapısı için iki nokta çaprazlama gösterimi

Dağıtık çaprazlama operatöründe, iki birey rasgele seçilir. Sonrasında, bireylere eşit uzunlukta rassal bir 0-1 vektörü oluşturulur. Vektör değeri "1" ise çocuk birinci ebeveyninden, "0" ise ikinci ebeveyninden değer alarak çocuk kromozomu oluşturur. Örnek bir gösterim Şekil 3.16'da sunulmuştur.



| Hücreye atama |     |     |       |     | Makineye atama |     |     |     |     | İşlem sıralama |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---------------|-----|-----|-------|-----|----------------|-----|-----|-----|-----|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Makine        |     |     | Parça |     | İşlem          |     |     |     |     | İşlem          |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 0.6           | 0.4 | 0.1 | 0.8   | 0.7 | 0.2            | 0.3 | 0.8 | 0.5 | 0.1 | 0.8            | 0.2 | 0.3 | 0.1 | 0.7 | 0.8 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.2 |
| Ebeveyn-1     |     |     |       |     |                |     |     |     |     |                |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 0.1           | 0.5 | 0.4 | 0.2   | 0.5 | 0.2            | 0.4 | 0.8 | 0.6 | 0.3 | 0.9            | 0.8 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.5 | 0.2 | 0.4 | 0.9 | 0.8 |
| Ebeveyn-2     |     |     |       |     |                |     |     |     |     |                |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 1             | 1   | 0   | 1     | 0   | 0              | 1   | 1   | 1   | 0   | 0              | 1   | 0   | 1   | 0   | 0   | 1   | 1   | 0   | 1   |
| Vektör        |     |     |       |     |                |     |     |     |     |                |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 0.6           | 0.4 | 0.4 | 0.8   | 0.5 | 0.2            | 0.3 | 0.8 | 0.5 | 0.3 | 0.9            | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.4 | 0.5 | 0.1 | 0.2 | 0.9 | 0.2 |
| Çocuk         |     |     |       |     |                |     |     |     |     |                |     |     |     |     |     |     |     |     |     |

Şekil 3.16. Önerilen kromozom yapısı için dağıtık çaprazlama gösterimi

Mutasyon operatörü, yeni nesle yeni bilgiler eklemek için kullanılır. Bu çalışmada, “adaptive feasible mutation” kullanılmıştır (Chakraborty ve Hasin, 2013). Elitizm stratejisi ile, mevcut neslin en başarılı bireylerinin doğrudan bir sonraki nesle aktarılması sağlanarak seçim aşamasında elenmesi engellenmektedir. Elit birey sayısı, popülasyonun yüzde 5’i oranında seçilmiştir.

### 3.3.3 Parametre tasarımı

Bu bölümde, önerilen meta-sezgiselin performansı üzerinde araştırmalar yapılmıştır. GA’nın etkinliği öncelikle GA parametrelerinin seçimine bağlıdır. Parametrelerin seçimi için geçmiş literatürden yararlanmak çoğu zaman yetersizdir. Ek olarak, parametre seçiminde geleneksel deneme yanılma yöntemlerini kullanmak uzun zaman alır ve çoğu kez en iyi sonucu vermez. Bu sebeplerle, uygun parametrelerin seçimi için deney tasarımı tekniklerinden yararlanılmıştır. En bilinenlerinden biri Taguchi yöntemidir. Taguchi yönteminin çok sayıda endüstriyel süreçte iyileştirme ve optimizasyon amaçlı kullanıldığı bilinmektedir (Yang ve Tarng, 1998; Ghani vd., 2004; Camposeco-Negrete, 2013; Azad vd., 2016). Yanı sıra, özellikle son yıllarda tekniğin meta-sezgisel algoritmalarda parametre tahmininde kullanıldığı çalışmalara rastlanmaktadır (Dhingra vd., 2014; Candan ve Yazgan, 2015; Shahnaghi vd., 2016).

Bu çalışmada, Taguchi eniyileme tekniği kullanılarak, yöntemin performansını eniyileyecek parametreler üzerinde araştırma yapılmış ve sonrasında uygun düzeyleri belirlenmiştir. Geliştirilen GA metasezgiseli için parametre eniyilemesini gerçekleştirme adına önerilen yaklaşım izleyen adımlardan oluşmaktadır:

---

Adım 1: Parametre eklentileri ile veri setinin türetilmesi.

Adım 2: Taguchi eniyileme yönteminin uygulanması

- 2.1. GA parametrelerinin ve düzeylerinin belirlenmesi
- 2.2. Uygun ortogonal dizinin belirlenmesi ve faktörlerin uygun sütunlara atanması
- 2.3. Deney planına göre deneylerin gerçekleştirilmesi
- 2.4. Sonuçları analiz edilmesi
- 2.5. Her bir problem seti için uygun parametre setinin ve düzeylerin belirlenmesi

Adım 3: Literatürde mevcut test problemleri ile kıyaslanması.

---

Taguchi tekniği, tasarım parametrelerini eniyilemek için sıklıkla yararlanılan tekniklerdendir. Ortogonal dizi kavramına dayanan teknik, deney sonuçları arasındaki varyansı azaltarak, parametrelerin en iyi düzeylerinin seçimini araştırmaktadır. Bu yöntem ile, doğru seçilmiş düzey gruplarıyla ifade edilen deneyler ile, toplam deney sayısı azaltılabilmektedir. Veri analizi ve en iyi çözümün araştırılması hedeflenmektedir. Önemli bir kavram S/N (sinyal gürültü oranı), ortalamanın (sinyal) standart sapmaya (gürültü) oranını ifade etmektedir. Böylece, kalite karakteristiğinin istenen değerden sapması araştırılabilmektedir. Bu oran, kalite karakteristiğinin çeşidine göre farklılaşmıştır. Genel olarak, en küçük en iyi, hedef değer en iyi ve en büyük en iyi olmak üzere üç gruba ayrılmıştır. Eşitlik (3.1) ve (3.2)'de (n: gözlem sayısı, y: gözlem değeri) sırasıyla, en küçük en iyi ve en büyük en iyi amaçlarını dikkate alan formülasyonlara yer verilmiştir (Ross, 1988).

$$\text{En küçük en iyi, } S/N \text{ oranı} = -10 \log \left( \frac{1}{N} \sum y^2 \right) \quad (3.1)$$

$$\text{En büyük en iyi, } S/N \text{ oranı} = -10 \log \left( \frac{1}{N} \sum \frac{1}{y^2} \right) \quad (3.2)$$

### 3.3.4 Genetik algoritma parametrelerinin ve düzeylerinin belirlenmesi

Geliştirilen GA metasezgiselinin Taguchi deney tasarımı yaklaşımı ile parametrelerini eniyilemek üzere MINITAB 16.1.1 yazılımı kullanılmıştır. GA parametrelerinin (popülasyon büyüklüğü, seçim operatörü, çaprazlama ve mutasyon tipleri ve olasılıkları vs.) en iyi düzeylerine karar vermek için etkili faktörler seçilmiştir. Bu çalışmada, GA parametrelerini en iyilemek üzere Taguchi tekniği kullanılmıştır. Ön denemeler ve literatürdeki benzer sınıftaki problemlerde kullanılan parametre düzeylerinden hareketle faktörler için uygun düzeylere Çizelge 3.15'te yer verilmiştir.

Çizelge 3.15. Seçilen GA faktör ve düzeyleri

| Faktörler                     | Düzeyler                   |                            |         |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|---------|
|                               | 1                          | 2                          | 3       |
| <b>A</b> Popülasyon büyüklüğü | 30 (küçük)<br>2000 (büyük) | 50 (küçük)<br>3000 (büyük) |         |
| <b>B</b> Çaprazlama operatörü | Tek nokta                  | İki nokta                  | Dağıtık |
| <b>C</b> Mutasyon olasılığı   | 0,05                       | 0,10                       | 0,15    |
| <b>D</b> Çaprazlama olasılığı | 0,7                        | 0,8                        | 0,9     |
| <b>E</b> Seçim operatörü      | Rulet                      | Stokastik                  | Turnuva |

Seçilen tasarımda, 2 düzeyli 1 ve 3 düzeyli 4 faktör yer almakta olup, L18 ortogonal deney tasarımı planı kullanılmıştır. Analizler MINITAB 16.1.1 yazılımı aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Her bir deney için yanıt değerler, iki tekrarın ortalaması olarak dikkate alınmıştır. Dolayısıyla, her bir test problemi için  $18 \times 2 = 36$  adet deney dikkate alınır. Toplamda, 30 test problemi için 1080 adet deney gerçekleştirilmiştir. Deney tasarımı planı Çizelge 3.16'da gösterilmektedir.

Çizelge 3.16. L18 Taguchi deney tasarımı planı (küçük boyut)

| Deney No. | Popülasyon büyüklüğü (A) | Çaprazlama Operatörü (B) | Mutasyon olasılığı (C) | Çaprazlama olasılığı (D) | Seçim (E) |
|-----------|--------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|-----------|
| 1         | 30                       | teknokta                 | 0,05                   | 0,7                      | rulet     |
| 2         | 30                       | teknokta                 | 0,1                    | 0,8                      | stokastik |
| 3         | 30                       | teknokta                 | 0,15                   | 0,9                      | turnuva   |
| 4         | 30                       | ikinokta                 | 0,05                   | 0,7                      | stokastik |
| 5         | 30                       | ikinokta                 | 0,1                    | 0,8                      | turnuva   |
| 6         | 30                       | ikinokta                 | 0,15                   | 0,9                      | rulet     |
| 7         | 30                       | dagitik                  | 0,05                   | 0,8                      | rulet     |
| 8         | 30                       | dagitik                  | 0,1                    | 0,9                      | stokastik |
| 9         | 30                       | dagitik                  | 0,15                   | 0,7                      | turnuva   |
| 10        | 50                       | teknokta                 | 0,05                   | 0,9                      | turnuva   |
| 11        | 50                       | teknokta                 | 0,1                    | 0,7                      | rulet     |
| 12        | 50                       | teknokta                 | 0,15                   | 0,8                      | stokastik |
| 13        | 50                       | ikinokta                 | 0,05                   | 0,8                      | turnuva   |
| 14        | 50                       | ikinokta                 | 0,1                    | 0,9                      | rulet     |
| 15        | 50                       | ikinokta                 | 0,15                   | 0,7                      | stokastik |
| 16        | 50                       | dagitik                  | 0,05                   | 0,9                      | stokastik |
| 17        | 50                       | dagitik                  | 0,1                    | 0,7                      | turnuva   |
| 18        | 50                       | dagitik                  | 0,15                   | 0,8                      | rulet     |

Varyans analizi yanıtlar üzerinde etkili önemli parametlerin seçimi için kullanılan yaygın bir tekniktir. Örnek olarak varyans analizi sonuçlarına Çizelge 3.17'de yer verilmiştir.

Çizelge 3.17. Varyans analizi sonuç tablosu (SFJSCF\_7)

| Kaynak | sd | Adj SS  | Adj MS | F     | P     |
|--------|----|---------|--------|-------|-------|
| A      | 1  | 1,389   | 1,389  | 0,51  | 0,495 |
| B      | 2  | 125,444 | 62,722 | 23,04 | 0,000 |
| C      | 2  | 158,111 | 79,056 | 29,04 | 0,000 |
| D      | 2  | 34,778  | 17,389 | 6,39  | 0,022 |
| E      | 2  | 55,444  | 27,722 | 10,18 | 0,006 |
| Hata   | 8  | 21,778  | 2,722  |       |       |
| Toplam | 17 | 396,944 |        |       |       |

S=1,6499 R-sq=%94,51 R-Sq(adj)=%88,34

Süreç parametrelerinin varyanslarının oranı F değerini verir ve bu değer ilgili parametrenin performans karakteristiği üzerinde etkisi olup olmadığının bir göstergesidir. Tablo F değeri, % 5 anlam düzeyinde standart F tablo değeri (F 0,05) ile kıyaslanır. F test

değeri, bu değerden büyük ise süreç parametresinin performans karakteristiği üzerinde anlamlı derecede etkili olduğu söylenebilir. Diğer bir karşılaştırma ise  $p$  değeridir. Çoğunlukla  $p < 0,05$  olduğu durumda parametrenin anlamlı olduğu söylenebilir. Ele alınan çalışmada, popülasyon büyüklüğü dışındaki parametrelerin performans karakteristiğinde anlamlı düzeyde etkili olduğu söylenebilir.

Taguchi sinyal gürültü oranı ölçütünü kullanmaktadır. Performans ölçütü, ele alınan problem için en-küçük en-iyi şeklindedir. Problemden sinyal gürültü oranı (S/N), N her bir deneydeki gözlem sayısı ve  $Y_i$ , GA uyum fonksiyonu değeri olmak üzere,  $\frac{S}{N} = -10 \log \left( \frac{1}{N} \sum Y_i^2 \right)$  eşitliği ile hesaplanmaktadır.

Süreç parametrelerinin en iyi düzeyleri en yüksek sinyal gürültü oranı değerine bağlıdır. Sinyal gürültü oranı yanıt tablosu ve ortalamalar değerleri Çizelge 3.18’de verilmiştir.

Çizelge 3.18. Ortalamalar ve S/N için yanıt tablosu (SFJSCF\_7)

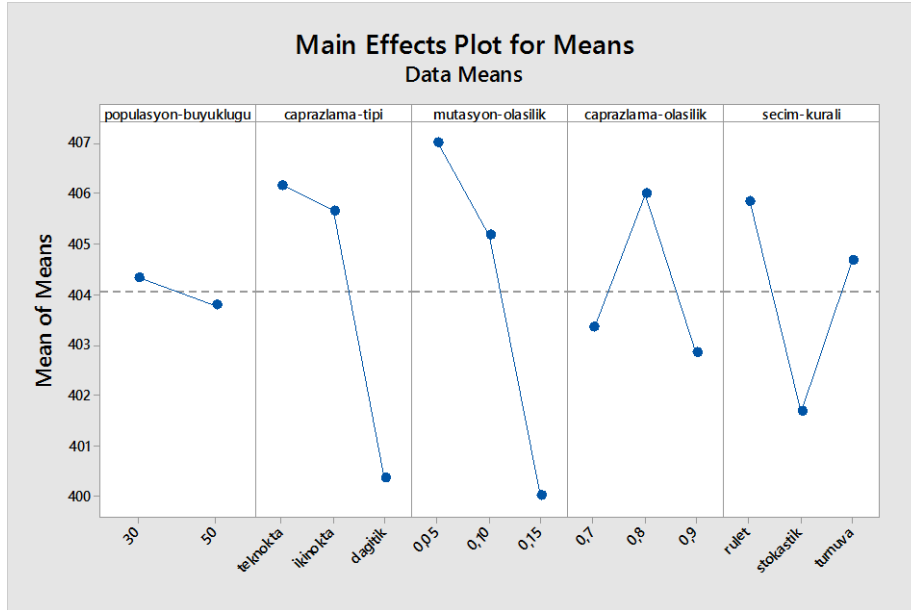
| Ortalamlar |              |              |              |              |              |
|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|            | A            | B            | C            | D            | E            |
| Düzye      |              |              |              |              |              |
| 1          | 404,3        | 406,2        | 407,0        | 403,3        | 405,8        |
| 2          | <b>403,8</b> | 405,7        | 405,2        | 406,0        | <b>401,7</b> |
| 3          |              | <b>400,3</b> | <b>400,0</b> | <b>402,8</b> | 404,7        |
| Delta      | 0,6          | 5,8          | 7,0          | 3,2          | 4,2          |
| Rank       | 5            | 2            | 1            | 4            | 3            |

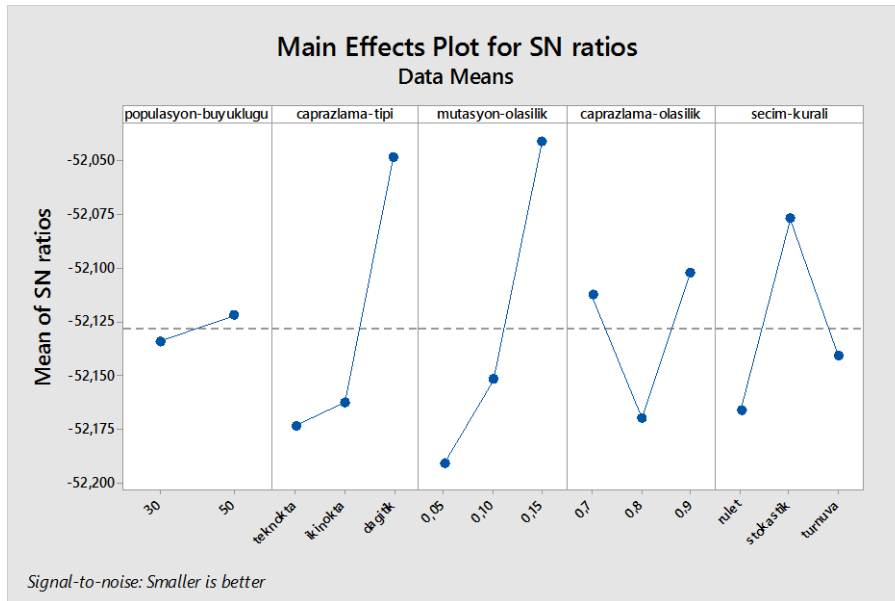
| S/N Oranı |               |               |               |               |               |
|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|           | A             | B             | C             | D             | E             |
| Düzye     |               |               |               |               |               |
| 1         | -52,13        | -52,17        | -52,19        | -52,11        | -52,17        |
| 2         | <b>-52,12</b> | -52,16        | -52,15        | -52,17        | <b>-52,08</b> |
| 3         |               | <b>-52,05</b> | <b>-52,04</b> | <b>-52,10</b> | -52,14        |
| Delta     | 0,01          | 0,13          | 0,15          | 0,07          | 0,09          |
| Rank      | 5             | 2             | 1             | 4             | 3             |

Sonuçlara ek olarak grafiksel olarak Şekil 3.17’de ortalamalar için ana etkiler grafiği ve Şekil 3.18’de ortalamalar için ana etkiler grafikleri ile gösterilmiştir. Uyum fonksiyonunun en iyi olduğu düzeyler; popülasyon büyüklüğünün ikinci düzeyde, çaprazlama operatörünün,

mutasyon olasılığının ve çaprazlama olasılığının üçüncü düzeylerinde ve seçim olasılığının ikinci düzeyde olduğu durumda elde edilebilmiştir.



Şekil 3.17. Ortalamalar için ana etkiler grafiği (SFJSCF\_7)



Şekil 3.18. S/N için ana etkiler grafiği (SFJSCF\_7)

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Mevcut test problemlerinde dikkate alınan, en büyük tamamlanma zamanının en küçüklenmesi çizelgeleme amacının yanı sıra, bu çalışmada en küçük hücre dışı eleman ve hücre içi boşlukların enküçüklenmesi de birer amaç fonksiyonu olarak ele alınmıştır.

Matematiksel model GAMS 24.3.1 programında kodlanmış ve test problemleri CPLEX çözücüsü ile çözdürülmüştür. Örnek GAMS koduna Ek açıklama B'de yer verilmiştir. GA ise, MATLAB R2012b programında kodlanmıştır. GA'nın performansı, matematiksel model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Örnek MATLAB koduna Ek açıklama C'de yer verilmiştir. Küçük boyutlu problemlerde, GAMS yazılımı bütünsel en iyi sonuçları elde edebilmiştir. Geliştirilen GA ile de yaklaşık aynı sürelerde bütünsel en iyi sonuçlara erişilebilmiştir. Çizelge 4.1'de küçük boyutlu, Çizelge 4.2'de büyük boyutlu test problemleri için parametre tasarımı sonucu seçilen en iyi düzeyler ve elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Büyük boyutlu problemlerde, problemin NP-zor yapıda olması sebebiyle, problemin çözümünün mümkün olduğu durumlarda bile çok uzun zaman gerektirmesi sebebiyle, matematiksel model için süre kısıtı konulmuştur. Seçilen süre literatürde çoğunlukla 3600 s. olmaktadır. Bu sebeple, matematiksel modelin makul sürede ya da sınırlı sürede (>3600 s) üretebildiği sonuçlar ile geliştirilen sezgisel yöntemin sonuçları ile türetilen test probleminin çizelgeleme amacına yönelik literatürde elde edilebilmiş tamamlanma zamanı yönlü en iyi değerlerine ve karşılaştırmalarına yer verilmiştir. Küçük boyutlu test problemleri için, makul sürede en iyi sonuca ulaşılabilmiştir. Orta/büyük boyutlarda da yöntem pek çok problemde makul sürede en iyi yakalanabilmiş, yanı sıra geçilebilmiştir.

$Z_{GA}$ , uygun parametre seviyelerine karşı gelen önerilen sezgisel yöntemin amaç fonksiyonunu,  $Z_{MM}$  geliştirilen matematiksel modelin makul ya da sınırlı süredeki global ya da yerel en iyi tamsayı sonuçlarını ifade etmektedir.  $\Delta(\%)$  ise, önerilen GA ve önerilen matematiksel model sonuçları arasındaki sapmayı ifade etmekte ve izleyen şekilde hesaplanmaktadır:

$$\Delta(\%) = 100x \frac{Z_{MM} - Z_{GA}}{Z_{MM}} \quad (4.1)$$

Çizelge 4.1. Türetilen test problemlerine ilişkin sonuçlar (küçük boyut)

| Problemler       | Önerilen Bütünleşik Yaklaşım   |     |                               |                 | Matematiksel Model |                               |                 |                  | Δ(%) GAP   | En iyi C <sub>enb</sub> |
|------------------|--|-----|-------------------------------|-----------------|--------------------|-------------------------------|-----------------|------------------|------------|-------------------------|
|                  | En iyi Düzeyler  | CPU | (C <sub>enb</sub> , HDE, HİB) | Z <sub>GA</sub> | CPU                | (C <sub>enb</sub> , HDE, HİB) | Z <sub>MM</sub> | C <sub>enb</sub> |            |                         |
| <b>SFJSCF_1</b>  | A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>3</sub> E <sub>3</sub> | 2.5 | <b>(66,0,0)</b>               | 66              | 0.25               | (66,0,0)                      | 66              | 0.0              | <b>66</b>  |                         |
| <b>SFJSCF_2</b>  | A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>2</sub> E <sub>3</sub> | 2.1 | <b>(107,0,0)</b>              | 107             | 0.09               | (107,0,0)                     | 107             | 0.0              | <b>107</b> |                         |
| <b>SFJSCF_3</b>  | A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>2</sub> E <sub>3</sub> | 2.9 | <b>(221,1,0)</b>              | 222             | 4.4                | (221,1,0)                     | 222             | 0.0              | <b>221</b> |                         |
| <b>SFJSCF_4</b>  | A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub> D <sub>2</sub> E <sub>3</sub> | 2.3 | <b>(355,1,0)</b>              | 356             | 3.4                | (355, 1, 0)                   | 356             | 0.0              | <b>355</b> |                         |
| <b>SFJSCF_5</b>  | A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>3</sub> E <sub>3</sub> | 2.8 | <b>(119, 3,0)</b>             | 122             | 16.0               | (119, 3, 0)                   | 122             | 0.0              | <b>119</b> |                         |
| <b>SFJSCF_6</b>  | A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>3</sub> E <sub>3</sub> | 2.5 | <b>(320,0,0)</b>              | 320             | 56.0               | (320, 0, 0)                   | 320             | 0.0              | <b>320</b> |                         |
| <b>SFJSCF_7</b>  | A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>3</sub> E <sub>2</sub> | 3.6 | <b>(397,1,0)</b>              | 398             | 5.0                | (397, 1, 0)                   | 398             | 0.0              | <b>397</b> |                         |
| <b>SFJSCF_8</b>  | A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub> D <sub>3</sub> E <sub>3</sub> | 3.4 | <b>(253,1,0)</b>              | 254             | 505                | (253,1,0)                     | 254             | 0.0              | <b>253</b> |                         |
| <b>SFJSCF_9</b>  | A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub> D <sub>1</sub> E <sub>3</sub> | 4.9 | <b>(210,2,0)</b>              | 212             | 45.2               | (210,2,0)                     | 212             | 0.0              | <b>210</b> |                         |
| <b>SFJSCF_10</b> | A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub> D <sub>3</sub> E <sub>1</sub> | 4.0 | <b>(516,0,0)</b>              | 516             | 195                | (516,0,0)                     | 516             | 0.0              | <b>516</b> |                         |

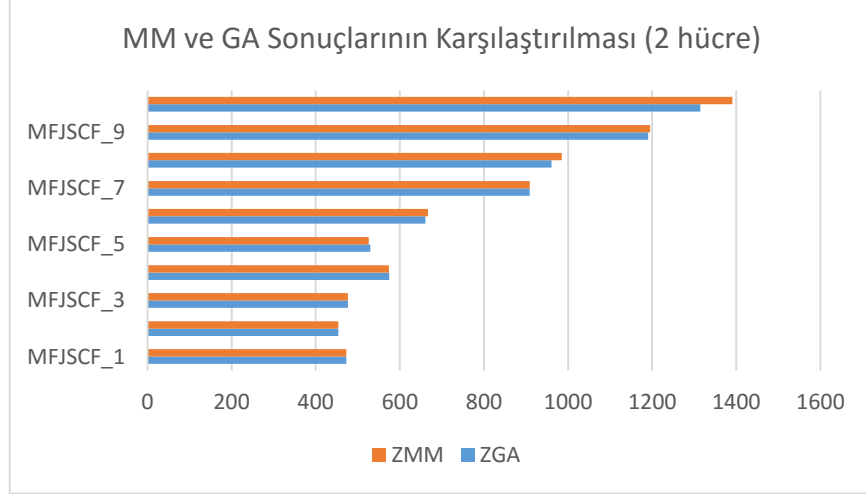
\*\*En iyi C<sub>enb</sub> için koyu yazılı değerler: global optimum



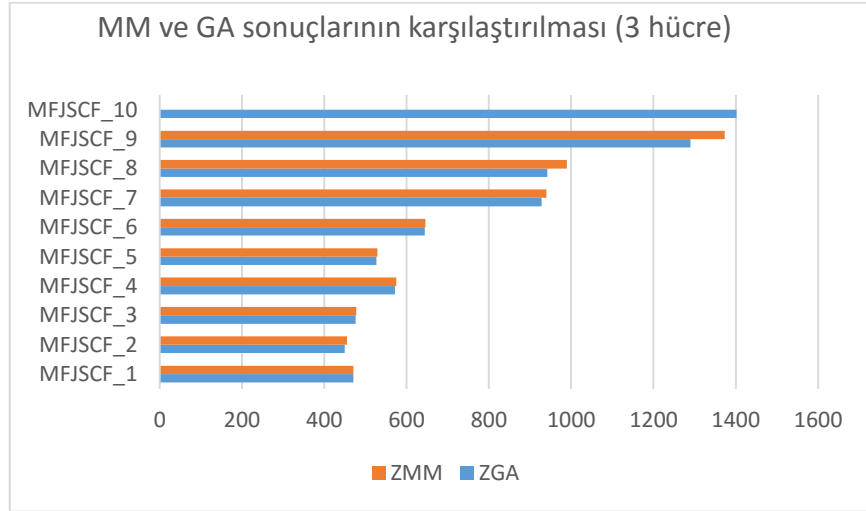
Çizelge 4.2. Türetilen test problemlerine ilişkin sonuçlar (orta/büyük boyut)

| Problem   | Hücre Sayısı | En iyi Düzeyler  | Önerilen Bütünleşik Yaklaşım |                        |            | Matematiksel Model |                        |          | $\Delta(\%)$ GAP |
|-----------|--------------|--|------------------------------|------------------------|------------|--------------------|------------------------|----------|------------------|
|           |              |  | CPU(s)                       | ( $C_{enb}$ , HDE,HİB) | $Z_{GA}$   | CPU (s)            | ( $C_{enb}$ , HDE,HİB) | $Z_{MM}$ |                  |
| MFJSCF_1  | 2            | A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>3</sub> E <sub>3</sub> | 41                           | (469,2,2)              | 473        | 3600               | (469, 2, 2)            | 473      | 0                |
|           | 3            | A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub> D <sub>2</sub> E <sub>3</sub> | 94                           | (468,3,0)              | 471        | 3600               | (468, 3, 0)            | 471      | 0                |
| MFJSCF_2  | 2            | A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>2</sub> E <sub>3</sub> | 73                           | (446,2,6)              | 454        | 3600               | (446, 2, 6)            | 454      | 0                |
|           | 3            | A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub> D <sub>3</sub> E <sub>3</sub> | 97                           | (446,4,0)              | 450        | 3600               | (448, 5, 2)            | 455      | +1               |
| MFJSCF_3  | 2            | A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>3</sub> E <sub>3</sub> | 247                          | (466,3,8)              | 477        | 3600               | (466, 3, 8)            | 477      | 0                |
|           | 3            | A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>3</sub> E <sub>3</sub> | 143                          | (468,6,2)              | 476        | 3600               | (468, 7, 3)            | 478      | +0,4             |
| MFJSCF_4  | 2            | A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub> D <sub>3</sub> E <sub>1</sub> | 178                          | (564,2,9)              | <b>575</b> | 3600               | (565, 1, 8)            | 574      | -0,1             |
|           | 3            | A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> D <sub>3</sub> E <sub>3</sub> | 184                          | (564,5,3)              | 572        | 3600               | (565, 5, 5)            | 575      | +0.5             |
| MFJSCF_5  | 2            | A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>3</sub> E <sub>3</sub> | 192                          | (514,3,9)              | 526        | 3600               | (514, 3, 9)            | 526      | 0                |
|           | 3            | A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>3</sub> E <sub>3</sub> | 135                          | (519,5,3)              | 527        | 3600               | (514, 9, 6)            | 529      | +0,4             |
| MFJSCF_6  | 2            | A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>3</sub> E <sub>1</sub> | 162                          | (649,4,8)              | 661        | 3600               | (648, 15, 4)           | 667      | +0,9             |
|           | 3            | A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>3</sub> E <sub>3</sub> | 202                          | (634,6,4)              | 644        | 3600               | (634, 10, 2)           | 646      | +0,3             |
| MFJSCF_7  | 2            | A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>3</sub> E <sub>3</sub> | 214                          | (894,8,7)              | 909        | 3600               | (881, 23, 5)           | 909      | 0                |
|           | 3            | A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>2</sub> E <sub>3</sub> | 204                          | (910,13,5)             | 928        | 3600               | (920, 17, 3)           | 940      | +1,3             |
| MFJSCF_8  | 2            | A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>3</sub> E <sub>3</sub> | 311                          | (944,6,11)             | 961        | 3600               | (958, 16, 11)          | 985      | +2,5             |
|           | 3            | A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> D <sub>3</sub> E <sub>3</sub> | 216                          | (925,13,4)             | 942        | 3600               | (959, 26, 5)           | 990      | +5,1             |
| MFJSCF_9  | 2            | A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>3</sub> E <sub>3</sub> | 308                          | (1165,11,15)           | 1191       | 3600               | (1158, 22, 15)         | 1195     | +0,3             |
|           | 3            | A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub> D <sub>3</sub> E <sub>3</sub> | 225                          | (1272,14,4)            | 1290       | 3600               | (1346, 20, 7)          | 1373     | +6,0             |
| MFJSCF_10 | 2            | A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub> D <sub>3</sub> E <sub>1</sub> | 407                          | (1284,13,18)           | 1315       | 3600               | (1361, 18, 12)         | 1391     | +5,8             |
|           | 3            | A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub> D <sub>3</sub> E <sub>1</sub> | 359                          | (1372,21,9)            | 1402       | 3600               | -                      | -        |                  |

Geliştirilen matematiksel model ve GA'ya ilişkin sonuçlar değerlendirildiğinde, orta ve büyük boyutlu problemler için iki ve üç hücre oluşturulması durumlarında elde edilen sonuçlar Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de görülmektedir. Sonuçlar her iki problem için de, geliştirilen sezgiselin daha başarılı çözümler verdiğini göstermektedir.

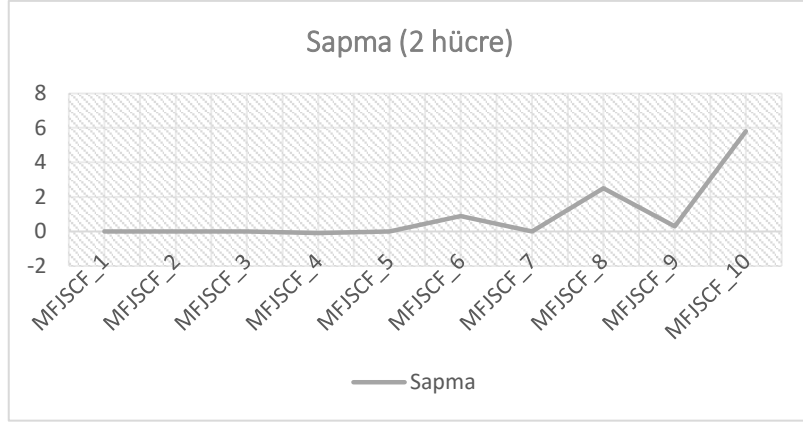


Şekil 4.1. Matematiksel model ve GA sonuçlarının karşılaştırılması (iki hücre)

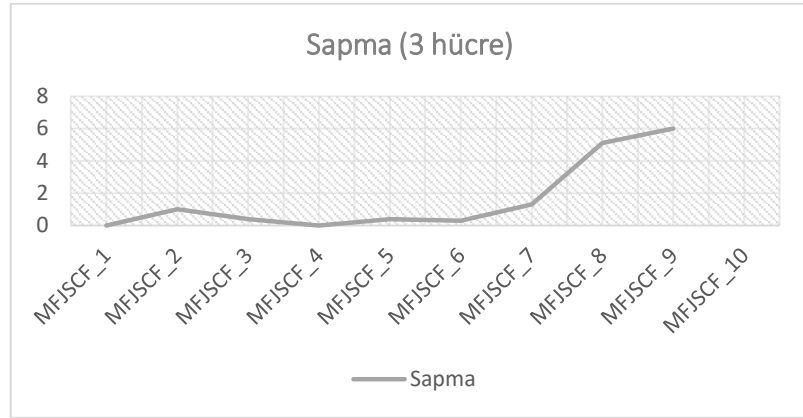


Şekil 4.2. Matematiksel model ve GA sonuçlarının karşılaştırılması (üç hücre)

Son olarak, geliştirilen model ve algoritma, elde edilen en iyi çözümden sapma yönlü de değerlendirilmiştir. Sonuçlara, iki ve üç hücre dikkate alınarak Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te yer verilmiştir. Burada, problem boyutu arttıkça, daha yüksek sapma ve daha iyi sonuçlar elde edilebildiği söylenebilir.



Şekil 4.3. Orta ve büyük boyutlu problemlerde sapma değerlerinin incelenmesi (iki hücre)



Şekil 4.4. Orta ve büyük boyutlu problemlerde sapma değerlerinin incelenmesi (üç hücre)

## 5. OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE BİR UYGULAMA

Uygulama, otomotiv sektöründe ön sıralarda faaliyet gösteren bir firmanın motor parçaları üreten Eskişehir fabrikasında gerçekleştirilmiştir. İşletmenin bünyesinde yer alan birimler; Aktarma Organları Alan Müdürlüğü, Motor Alan Müdürlüğü ve Kamyon Montaj Alan Müdürlüğü olmak üzere üç birimden oluşmaktadır. Uygulamanın gerçekleştirildiği Motor Fabrikası'nda tek vardiya esasına göre yılda 30000 adet motor montajı yapılmaktadır. İmalat hatlarında; motor bloku, silindir kafası, krank-kam milleri, biyel kolları, ana yatak kepleri, yardımcı mil ve karter ile volan, volan dişlisi, volan muhafazası, poyra-kampana, dingil ve aksonlar gibi parçalar imal edilmektedir. İki vardiyada yılda 40000 adet blok üretimi, 40000 adet silindir kafası, 40000 adet motor krankı ve 180000 adet biyel kolları üretilmektedir.

Firma imalatının ana hammaddesi olan döküm malzemelerini Bursa'nın Orhangazi ilçesinde kurulu olan yine kendine ait başka bir firmadan temin etmektedir. Diğer bazı döküm ve dövme parçalar ile piston, segman, subap ve subap yayları, yataklar, keçeler, enjektör ve enjektör memeleri, distribütör, alternatör, emme ve egzost manifoldları yurt içinde kurulu yüksek kaliteli yurtiçi yan sanayi kuruluşlarından (yaklaşık 100 adet yan sanayi firmasından) temin edilmektedir. Enjeksiyon pompası, karbüratör ve rulman parçaları ise ithal edilmektedir. Motor imalatında yerli parça oranı % 85, ticari vasıta üretiminde ise % 90'dır. Ayrıca firma, İngiltere ve Almanya'daki fabrikalarına da motor bloku, biyel kolu ve kam mili ihraç etmektedir.

Uygulama, 100 milyon doları aşan bir yatırımla firmanın seri üretimine başladığı yeni nesil Ecotorq 13L motoruna ait dişlilerin talaşlı imalatının yapıldığı üretim ortamında gerçekleştirilmiştir. Ecotorq motor ailesi Türkiye'de sıfırdan geliştirilen ve üretilen, ilk ve tek kamyon motoru olma özelliğini de taşımaktadır. Bu üretim ortamında, markalama, tornalama, frezeleme, azdırma, taşlama, matkapla delme, raspalama, yıkama ve honlama işlemlerinin yerine getirildiği tezgahlarda değişik çap ve ebatlarda dişlilerin imalatı gerçekleştirilmektedir. Birçok işlem için aynı türden tezgahların da mevcut olduğu imalat ortamında bulunan tezgah sayısı 25 civarındadır. Mevcut durumda makinelerin konumlandırılmaları hücresel tipte olmayıp atölye tipi üretim düzenine uygun şekildedir.

Aynı işlemler için birden fazla paralel yerleşime sahip tezgahlar da dikkate alındığında makine yerleşiminin esnek atölye tipi yerleşim düzeni olduğu rahatlıkla söylenebilmektedir. Mevcut esnek atölye tipi üretim ortamında, işlemlerin hangi tezgahlarda gerçekleştirileceğinin planlaması ilgili tecrübeye sahip teknik ekip tarafından belirlenmektedir. İlgili işlemin gerçekleştirilebilmesi için makine yetenekleri göz önünde bulundurulmakta ancak, talepteki değişikliklere bu sezgisel yöntem cevap verememektedir. İşlemlerin alternatif tezgâhlardaki işlem süreleri farklıdır. Esnek atölye tipi çizelgeleme yapısında olan bu ortamda parçaların gruplanarak hücrelere atanması ve böylece hücresel üretimin getirdiği avantajlardan yararlanılması, yanı sıra eşzamanlı olarak işlerin çizelgelenmesi ile işlerin tamamlanma sürelerinden de bir avantaj elde edilmesi amaçlanmıştır.

Hücresel üretime dönük yerleşim tipiyle, parçaların tezgahlar arasındaki taşıma mesafeleri kısalmaktadır. Böylece taşıma maliyetleri azalacağından, bu maliyetleri daha çok parçaya yaymak için büyük partiler oluşturulmasına da gerek kalmamaktadır. Buna bağlı olarak, akış süreleri kısalmakta, süreç içi stoklar azalmakta ve bunları elde tutma maliyetleri ile birlikte yerden de tasarruf sağlanmaktadır. Akış süreleri kısa olacağından teslimat daha erken yapılabilmektedir. Hücresel üretime dönük yerleşim tipi ile, 'Tam Zamanında Üretim' gibi yeni üretim teknolojilerine geçiş de kolaylaşmaktadır. Üretim sürecinde, malzeme aktarımı önemli bir konudur. Sürecin devamı sırasında malzemelerin bir yerden başka bir yere taşınması nedeniyle önemli bir zaman ve çaba harcanmaktadır. Bu taşımalar, ürünün değerine hiçbir katkıda bulunmamakta ve maliyeti yükseltmektedir. Benzer parçaların gruplanarak taşımaların azaltılması yoluyla, bu sorunun üstesinden gelinmesi amaçlanmıştır.

Bilgilerin gizliliği sebebiyle, dönüştürülmüş, firma parça-işlem bilgileri Ek açıklama D'de verilmiş ve hücre oluşumu ile parça çizelgelenmesi problemleri için eş zamanlı çözüm araştırılmıştır. Ele alınan problemde, 12 parça, 24 makine ve toplam 79 işlem söz konusudur. Parçaların işlem sayıları sırasıyla [7, 4, 6, 7, 7, 6, 5, 8, 9, 7, 8, 5] şeklindedir.

Ele alınan problem için, öncelikle kesin çözüm veren yöntemlerden olan matematiksel model ile çözüm araştırılmıştır. Ancak, 10 saatin üzerinde yapılan çalıştırma sonucunda olurlu bir çözüm elde edilememiştir. Bu sebeple, gerçek hayat problemine geliştirilen GA ile çözüm araştırılmıştır.

GA'nın tanımlanan uyum fonksiyonunun skaler yapıda olması sebebiyle, farklı ağırlıklar ile çalışmanın karar verici açısından faydalı çözümler üretebileceği düşünülmüştür. Sonuç olarak, önerilen GA ile ( $w_{HDE}, w_{HIB}, w_{Cenb}$ ) ağırlık değerleri (1, 1, 1) yerine farklı ağırlıklar kullanılarak elde edilebilecek çözüm kümeleri araştırılmıştır. Diğer deyişle, ağırlıklara bağlı bir duyarlılık analizi gerçekleştirilmiş ve GA parametre seçiminin çözüm üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Problemden, ele alınan hücre dışı eleman ve hücre içi boşluk değerlerinin ağırlıkları sabit kabul edilmiştir. En büyük tamamlanma zamanının en küçükleme amacı için ise, (1, 1/2, 1/4, 1/8) olmak üzere 4 farklı ağırlık seçilmiştir. Bu durumun temel sebebi, tamamlanma zamanının diğer iki amaç fonksiyonuna göre sayısal olarak büyük değer almasıdır ve söz konusu amacın çözümde baskın rol almasını sağlamaktadır. Oysa, uygulamada karar vericiye farklı çözümler sunmak önemlidir. Yani sıra, tamamlanma zamanı farklı zaman ölçeklerinde (saat, dakika, saniye) değerlendirilebilir bir değişken olup, ağırlıkların değiştirilmesi yoluyla ölçeğin değiştirilmesi de farklı çözümlere ulaşmada katkı sağlamaktadır.

Seçilen ağırlıklar için problemlerin en iyi çözümleri test problemlerinde olduğu gibi Taguchi deney tasarımı ile araştırılmıştır. Geliştirilen algoritma için seçilen parça ve makine ceza değerleri "2000" tamamlanma zamanı ceza değerleri sırasıyla "2000, 4000, 8000, 16000" olarak seçilmiştir. Problem için oluşturulacak varsayılan hücre sayısı 3 olarak seçilmiştir. Ek açıklama E'de her bir ağırlık seti için Taguchi deney tasarım planlarına ve deney sonuçlarına yer verilmiştir.

Sonuçlar MINITAB 16.1.1 yazılımında analiz edilmiş olup, varyans analizi sonuçları Ek açıklama F'de sunulmuştur. Ek açıklama G'de her bir ağırlık değeri için elde edilen ortalama ve sinyal gürültü oranı grafikleri yer almaktadır. Varyans analizi sonuçları ve ortalama ile sinyal gürültü oranı grafikleri dikkate alınarak her bir ağırlık için en iyi GA parametre kümesi belirlenmiştir. Varyans analizi sonuçları dikkate alınarak yapılan analizde, istatistiksel olarak anlamlı olan deney tasarımı parametrelerinin, ortalama grafiklerinde en küçük değerlerine karşı gelen düzeyler en iyi olarak seçilmiştir. Seçilen düzeyler aynı zamanda, sinyal gürültü oranı grafiklerinde en büyük düzeylere karşı gelmektedir. İlgili en iyi düzeyler Çizelge 5.1'de yer almaktadır.

Çizelge 5.1. Farklı ağırlıklar için belirlenen en iyi parametre düzeyleri

| Problem | $(W_{HDE}, W_{HİB}, W_{Cenb})$ | En iyi düzeyler   |      |         |      |     |           |
|---------|--------------------------------|-------------------|------|---------|------|-----|-----------|
|         |                                |                   | pb   | cop     | mo   | co  | so        |
| 1       | (1, 1, 1)                      | $A_2B_3C_1D_1E_2$ | 3000 | dağıtık | 0,05 | 0,7 | stokastik |
| 2       | (1, 1, 1/2)                    | $A_2B_3C_3D_2E_2$ | 3000 | dağıtık | 0,15 | 0,8 | stokastik |
| 3       | (1, 1, 1/4)                    | $A_2B_3C_1D_1E_1$ | 3000 | dağıtık | 0,05 | 0,7 | rulet     |
| 4       | (1, 1, 1/8)                    | $A_2B_3C_1D_1E_2$ | 3000 | dağıtık | 0,05 | 0,7 | stokastik |

pb: popülasyon büyüklüğü, cop: çaprazlama operatörü, mo: mutasyon olasılığı, co: çaprazlama olasılığı, so: seçim operatörü

Mevcut durumda, hücreli üretim sistemini uygulanmamaktadır. Bu nedenle mevcut sistemi yeni sistemle karşılaştırmak amacıyla, tek hücreli olarak düşünülmüştür. Mevcut sistemdeki politikalar çerçevesinde çizelgeleme sonuçları Ek açıklama H’de yer almaktadır. Sonuç olarak, mevcut durum amaç fonksiyonu değerleri (HDE, HİB, Cenb) için (0, 214, 189) olarak elde edilmiştir. En iyi sonuçların mevcut durum ile karşılaştırılmasına, Çizelge 5.2’de yer verilmiştir.

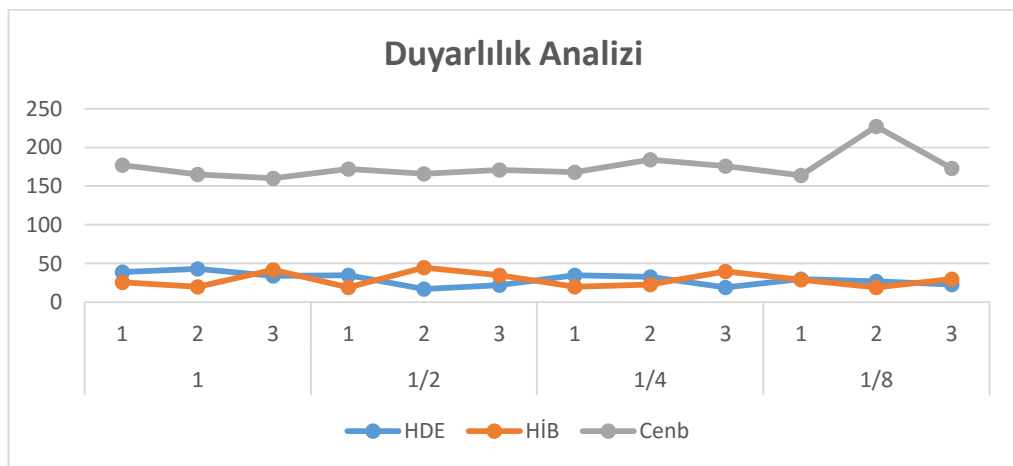
Çizelge 5.2. Uygulama problemi en iyi çözüm sonuçları ve mevcut durumla karşılaştırma

| $(W_{HDE}, W_{HİB}, W_{Cenb})$ | (HDE, HİB, Cenb)     | Uyum Fonksiyonu | En iyi_GA     | t_GA (s) | Mevcut Durum | İyileşme |
|--------------------------------|----------------------|-----------------|---------------|----------|--------------|----------|
| (1, 1, 1)                      | (39, 26, 177)        | 242             | <b>228</b>    | 652      | 403          | %43,4    |
|                                | <b>(43, 20, 165)</b> | <b>228</b>      |               |          |              |          |
|                                | (34, 42, 160)        | 236             |               |          |              |          |
| (1, 1, 1/2)                    | <b>(35, 19, 172)</b> | <b>140</b>      | <b>140</b>    | 1094     | 308,5        | %54,6    |
|                                | (17, 45, 166)        | 145             |               |          |              |          |
|                                | (22, 35, 171)        | 142,5           |               |          |              |          |
| (1, 1, 1/4)                    | <b>(35, 20, 168)</b> | <b>97</b>       | <b>97</b>     | 1151     | 261,25       | %62,9    |
|                                | (33, 23, 184)        | 102             |               |          |              |          |
|                                | (19, 40, 176)        | 103             |               |          |              |          |
| (1, 1, 1/8)                    | (30, 29, 164)        | 79,5            | <b>74,375</b> | 1182     | 237,625      | %68,7    |
|                                | <b>(27, 19, 227)</b> | <b>74,375</b>   |               |          |              |          |
|                                | (23, 30, 173)        | 74,625          |               |          |              |          |

Çizelge 5.2’de ilk sütunda, uygulama problemi için seçilen farklı ağırlıklar verilmiştir. İkinci sütunda, geliştirilen GA’nın, belirlenen en iyi düzey parametreleri ile 3’er kez çalıştırılması sonucu elde edilen amaç fonksiyonu değerleri ve üçüncü kısımda elde edilen çözümler için uyum fonksiyonu sonuçları verilmiştir. En iyi GA sütununda ise, elde edilen en iyi uyum değerine sahip çözüm kaydedilmiştir. Üç koşuturum sonucu elde edilen ortalama süre değerleri t<sub>GA</sub> sütununda yer almaktadır. Uygulama yapılan işletmede, mevcut durumda hücrel bir ortam mevcut değildir. Dolayısıyla, daha önce de belirtildiği gibi yapılacak kıyaslamalarda hücre sayısı bir olarak varsayılmıştır. Tek hücre olarak düşünüldüğünde, hücre oluşturma boyutunda herhangi bir hücreler arası taşıma oluşmayacak, ancak hücre içi boşluklar ortaya çıkacaktır. Uygulamadaki mevcut en iyi değer (Z<sub>MD</sub>) ile GA ile elde edilen en iyi değer (Z<sub>GA</sub>) kıyaslanmış ve sapma değeri izleyen şekilde hesaplanmıştır:

$$Sapma(\%) = 100x \frac{Z_{MD} - Z_{GA}}{Z_{MD}} \quad (4.1)$$

Mevcut ve önerilen yöntemin elde edilen sonuçları kıyaslandığında ortalama %57,4’lük bir iyileşme elde edilebildiği görülmektedir. En fazla iyileşmenin 1/8 ağırlığı ile % 68,7 olarak elde edildiği gözlemlenmiştir. Her bir ağırlık için seçilen en iyi düzeyler dikkate alınarak deneyler 3’er kez tekrar edilmiştir. Sonuç olarak, en iyi düzeyler dikkate alınarak yapılan çalışmada elde edilen en iyi hücre atama ve çizelgeleme sonuçlarına Ek açıklama I’da yer verilmiştir. Farklı ağırlıklar için gerçekleştirilen tekrarlı denemelerin analiz sonuçları Şekil 5.1’de sunulmuştur.



Şekil 5.1. Farklı ağırlıklar dikkate alınarak elde edilen çözümlerin karşılaştırılması



Sonuçlar yorumlandığında, en büyük tamamlanma zamanı için denenen (1, 1/2, 1/4) ağırlıkları ile amaç fonksiyonları yönlü birbirinden çok farklı sonuçlar elde edilmediğini göstermektedir. Oranın daha da küçülmesi ile ise, 1/8 örneğinde olduğu gibi tamamlanma zamanının baskın etkisinin bir miktar azaldığı söylenebilir. Sonuç olarak, bu yapısı ile ele alınan problem çözümleri, ağırlıklardaki değişimlere çok duyarlı değildir şeklinde yorumlanabilir.

Geliştirdiğimiz bu yaklaşımla, ele alınan amaç fonksiyonlarından toplam tamamlanma zamanı, hücre dışı eleman ve hücre içi boşluk amaçlarının birarada ele alınarak daha bütünleşik bir çözüm elde edilebilmesi sağlanmıştır. İşletmelerde aynı işi yapan birden fazla makinenin bulunduğu durumlarda çizelgeleme problemine makine seçimi boyutu eklenmektedir. Aynı işi yapan birden fazla makinenin bulunması işletmelere kapasite artışı ve esneklik sağlarken, eldeki kapasiteyi verimli yönetmek ciddi bir problem haline gelmektedir.

Söz konusu yöntem, toplam tamamlanma zamanının en küçük olmasını sağlayacak bir çizelgeleme önerirken, hücreli imalat boyutunu da göz önünde bulundurabilmiştir. Ayrıca, işletme için önemli bir problem oluşturan taşıma maliyetlerini arttıran hücre dışı elemanların azaltılmasını, hücre içi verimliliği azaltan hücre içi boşlukların en küçüklenmesini amaçlamıştır. Böylece, parçaların makinelerde çizelgelenmesi sağlanırken, hücre oluşumu boyutunda önemli iki amaç dikkate alınarak verimliliğin artırılmasına ilave bir katkı sağlayacaktır.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Hücreyel imalat sistemlerinin tasarımında önemli konulardan hücre oluşturma, hücre yerleşimi, kaynak atama ve parça çizelgeleme problemlerine yönelik bütünleşik çalışmalar son yıllarda artış göstermiştir.

Bu çalışmada, hücre oluşturma ve parça çizelgeleme problemleri için bütünleşik yaklaşımlarla çözüm araştırılmıştır. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, hücre oluşturma boyutunda hücre dışı eleman ve hücre içi boşluk, çizelgeleme boyutunda ise en büyük tamamlanma zamanının en küçüklenmesi amaçları birlikte dikkate alınmıştır. Öncelikle, ele alınan problemin tanıtımı, varsayımları ve karmaşıklığı üzerinde durulmuş ve problemin çözümüne yönelik bir matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel modelin boyut analizi yapılmış ve literatürden alınan test problemleri üzerinde etkinliği araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, matematiksel modelin küçük boyuttaki problemlerin çözümünde etkin olduğunu göstermiştir. Buna karşın, model orta ve büyük boyutlu problemler üzerinde kabul edilebilir sürelerde çözüm üretmede yetersiz kalmıştır. Özellikle, gerçek hayat problemlerinin boyutlarının büyük olduğu göz önüne alınarak, büyük boyutlu problemlerin çözümü için bir GA geliştirilmiştir.

Algoritma kodlanırken, geliştirilen kromozom yapısı ile olası olursuz çözümlerin mümkün olduğunca önüne geçilmiştir. Ek olarak, Taguchi eniyileme tekniği kullanılarak yapılan parametre tasarımı ile GA parametreleri için en uygun düzeyler belirlenmiştir. Geliştirilen algoritma, literatürden türetilen büyük boyutlu problemler üzerinde denenmiştir. Algoritmanın performansı, matematiksel modelin sınırlı süredeki sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmanın sağladığı katkılar izleyen şekilde sıralabilir:

- Esnek üretim sistemlerinin tasarımında önemli iki konu olan hücre oluşumu ve parça çizelgeleme problemleri birlikte dikkate alınmıştır. Özellikle, ilk kez hücre oluşturma boyutunda önemli olan hücre dışı eleman ve hücre içi boşluğun en küçüklenmesi amaçları

ile çizelgeleme boyutunda en büyük tamamlanma zamanının en küçüklenmesi amacı birlikte ele alınmıştır.

- Geliştirilen matematiksel model, ele aldığı bütünleşik problem çözme yaklaşımı ve amaç fonksiyonları itibariyle özgün olmakla birlikte, parça çizelgeleme boyutuyla tekrar işlemeli (geri dönüşlü) yapıya da izin vermesi yönüyle de önemlidir. Böylece, model ele alınan parçalar için -gerçek hayat uygulamalarında sıklıkla karşılaşılan- aynı makineye sonraki işlemlerde geri dönüp tekrar işlem gerçekleştirilebilmesi avantajını sunmuştur. Modelin ek karar değişkenleri ile doğrusallaştırılması yoluyla, küçük boyutlu problemlerde oldukça başarılı çözümler elde edilirken, model orta ve bazı büyük boyutlu problemler için de karşılaştırılabilir çözümler üretmiştir.

- Büyük boyutlu problemlerin çözümü için geliştirilen GA için parametre tasarımı ile uygun düzeyler seçilmiş ve elde edilen sonuçlar iyileştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, geliştirilen GA ile tüm test problemlerinde en az matematiksel model kadar iyi ve bazılarında matematiksel model ile kısıtlı sürede elde edilen çözümlere kıyasla daha iyi sonuçlar elde edilebilmiştir. Ayrıca, algorithmada kullanılan adımlar ve geliştirilen kromozom yapısı ile mümkün olduğunca olursuz çözümler engellenmiş ve çözüm süresi kısaltılmıştır.

- Gerçek hayatta oldukça sık karşılaşılan esnek atölye tipi üretim ortamı hücresel imalat sistemlerinin oluşumunda dikkate alınmıştır. Böylece, işlerin farklı rotalarda çizelgelenebileceği durum göz önünde bulundurulabilmiştir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlardan hareketle, gelecekte çalışılması önerilen konular izleyen şekilde sıralanabilir:

- Söz konusu çalışmada, en büyük tamamlanma zamanının en küçüklenmesi çizelgeleme amacı olarak seçilmiş olsa da, farklı üretim süreçleri için önemli olan bazı çizelgeleme amaçları dikkate alınabilir. Örnek olarak makine kullanım oranlarının dikkate alınması, dengelenmesi ve en küçüklenmesi, toplam gecikme ceza maliyetinin en küçüklenmesi, geciken iş sayısının en küçüklenmesi, en büyük gecikmenin en küçüklenmesi vb. düşünülebilir.

- Önerilen matematiksel model, yeni kısıtlar ilave edilerek gerçek şartlara daha da uygun hale getirilebilir. Problem tanımında ifade edilen, işlerin farklı işlemlerin farklı eşdeğer makinelerde farklı sürelerde işlenebilmesinin yanı sıra, gerçek hayatta bu işlemlerin maliyetlerinin farklı olabileceğinin de amaç fonksiyonu yönüyle dikkate alınması düşünülebilir. Yanı sıra, rassal işlem süreleri, tüm parçaların işletmede üretimi yerine dış yaptırım uygulamaları, dinamik hücre oluşturma gibi konuların ele alınması düşünülebilir.
- Çalışmada, amaçlar ağırlıklı toplam skalerleştirme tekniği ile birleştirilmiş ve amaçların önemleri eşit varsayılmıştır. İleriki çalışmalarda, epsilon kısıt, konik skalerleştirme, hedef programlama teknikleri kullanma yoluyla da farklı ödünleşik çözümler araştırılabilir.
- Problem için rassal arama algoritması, tabu arama algoritması, karınca kolonisi en iyilemesi algoritması gibi meta-sezgisel ve sezgisel yöntemler ile de çözüm araştırılabilir ve geliştirilen GA'nın sonuçlarıyla kıyaslanabilir.
- İşlerin gerçekleştirilmesinde dikkate alınan işlem sürelerinin tespitinde, işçilerin uzmanlık düzeyleri önemli bir faktördür. Hücrelere parça ve makinelerin atanmasının yanı sıra, işçinin de önemli bir kaynak olarak, parça ve makinelere atanmasının önemi açıktır. Diğer deyişle, bütünleşik problemin çözümünde de işçi yetenekleri dikkate alınmalıdır.

**KAYNAKLAR DİZİNİ**

- Akturk, M. S., Turkcan, A., 2000, Cellular manufacturing system design using a holonistic approach. *International Journal of Production Research*, 4: 2327–2347.
- Andres, C., Lozano, S., 2006, A particle swarm optimization algorithm for part–machine grouping. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 22 (5): 468–474.
- Anvari, M., Mehrabad, M.S., & Barzinpour, F., 2010, Machine–part cell formation using a hybrid particle swarm optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47 (5-8): 745–754.
- Arkat, J., Hosseini, L., & Farahani, M.H., 2011, Minimization of exceptional elements and voids in the cell formation problem using a multi-objective genetic algorithm. *Expert Systems with Applications*, 38(8): 9597-9602.
- Arvindh, B., A. Irani. 1994, Cell Formation: The Need for an Integrated Solution of Subproblems. *International Journal of Production Research*, 32 (5): 1197–1218.
- Aryanezhad, M., Deljoo, V., Mirzapour Al-e-Hashem, S., 2009, Dynamic cell formation and the worker assignment problem: a new model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41 (3-4): 329–342.
- Aryanezhad, M. B., Aliabadi, J., Tavakkoli-Moghaddam, R., 2011, A new approach for cell formation and scheduling with assembly operations and product structure. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2 (3): 533-546.
- Austin, S., 1989, Introduction of genetic algorithm, *AI Expert*, March, 49-53.
- Azad, F. N., Ghaedi, M., Dashtian, K., Hajati, S., Pezeshkpour, V., 2016, Ultrasonically assisted hydrothermal synthesis of activated carbon–HKUST-1-MOF hybrid for efficient simultaneous ultrasound-assisted removal of ternary organic dyes and antibacterial investigation: Taguchi optimization. *Ultrasonics sonochemistry*, 31: 383-393.
- Bagheri, A., Zandieh, M., Mahdavi, I., Yazdani, M., 2010, An artificial immune algorithm for the flexible job-shop scheduling problem. *Future Generation Computer Systems*, 26 (4), 533-541.
- Bidanda, B., Ariyawongrat, P., Needy, K. L., Norman, B. A., Tharmmaphornphilas, W., 2005, Human related issues in manufacturing cell design, implementation, and operation: a review and survey. *Computers & Industrial Engineering*, 48 (3): 507–523.
- Boctor, F.F., 1991, A linear formulation of the machine-part cell formation problem. *International Journal of Production Research*, 29 (2): 343–356.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Bootaki, B., Mahdavi, I., Paydar, M. M., 2014, A hybrid GA-AUGMECON method to solve a cubic cell formation problem considering different worker skills. *Computers & Industrial Engineering*, 75: 31–40.
- Brandimarte, P., 1993. Routing and scheduling in a flexible job shop by tabu search. *Annals of Operations Research*, 41: 57 – 183.
- Buruk Sahin, Y. and Alpay S., 2016, Operators' Assignment in Cellular Manufacturing Systems: A Review of Recent Applications, *Global Joint Conference on Industrial Engineering and Its Application Areas*.
- Camposeco-Negrete, C., 2013, Optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption in turning of AISI 6061 T6 using Taguchi methodology and ANOVA. *Journal of Cleaner Production*, 53: 195-203.
- Candan, G., Yazgan, H. R., 2015, Genetic algorithm parameter optimisation using Taguchi method for a flexible manufacturing system scheduling problem. *International Journal of Production Research*, 53(3), 897-915.
- Chakraborty, R, and M Hasin. 2013. "Solving an aggregate production planning problem by using multi-objective genetic algorithm (MOGA) approach." *Review of International Journal of Industrial Engineering Computations* 4 (1):1-12.
- Chan, F. T. S., Lau, K. W., Chan, L. Y., Choy, K. L., 2006, Two-stage approach for machine-part grouping and cell layout problems. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 22: 217–238.
- Chiang, C. P., Lee, S. D., 2004, A genetic-based algorithm with the optimal partition approach for the cell formation in bi-directional linear flow layout. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 17(4): 364–375.
- Choobineh, F., 1988, A framework for the design of cellular manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 26 (7): 1161–1172.
- Chung, S.H., Wu, T.H., Chang, C.C., 2011, An efficient tabu search algorithm to the cell formation problem with alternative routings and machine reliability considerations. *Computers & Industrial Engineering*, 60 (1): 7–15.
- Defersha, F.M., Chen, M., 2006, A comprehensive mathematical model for the design of cellular manufacturing systems. *International Journal of Production Economics*, 103 (2): 767–783.
- Defersha, F. M., Chen, M., 2008, A linear programming embedded genetic algorithm for an integrated cell formation and lot sizing considering product quality. *European Journal of Operational Research*, 187 (1): 46–69.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Deljoo, V., Mirzapour Al-e-hashem, S., Deljoo, F., Aryanezhad, M., 2010, Using genetic algorithm to solve dynamic cell formation problem. *Applied Mathematical Modelling*, 34 (4): 1078–1092.
- Dhingra, S., Bhushan, G., Dubey, K. K., 2014, Multi-objective optimization of combustion, performance and emission parameters in a jatropha biodiesel engine using Non-dominated sorting genetic algorithm-II. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 9(1), 81-94.
- Diaby, M., Nsakanda, A.L., 2006. Large scale capacitated part-routing in the presence of process and routing flexibilities and setup costs. *Journal of the Operational Research Society* 57: 1100–1112.
- Egilmez, G., Erenay, B., Süer, G. A., 2014. Stochastic skill-based manpower allocation in a cellular manufacturing system. *Journal of Manufacturing Systems*, 33 (4): 578–588.
- Ertay, T., Ruan, D., 2005, Data envelopment analysis based decision model for optimal operator allocation in CMS. *European Journal of Operational Research*, 164 (3): 800–810.
- Fattahi, P., Mehrabad, M. S., Jolai, F., 2007, Mathematical modeling and heuristic approaches to flexible job shop scheduling problems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 18(3): 331-342.
- Feng, H., Xia, T., Da, W., Xi, L., Pan, E., 2016, Concurrent design of cell formation and scheduling with consideration of duplicate machines and alternative process routings. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1-15.
- Foulds, L.R., French, A.P., Wilson, J.M., 2006, The sustainable cell formation problem: Manufacturing cell creation with machine modification costs. *Computers & Operations Research*, 33 (4): 1010–1032.
- Foulds, L.R., French, A.P., Wilson, J.M., 2006, The sustainable cell formation problem: manufacturing cell creation with machine modification costs. *Computers and Operations Research* 33: 1010–1032.
- Gao, J., Gen, M., Sun, L., Zhao X., 2007, A Hybrid of Genetic Algorithm and Bottleneck Shifting for Multiobjective Flexible Job Shop Scheduling Problems, *Computers & Industrial Engineering*, 53(1): 149-162.
- Garey, M.R., Johnson, D.S., and Sethi, R., 1976, The complexity of flowshop and job-shop scheduling. *Mathematics of Operations Research*, 1 (2): 117–129.
- Gen, M., & Cheng, R., 2000, *Genetic algorithms and engineering optimization* (vol. 7). John Wiley & Sons.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Ghani, J. A., Choudhury, I. A., Hassan, H. H., 2004, Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, 145(1): 84-92.
- Ghezavati, V., Saidi-Mehrabad, M., 2010, Designing integrated cellular manufacturing systems with scheduling considering stochastic processing time. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 48(5-8): 701-717.
- Gholipour-Kanani, Y., Tavakkoli-Moghaddam, R., Khorrani, A., 2011, Solving a multi-criteria group scheduling problem for a cellular manufacturing system by scatter search. *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 28(3): 192-205.
- Ghosh, T., Dan, P., Sengupta, S., Chattopadhyay, M., 2010, Genetic rule based techniques in cellular manufacturing (1992-2010): A systematic survey. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2 (5): 198–215.
- Goldberg, D. E., & Holland, J. H., 1988, Genetic algorithms and machine learning. *Machine learning*, 3(2), 95-99.
- Gopalakrishnan, H., & Kosanovic, D., 2015, Operational planning of combined heat and power plants through genetic algorithms for mixed 0–1 nonlinear programming. *Computers & Operations Research*, 56, 51-67.
- Hall, N.G., Sethi, S.P., Sriskandarajah, C., 1991, On the complexity of generalized due-date scheduling problems. *European Journal of Operational Research*, 51 (1): 100–109.
- Hamedi, M., Esmaeilian, G., Ismail, N., Ariffin, M., 2012, Capability-based virtual cellular manufacturing systems formation in dual-resource constrained settings using Tabu Search. *Computers & Industrial Engineering*, 62 (4): 953–971.
- Ho, N.B., Tay J.C., Lai E. M.K., 2007, An effective architecture for learning and evolving flexible job-shop schedules. *European Journal of Operational Research*, 179: 316–333.
- Holland, J. H., 1975, "Adaptation in natural and artificial systems. an introductory analysis with applications to biology, control and artificial intelligence." Review of. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.
- Hosseinabadi Farahani, M., Hosseini, L., 2011, An Ant Colony Optimization Approach for the Machine–Part Cell Formation Problem. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 4 (4): 4 86–4 96.
- Imanipour, N., 2006, Modeling and solving flexible job shop problem with sequence dependent setup times. *International conference on service systems and service management*, 2: 1205-1210.



### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Irani, S.A., 1999. Handbook of Cellular Manufacturing Systems. John Wiley and Sons., New York.
- İşlier, A. A., 2001, Üretim Hücrelerinin Bir Genetik Algoritma Kullanılarak Oluşturulması. Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 2(1), 137-157.
- İşlier, A., 2015, Cellular Manufacturing Systems: Organization, Trends and Innovative Methods. Alphanumeric Journal, 3(2).
- Joines, J.A., King, R.E., Culbreth, C.T., 1996, A comprehensive review of production-oriented manufacturing cell formation techniques. International Journal of Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, 3 (3-4): 161-200.
- Karaboğa, D., 2004, Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları, Atlas Yayın Dağıtım, Cağaloğlu, İstanbul.
- Kesen, S.E., Das, S.K., Güngör, Z., 2010, A genetic algorithm based heuristic for scheduling of virtual manufacturing cells (VMCs). Computers & Operations Research, 37 (6): 1148-1156.
- Kusiak, A., 1987, The generalized group technology concept. International Journal of Production Research, 25, 561-569.
- Li, D., Wang, Y., Xiao, G., Tang, J., 2013, Dynamic parts scheduling in multiple job shop cells considering intercell moves and flexible routes. Computers & Operations Research, 40(5): 1207-1223.
- Li, M., 2003, The algorithm for integrating all incidence matrices in multi-dimensional group technology. International Journal of Production Economics, 86 (2): 121-131.
- Li, X., Baki, M., Aneja, Y.P., 2010, An ant colony optimization metaheuristic for machine-part cell formation problems. Computers & Operations Research, 37 (12): 2071-2081.
- Lin, L., Jia-zhen H., 2009, Multi-Objective Flexible Job-Shop Scheduling Problem in Steel Tubes Production. Systems Engineering -Theory & Practice., 29(8): 117- 126.
- Liu, C., Wang, J., Leung, J.Y.T., 2016a, Worker assignment and production planning with learning and forgetting in manufacturing cells by hybrid bacteria foraging algorithm. Computers and Industrial Engineering, 96: 162-179.
- Liu, C., Wang, J., Leung, J.Y.T., Li, K., 2016b, Solving cell formation and task scheduling in cellular manufacturing system by discrete bacteria foraging algorithm. International Journal of Production Research, 54 (3): 923-944.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Liu, C., Wang, J., 2016, Cell formation and task scheduling considering multi-functional resource and part movement using hybrid simulated annealing. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 9(4): 765-777.
- Loukil, T., Teghem J., Fortemps P., 2007, A multi-objective production scheduling case study solved by simulated annealing. *European Journal of Operational Research*, 179: 709–722.
- Mahdavi, I., Aalaei, A., Paydar, M.M., Solimanpur, M., 2010, Designing a mathematical model for dynamic cellular manufacturing systems considering production planning and worker assignment. *Computers & Mathematics with Applications*, 60 (4): 1014–1025.
- Mahdavi, I., Aalaei, A., Paydar, M.M., Solimanpur, M., 2012, A new mathematical model for integrating all incidence matrices in multi-dimensional cellular manufacturing system. *Journal of Manufacturing Systems*, 31 (2): 214–223.
- Mastrolilli, M., Gambardella, L.M., 2002, Effective neighborhood functions for the flexible job shop problem. *Journal of Scheduling*, 3(1): 3–20.
- Mehrabad, M.S. Fattahi P., 2007, Flexible job shop scheduling with tabu search algorithms. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32: 563-570.
- Miltenburg, J., Zhang, W., 1991, A comparative evaluation of nine well-known algorithms for solving the cell formation problem in group technology. *Journal of operations management*, 10(1): 44-72.
- Min, H. K., Shin, D.Y., 1993, Simultaneous formation of machine and human cells in group technology: A multiple objective approach. *International Journal of Production Research*, 31 (10): 2307–2318.
- Niakan, F., Baboli, A., Moyaux, T., Botta-Genoulaz, V., 2016, A bi-objective model in sustainable dynamic cell formation problem with skill-based worker assignment. *Journal of Manufacturing Systems*, 38: 46–62.
- Nikoofarid, E., Aalaei, A., 2012, Production planning and worker assignment in a dynamic virtual cellular manufacturing system. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 7 (2): 89–95.
- Nouri, H., Hong, T.S., 2013, Development of bacteria foraging optimization algorithm for cell formation in cellular manufacturing system considering cell load variations. *Journal of Manufacturing Systems*, 32 (1): 20–31.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Nourie, H., Tang, S. H., Tuah, B. H., Ariffin, M., Samin, R., 2013, Metaheuristic techniques on cell formation in cellular manufacturing system. *Journal of Automation and Control Engineering*, 1 (1), 49–54.
- Offodile, O.F., Mehrez. A., Grznar. J., 1994, Cellular Manufacturing: A Taxonomic Review Framework, *Journal of Manufacturing Systems*, 13(3): 196-220.
- Özgüven, C., Özbakır, L., Yavuz, Y., 2010, Mathematical models for job-shop scheduling problems with routing and process plan flexibility. *Applied Mathematical Modelling*, 34(6): 1539-1548.
- Papaioannou, G., Wilson, J. M., 2010, The evolution of cell formation problem methodologies based on recent studies (1997–2008): Review and directions for future research. *European journal of operational research*, 206(3): 509-521.
- Peker, A., Kara, Y., 2004, Parameter setting of the Fuzzy ART neural network to part-machine cell formation problem. *International Journal of Production Research*, 42 (6): 1257–1278.
- Pezzella, F., Morganti G., Ciaschetti G., 2007. A genetic algorithm for the Flexible Jobshop Scheduling Problem, *Computers & Operations Research*, 35: 3202 – 3212.
- Pinedo M., 2002, *Scheduling: Theory, Algorithms and Systems*. Englewood cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Prabhakaran, G., Asokan, P., Girish, B., Muruganandam, A., 2005, Machine cell formation for cellular manufacturing systems using an ant colony system approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25 (9-10): 1013–1019.
- Rafiei, H., Ghodsi, R., 2013, A bi-objective mathematical model toward dynamic cell formation considering labor utilization. *Applied Mathematical Modelling*, 37 (4): 2308–2316.
- Rafiei, H., Rabbani, M., Gholizadeh, H., Dashti, H., 2016, A novel hybrid SA/GA algorithm for solving an integrated cell formation–job scheduling problem with sequence-dependent set-up times. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 11(3): 134-142.
- Reisman, A., Kumar, A., Motwani, J., Cheng, C. H., 1997, Cellular manufacturing: A statistical review of the literature (1965–1995). *Operations research*, 45 (4): 508–520.
- Ross, P. J., 1988, Taguchi techniques for quality engineering: loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Rossi, A., Dini G., 2007, Flexible job-shop scheduling with routing flexibility and separable setup times using ant colony optimisation method. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23: 503–516.
- Saeidi, S., Solimanpur, M., Mahdavi, I., Javadian, N., 2014, A multi-objective genetic algorithm for solving cell formation problem using a fuzzy goal programming approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70 (9-12): 1635–1652.
- Safaei, N., Saidi-Mehrabad, M., Jabal-Ameli, M., 2008, A hybrid simulated annealing for solving an extended model of dynamic cellular manufacturing system. *European Journal of Operational Research*, 185 (2): 563–592.
- Sahin, Y. B., Alpay, S., 2016, A metaheuristic approach for a cubic cell formation problem. *Expert Systems with Applications*, 65: 40-51.
- Saxena, L.K., Jain, P.K., 2011, Dynamic cellular manufacturing systems design—a comprehensive model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53 (1-4): 11–34.
- Selim, H. M., Askin, R. G., Vakharia, A.J., 1998, Cell formation in group technology: Review, evaluation and directions for future research. *Computers & Industrial Engineering*, 34 (1): 3–20.
- Shahnaghi, K., Shahmoradi-Moghadam, H., Noroozi, A., Mokhtari, H., 2016, A robust modelling and optimisation framework for a batch processing flow shop production system in the presence of uncertainties. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 29(1), 92-106.
- Shiyas, C., Pillai, V.M., 2014, A mathematical programming model for manufacturing cell formation to develop multiple configurations. *Journal of Manufacturing Systems*, 33 (1): 149–158.
- Shtub, A., 1989, Modelling group technology cell formation as a generalized assignment problem. *International Journal of Production Research*, 27 (5): 775– 782.
- Singh, N., 1993, Design of cellular manufacturing systems: An invited review. *European Journal of Operational Research*, 69 (3): 284–291.
- Singh, N., and D. Rajamaani, 1996, *Cellular Manufacturing Systems: Design, Planning and Control*. Chapman and Hall, New York.
- Singh, N., 1995, *Systems Approach to Computer-Integrated Design and Manufacturing*, Wiley, 664 pp.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Sipper, D., Bulfin, R.L., 1997, *Production: planning, control, and integration*. McGraw-Hill Science, Engineering & Mathematics.
- Süer, G.A., Bera, I.S, 1998, Optimal operator assignment and cell loading when lot-splitting is allowed. *Computers & Industrial Engineering*, 35 (3): 431–434.
- Süer, G.A., Cosner, J., Patten, A., 2009, Models for cell loading and product sequencing in labor-intensive cells. *Computers & Industrial Engineering*, 56 (1): 97–105.
- Tang, J., Wang, X., Kaku, I., Yung, K.L, 2010, Optimization of parts scheduling in multiple cells considering intercell move using scatter search approach. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 21(4): 525-537.
- Tang, J., Yan, C., Wang, X., Zeng, C., 2014, Using Lagrangian Relaxation Decomposition with Heuristic to Integrate the Decisions of Cell Formation and Parts Scheduling Considering Intercell Moves. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 11(4): 1110-1121.
- Tavakkoli-Moghaddam, R., Ranjbar-Bourani, M., Amin, G.R., Siadat, A., 2012, A cell formation problem considering machine utilization and alternative process routes by scatter search. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23 (4): 1127–1139.
- Tian, Y., Li, D., Zheng, D., Jia, Y., 2016, Intercell scheduling: A negotiation approach using multi-agent coalitions. *Engineering Optimization*, 1-19.
- Venkataramanaiah, S., 2008, Scheduling in cellular manufacturing systems: an heuristic approach. *International Journal of Production Research*, 46(2): 429-449.
- Wang, X., Tang, J., Yung, K.L., 2010, A scatter search approach with dispatching rules for a joint decision of cell formation and parts scheduling in batches. *International Journal of Production Research*, 48(12): 3513-3534.
- Wei, J.C., Gaither, N., 1990, An optimal model for cell formation decisions. *Decision Sciences*, 21: 416–433
- Wemmerlov U., Johnson D.J., 1997, Cellular manufacturing at 46 user plants: implementation experiences and performance improvements. *International Journal of Production Research*, 35(1): 29–49.
- Wemmerlöv, U., Hyer, N.L., 1986, Procedures for the part family/machine group identification problem in cellular manufacturing. *Journal of Operations Management*, 6(2): 125–147.
- Wemmerlöv, U., Hyer, N.L., 1989, Cellular Manufacturing in the US Industry: A Survey of Users. *The International Journal of Production Research*, 27(9): 1511-1530.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Won, Y., Lee, K.C., 2004, Modified p-median approach for efficient GT cell formation. *Computers and Industrial Engineering*, 46: 495–510.
- Wu, T.H., Chung, S.H., Chang, C.C., 2009, Hybrid simulated annealing algorithm with mutation operator to the cell formation problem with alternative process routings. *Expert Systems with Applications*, 36(2): 3652-3661.
- Wu, T.H., Chang, C.C., Chung, S.H., 2008, A simulated annealing algorithm for manufacturing cell formation problems. *Expert Systems with Applications*, 34 (3): 1609–1617.
- Wu, X., Chu, C.H., Wang, Y., Yan, W., 2007a, A genetic algorithm for cellular manufacturing design and layout. *European Journal of Operational Research*, 181: 156–167.
- Wu, X., Chu, C.H., Wang, Y., Yue, D., 2007b, Genetic algorithms for integrating cell formation with machine layout and scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, 53(2): 277-289.
- Xing, L.N., Chen Y.W., Wang P., Zhao Q.S., Xiong J., 2010, A Knowledge-Based Ant Colony Optimization for Flexible Job Shop Scheduling Problems. *Applied Soft Computing*, 10: 888–896.
- Yang, M., Yang, J., 2008, Machine-part cell formation in group technology using a modified ART1 method. *European Journal of Operational Research*, 188 (1): 140–152.
- Yang, W.P., Tarng, Y.S., 1998, Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method. *Journal of Materials Processing Technology*, 84(1): 122-129.
- Yılmaz, O.F., Cevikcan, E., Durmusoglu, M.B., 2016, Scheduling batches in multi hybrid cell manufacturing system considering worker resources: A case study from pipeline industry. *Advances in Production Engineering & Management*, 11(3): 192.
- Zhang, G., Gao L., Shi Y., 2011, An effective genetic algorithm for the flexible jobshop scheduling problem. *Expert Systems with Applications*, 38: 3563–3573.
- Zhu, Z., Heady, R.B., Reiners, S., 1995, An efficient zero-one formulation of the cell formation problem. *Computers and Industrial Engineering*, 28 (4): 911–916.
- Zolfaghari, S., Liang, M., 2004, Comprehensive machine cell/part family formation using genetic algorithms. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 15 (6): 433–444.

**Ek Açıklama A: Problem seti (Fattahi vd., 2007)**

|    | O1     |              | O2 |  |
|----|--------|--------------|----|--|
| J1 | Makine | İşlem Süresi |    |  |
| J2 |        |              |    |  |

2.2.2

|    | O1 |    | O2 |    |
|----|----|----|----|----|
| J1 | 1  | 25 | 1  | 32 |
|    | 2  | 37 | 2  | 24 |
| J2 | 1  | 45 | 1  | 21 |
|    | 2  | 65 | 2  | 65 |

3.2.2

|    | O1 |     | O2 |    |
|----|----|-----|----|----|
| J1 | 1  | 43  | 1  | 87 |
|    |    |     | 2  | 95 |
| J2 | 1  | 63  |    |    |
|    | 2  | 53  | 2  | 73 |
| J3 | 1  | 125 | 1  | 43 |
|    | 2  | 135 | 2  | 61 |

2.2.2

|    | O1 |    | O2 |    |
|----|----|----|----|----|
| J1 | 1  | 43 | 1  | 64 |
|    |    |    | 2  | 71 |
| J2 | 1  | 21 |    |    |
|    | 2  | 35 | 2  | 43 |

3.2.2

|    | O1 |     | O2 |     |
|----|----|-----|----|-----|
| J1 | 1  | 54  | 1  | 87  |
|    | 2  | 63  | 2  | 95  |
| J2 |    |     |    |     |
|    | 2  | 120 | 2  | 152 |
| J3 | 1  | 125 | 1  | 143 |
|    | 2  | 135 | 2  | 124 |

3.2.2

|    | O1 |    | O2 |    |
|----|----|----|----|----|
| J1 | 1  | 43 | 1  | 64 |
|    | 2  | 36 | 2  | 71 |
| J2 | 1  | 34 | 1  | 36 |
|    | 2  | 53 | 2  | 21 |
| J3 | 1  | 21 | 1  | 43 |
|    | 2  | 35 | 2  | 37 |

3.3.5

|    | O1 |     | O2 |     | O3 |     |
|----|----|-----|----|-----|----|-----|
| J1 | 1  | 117 | 4  | 140 | 4  | 150 |
|    | 2  | 125 | 2  | 130 | 5  | 160 |
| J2 | 1  | 214 | 3  | 55  | 5  | 78  |
|    | 3  | 150 | 2  | 66  | 3  | 65  |
| J3 | 1  | 87  | 4  | 70  | 4  | 190 |
|    | 2  | 62  | 3  | 80  | 5  | 100 |

3.3.2

|    | O1 |    | O2 |     | O3 |     |
|----|----|----|----|-----|----|-----|
| J1 | 1  | 17 | 1  | 40  | 2  | 50  |
|    |    |    | 2  | 130 | 3  | 60  |
| J2 | 1  | 30 | 1  | 150 | 3  | 70  |
|    |    |    | 2  | 160 |    |     |
| J3 | 1  | 50 | 2  | 170 | 2  | 90  |
|    | 2  | 60 | 3  | 180 | 3  | 100 |

3.3.4

|    | O1 |    | O2 |    | O3 |     |
|----|----|----|----|----|----|-----|
| J1 | 1  | 17 | 4  | 40 | 4  | 150 |
|    | 2  | 25 | 2  | 30 | 3  | 160 |
| J2 | 1  | 30 | 4  | 55 | 4  | 78  |
|    | 3  | 50 | 2  | 66 | 3  | 65  |
| J3 | 1  | 56 | 2  | 70 | 4  | 90  |
|    | 2  | 62 | 3  | 80 | 3  | 100 |



## 3.3.3

|    | O1 |    | O2 |    | O3 |     |
|----|----|----|----|----|----|-----|
| J1 | 1  | 17 | 4  | 40 | 2  | 50  |
|    | 2  | 25 | 2  | 30 | 3  | 60  |
| J2 | 1  | 30 | 1  | 50 | 4  | 70  |
|    | 3  | 50 | 2  | 60 | 3  | 60  |
| J3 | 1  | 50 | 2  | 70 | 2  | 90  |
|    | 2  | 60 | 3  | 80 | 3  | 100 |

## 4.3.5

|    | O1 |     | O2 |     | O3 |     |
|----|----|-----|----|-----|----|-----|
| J1 | 1  | 147 | 4  | 140 | 4  | 150 |
|    | 2  | 123 | 2  | 130 | 5  | 160 |
|    | 3  | 145 |    |     |    |     |
| J2 | 1  | 214 | 3  | 87  | 5  | 178 |
|    | 3  | 150 | 2  | 66  | 6  | 95  |
| J3 | 1  | 87  |    |     | 4  | 190 |
|    | 2  | 62  | 3  | 180 | 5  | 100 |
|    |    |     | 4  | 105 | 6  | 153 |
| J4 | 1  | 87  |    |     | 4  | 145 |
|    | 2  | 65  | 5  | 173 | 3  | 136 |
| J5 | 2  | 123 | 3  | 86  | 5  | 110 |
|    | 3  | 145 | 4  | 65  | 6  | 85  |
|    | 1  | 128 | 5  | 47  |    |     |

## 4.3.5

|    | O1 |     | O2 |     | O3 |     |
|----|----|-----|----|-----|----|-----|
| J1 | 1  | 147 | 4  | 140 | 4  | 150 |
|    |    |     | 2  | 130 | 5  | 160 |
| J2 | 1  | 214 | 3  | 87  | 5  | 178 |
|    | 3  | 150 | 2  | 66  |    |     |
| J3 | 1  | 87  |    |     | 4  | 190 |
|    | 2  | 62  | 3  | 180 | 5  | 100 |
| J4 | 1  | 87  |    |     | 4  | 145 |
|    | 2  | 65  | 5  | 173 | 3  | 136 |

## 5.3.7

|    | O1 |     | O2 |     | O3 |     |
|----|----|-----|----|-----|----|-----|
| J1 | 1  | 147 | 4  | 140 | 4  | 150 |
|    | 2  | 123 | 2  | 130 | 5  | 160 |
|    | 3  | 145 | 1  | 123 | 7  | 200 |
| J2 | 1  | 214 | 3  | 87  | 5  | 178 |
|    | 3  | 150 | 2  | 66  | 6  | 95  |
|    |    |     | 4  | 99  | 7  | 150 |
| J3 | 1  | 87  | 7  | 145 | 4  | 190 |
|    | 2  | 62  | 3  | 180 | 5  | 100 |
|    |    |     | 4  | 105 | 6  | 153 |
| J4 | 1  | 87  | 3  | 250 | 4  | 145 |
|    | 2  | 65  | 5  | 173 | 6  | 136 |
| J5 | 2  | 123 | 3  | 86  | 5  | 110 |
|    | 3  | 145 | 4  | 65  | 6  | 85  |
|    | 1  | 128 | 5  | 47  |    |     |

## 6.3.7

|    | O1 |     | O2 |     | O3 |     |
|----|----|-----|----|-----|----|-----|
| J1 | 1  | 147 | 4  | 140 | 4  | 150 |
|    | 2  | 123 | 2  | 130 | 5  | 160 |
|    | 3  | 145 | 1  | 123 | 7  | 200 |
| J2 | 1  | 214 | 3  | 87  | 5  | 178 |
|    | 3  | 150 | 2  | 66  | 6  | 95  |
|    |    |     | 4  | 99  | 7  | 150 |
| J3 | 1  | 87  | 7  | 145 | 4  | 190 |
|    | 2  | 62  | 3  | 180 | 5  | 100 |
|    |    |     | 4  | 105 | 6  | 153 |
| J4 | 1  | 87  | 3  | 250 | 4  | 145 |
|    | 2  | 65  | 5  | 173 | 3  | 136 |
| J5 | 2  | 123 | 3  | 86  | 5  | 110 |
|    | 3  | 145 | 4  | 65  | 6  | 85  |
|    | 1  | 128 | 5  | 47  |    |     |
| J6 | 2  | 145 | 4  | 150 | 5  | 120 |
|    | 3  | 320 | 3  | 123 | 6  | 240 |
|    | 4  | 154 | 5  | 192 | 7  | 180 |

7.3.7

|    | O1 |     | O2 |     | O3 |     |
|----|----|-----|----|-----|----|-----|
| J1 | 1  | 147 | 4  | 140 | 4  | 150 |
|    | 2  | 123 | 2  | 130 | 5  | 160 |
|    |    |     | 7  | 123 | 7  | 200 |
| J2 | 1  | 214 | 3  | 87  | 5  | 178 |
|    | 3  | 150 | 2  | 66  | 6  | 95  |
|    |    |     | 4  | 99  | 7  | 150 |
| J3 | 1  | 87  | 7  | 145 | 4  | 190 |
|    | 2  | 62  | 3  | 180 | 5  | 100 |
|    |    |     | 4  | 105 | 6  | 153 |
| J4 | 1  | 87  | 3  | 250 | 4  | 145 |
|    | 2  | 65  | 5  | 173 | 6  | 136 |
| J5 | 2  | 123 | 7  | 86  | 5  | 110 |
|    | 3  | 145 | 4  | 65  | 6  | 85  |
|    | 1  | 128 | 5  | 47  |    |     |
| J6 | 2  | 145 | 4  | 150 | 5  | 120 |
|    | 3  | 320 | 3  | 123 | 6  | 240 |
|    | 4  | 154 | 5  | 192 | 7  | 180 |
| J7 | 3  | 145 | 3  | 124 | 5  | 145 |
|    | 2  | 210 | 4  | 168 | 6  | 165 |
|    | 1  | 157 | 5  | 154 | 7  | 178 |

7.3.7

|    | O1 |     | O2 |     | O3 |     |
|----|----|-----|----|-----|----|-----|
| J1 | 1  | 247 | 4  | 140 | 4  | 150 |
|    | 2  | 223 | 2  | 130 | 5  | 160 |
|    | 3  | 100 | 7  | 123 | 7  | 200 |
| J2 | 1  | 214 | 3  | 87  | 5  | 178 |
|    | 3  | 150 | 2  | 66  | 6  | 95  |
|    |    |     |    |     | 7  | 150 |
| J3 | 1  | 87  | 7  | 145 | 4  | 190 |
|    | 2  | 62  | 3  | 180 | 5  | 100 |
|    |    |     | 4  | 105 | 6  | 153 |
| J4 | 1  | 87  | 3  | 250 | 4  | 145 |
|    | 2  | 65  | 5  | 173 | 6  | 136 |
| J5 | 2  | 123 | 7  | 86  | 5  | 110 |
|    | 3  | 145 | 4  | 65  | 6  | 85  |
|    | 1  | 128 | 5  | 47  | 2  | 100 |
| J6 | 2  | 145 | 4  | 150 | 5  | 120 |
|    | 3  | 320 | 3  | 123 | 6  | 240 |
|    | 4  | 154 | 5  | 192 | 7  | 180 |
| J7 | 3  | 145 | 3  | 124 | 5  | 145 |
|    | 2  | 157 | 5  | 168 | 6  | 165 |
|    |    |     |    |     | 7  | 178 |

## 8.3.7

|    | O1 |     | O2 |     | O3 |     |
|----|----|-----|----|-----|----|-----|
| J1 | 1  | 247 | 4  | 140 | 4  | 150 |
|    | 2  | 223 | 2  | 130 | 5  | 160 |
|    | 3  | 100 | 7  | 123 | 7  | 200 |
| J2 | 1  | 214 | 3  | 87  | 5  | 178 |
|    | 3  | 150 | 2  | 66  | 6  | 95  |
|    |    |     |    |     | 7  | 150 |
| J3 | 1  | 87  | 7  | 145 | 4  | 190 |
|    | 2  | 62  | 3  | 180 | 5  | 100 |
|    |    |     | 4  | 105 | 6  | 153 |
| J4 | 1  | 87  | 3  | 250 | 4  | 145 |
|    | 2  | 65  | 5  | 173 | 6  | 136 |
| J5 | 2  | 123 | 7  | 86  | 5  | 110 |
|    | 3  | 145 | 4  | 65  | 6  | 85  |
|    | 1  | 128 | 5  | 47  | 2  | 100 |
| J6 | 2  | 145 | 4  | 150 | 5  | 120 |
|    | 3  | 320 | 3  | 123 | 6  | 240 |
|    | 4  | 154 | 5  | 192 | 7  | 180 |
| J7 | 3  | 145 | 3  | 124 | 5  | 145 |
|    | 2  | 157 | 5  | 168 | 6  | 165 |
|    |    |     |    |     | 7  | 178 |
| J8 | 4  | 245 | 6  | 224 | 5  | 145 |
|    | 3  | 257 | 5  | 268 | 6  | 165 |
|    |    |     |    |     | 7  | 178 |

## 8.4.7

|    | O1 |     | O2 |     | O3 |     | O4 |     |
|----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|
| J1 | 1  | 247 | 4  | 140 | 4  | 150 | 7  | 210 |
|    | 2  | 223 | 2  | 130 | 5  | 160 | 6  | 145 |
|    | 3  | 100 | 7  | 123 | 7  | 200 |    |     |
| J2 | 1  | 214 | 3  | 87  | 5  | 178 | 5  | 120 |
|    | 3  | 150 | 2  | 66  | 6  | 95  | 7  | 150 |
|    |    |     |    |     | 7  | 150 |    |     |
| J3 | 1  | 87  | 7  | 145 | 4  | 190 | 6  | 170 |
|    | 2  | 62  | 3  | 180 | 5  | 100 | 7  | 165 |
|    |    |     | 4  | 105 | 6  | 153 |    |     |
| J4 | 1  | 87  | 3  | 250 | 4  | 145 | 5  | 250 |
|    | 2  | 65  | 5  | 173 | 6  | 136 | 6  | 170 |
| J5 | 2  | 123 | 7  | 86  | 5  | 110 | 4  | 165 |
|    | 3  | 145 | 4  | 65  | 6  | 85  | 6  | 180 |
|    | 1  | 128 | 5  | 47  | 2  | 100 |    |     |
| J6 | 2  | 145 | 4  | 150 | 5  | 120 | 4  | 120 |
|    | 3  | 320 | 3  | 123 | 6  | 240 | 7  | 50  |
|    | 4  | 154 | 5  | 192 | 7  | 180 |    |     |
| J7 | 3  | 145 | 3  | 124 | 5  | 145 | 7  | 230 |
|    | 2  | 157 | 5  | 168 | 6  | 165 | 5  | 140 |
|    |    |     |    |     | 7  | 178 |    |     |
| J8 | 4  | 245 | 6  | 224 | 5  | 145 | 7  | 150 |
|    | 3  | 257 | 5  | 268 | 6  | 165 | 6  | 150 |
|    |    |     |    |     | 7  | 178 |    |     |

## 9.4.8

|    | O1 |     | O2 |     | O3 |     | O4 |     |
|----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|
| J1 | 1  | 247 | 4  | 140 | 4  | 150 | 7  | 210 |
|    | 2  | 123 | 2  | 130 | 5  | 160 | 8  | 145 |
|    | 3  | 100 | 7  | 123 | 7  | 200 |    |     |
| J2 | 1  | 214 | 3  | 87  | 5  | 178 | 5  | 120 |
|    | 3  | 150 | 2  | 66  | 6  | 95  | 8  | 150 |
| J3 | 1  | 87  | 7  | 145 | 4  | 190 | 6  | 170 |
|    | 2  | 62  | 3  | 180 | 5  | 100 | 8  | 165 |
|    |    |     | 4  | 105 | 6  | 153 |    |     |
| J4 | 1  | 87  | 3  | 250 | 4  | 145 | 5  | 250 |
|    | 2  | 65  | 5  | 173 | 6  | 136 | 6  | 170 |
| J5 | 2  | 123 | 7  | 86  | 5  | 110 | 8  | 165 |
|    | 3  | 145 | 4  | 65  | 6  | 85  | 6  | 180 |
|    | 1  | 128 | 5  | 47  | 2  | 100 |    |     |
| J6 | 2  | 145 | 4  | 150 | 5  | 120 | 4  | 120 |
|    | 3  | 320 | 3  | 123 | 6  | 240 | 7  | 50  |
|    | 4  | 154 | 5  | 192 | 7  | 180 |    |     |
| J7 | 3  | 145 | 3  | 124 | 5  | 145 | 8  | 230 |
|    | 2  | 157 | 5  | 168 | 6  | 165 | 5  | 140 |
|    |    |     |    |     | 7  | 178 |    |     |
| J8 | 4  | 245 | 6  | 224 | 5  | 145 | 7  | 150 |
|    | 3  | 257 | 5  | 268 | 6  | 165 | 8  | 150 |
|    |    |     |    |     | 7  | 178 |    |     |
| J9 | 2  | 150 | 3  | 180 | 5  | 40  | 6  | 150 |
|    | 3  | 150 | 4  | 220 | 7  | 50  | 8  | 170 |

## 11.4.8

|     | O1 |     | O2 |     | O3 |     | O4 |     |
|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|
| J1  | 1  | 247 | 4  | 140 | 4  | 150 | 7  | 210 |
|     | 2  | 123 | 2  | 130 | 5  | 160 | 8  | 145 |
|     | 3  | 100 | 7  | 123 | 7  | 200 |    |     |
| J2  | 1  | 214 | 3  | 87  | 5  | 178 | 5  | 120 |
|     | 3  | 150 | 2  | 66  | 6  | 95  | 8  | 150 |
|     |    |     |    |     | 7  | 150 |    |     |
| J3  | 1  | 87  | 7  | 145 | 4  | 190 | 6  | 170 |
|     | 2  | 62  | 3  | 180 | 5  | 100 | 8  | 165 |
|     |    |     | 4  | 105 | 6  | 153 |    |     |
| J4  | 1  | 87  | 3  | 250 | 4  | 145 | 5  | 250 |
|     | 2  | 65  | 5  | 173 | 6  | 136 | 6  | 170 |
| J5  | 2  | 123 | 7  | 86  | 5  | 110 | 8  | 165 |
|     | 3  | 145 | 4  | 65  | 6  | 85  | 6  | 180 |
|     | 1  | 128 | 5  | 47  | 2  | 100 |    |     |
| J6  | 2  | 145 | 4  | 150 | 5  | 120 | 4  | 120 |
|     | 3  | 320 | 3  | 123 | 6  | 240 | 7  | 50  |
|     | 4  | 154 | 5  | 192 | 7  | 180 |    |     |
| J7  | 3  | 145 | 3  | 124 | 5  | 145 | 8  | 230 |
|     | 2  | 157 | 5  | 168 | 6  | 165 | 5  | 140 |
|     |    |     |    |     | 7  | 178 |    |     |
| J8  | 4  | 245 | 6  | 224 | 5  | 145 | 7  | 150 |
|     | 3  | 257 | 5  | 268 | 6  | 165 | 8  | 150 |
|     |    |     |    |     | 7  | 178 |    |     |
| J9  | 2  | 150 | 3  | 180 | 5  | 40  | 6  | 150 |
|     | 3  | 150 | 4  | 220 | 7  | 50  | 8  | 170 |
| J10 | 4  | 245 | 6  | 224 | 5  | 145 | 7  | 150 |
|     | 3  | 257 | 5  | 268 | 6  | 165 | 8  | 150 |
|     |    |     |    |     | 7  | 178 |    |     |
| J11 | 2  | 150 | 3  | 180 | 5  | 40  | 6  | 150 |
|     | 3  | 150 | 4  | 220 | 7  | 50  | 8  | 170 |

## 12.4.8

|     | O1 |     | O2 |     | O3 |     | O4 |     |
|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|
| J1  | 1  | 247 | 4  | 140 | 4  | 150 | 7  | 210 |
|     | 2  | 223 | 2  | 130 | 5  | 160 | 8  | 145 |
|     | 3  | 100 | 7  | 123 | 7  | 200 |    |     |
| J2  | 1  | 214 | 3  | 87  | 5  | 178 | 5  | 120 |
|     | 3  | 150 | 2  | 66  | 6  | 95  | 8  | 150 |
|     |    |     |    |     | 7  | 150 |    |     |
| J3  | 1  | 87  | 7  | 145 | 4  | 190 | 6  | 170 |
|     | 2  | 62  | 3  | 180 | 5  | 100 | 8  | 165 |
|     |    |     | 4  | 105 | 6  | 153 |    |     |
| J4  | 1  | 87  | 3  | 250 | 4  | 145 | 5  | 250 |
|     | 2  | 65  | 5  | 173 | 6  | 136 | 6  | 170 |
| J5  | 2  | 123 | 7  | 86  | 5  | 110 | 8  | 165 |
|     | 3  | 145 | 4  | 65  | 6  | 85  | 6  | 180 |
|     | 1  | 128 | 5  | 47  | 2  | 100 |    |     |
| J6  | 2  | 145 | 4  | 150 | 5  | 120 | 4  | 120 |
|     | 3  | 320 | 3  | 123 | 6  | 240 | 7  | 50  |
|     | 4  | 154 | 5  | 192 | 7  | 180 |    |     |
| J7  | 3  | 145 | 3  | 124 | 5  | 145 | 8  | 230 |
|     | 2  | 157 | 5  | 168 | 6  | 165 | 5  | 140 |
|     |    |     |    |     | 7  | 178 |    |     |
| J8  | 4  | 245 | 6  | 224 | 5  | 145 | 7  | 150 |
|     | 3  | 257 | 5  | 268 | 6  | 165 | 8  | 150 |
|     |    |     |    |     | 7  | 178 |    |     |
| J9  | 2  | 150 | 3  | 180 | 5  | 40  | 6  | 150 |
|     | 3  | 150 | 4  | 220 | 7  | 50  | 8  | 170 |
| J10 | 4  | 245 | 6  | 224 | 5  | 145 | 7  | 150 |
|     | 3  | 257 | 5  | 268 | 6  | 165 | 8  | 150 |
|     |    |     |    |     | 7  | 178 |    |     |
| J11 | 2  | 150 | 3  | 180 | 5  | 40  | 6  | 150 |
|     | 3  | 150 | 4  | 220 | 7  | 50  | 8  | 170 |
| J12 | 3  | 345 | 3  | 224 | 5  | 145 | 8  | 230 |
|     | 2  | 357 | 5  | 268 | 6  | 165 | 5  | 340 |
|     |    |     |    |     | 7  | 178 |    |     |

## Ek Açıklama B: Gams kodu

### SETS

```

i index of jobs /1*8/
j index of operations /1*4/
k index of machine /1*7/
l number of position/1*15/
c cell/1*2/;

```

### TABLE p(i,j,k) processing time

|     | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1.1 | 247 | 223 | 100 | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 1.2 | 0   | 130 | 0   | 140 | 0   | 0   | 123 |
| 1.3 | 0   | 0   | 0   | 150 | 160 | 0   | 200 |
| 1.4 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 145 | 210 |
| 2.1 | 214 | 0   | 150 | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 2.2 | 0   | 66  | 87  | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 2.3 | 0   | 0   | 0   | 0   | 178 | 95  | 150 |
| 2.4 | 0   | 0   | 0   | 0   | 120 | 0   | 150 |
| 3.1 | 87  | 62  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 3.2 | 0   | 0   | 180 | 105 | 0   | 0   | 145 |
| 3.3 | 0   | 0   | 0   | 190 | 100 | 153 | 0   |
| 3.4 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 170 | 165 |
| 4.1 | 87  | 65  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 4.2 | 0   | 0   | 250 | 0   | 173 | 0   | 0   |
| 4.3 | 0   | 0   | 0   | 145 | 0   | 136 | 0   |
| 4.4 | 0   | 0   | 0   | 0   | 250 | 170 | 0   |
| 5.1 | 128 | 123 | 145 | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 5.2 | 0   | 0   | 0   | 65  | 47  | 0   | 86  |
| 5.3 | 0   | 100 | 0   | 0   | 110 | 85  | 0   |
| 5.4 | 0   | 0   | 0   | 165 | 0   | 180 | 0   |
| 6.1 | 0   | 145 | 320 | 154 | 0   | 0   | 0   |
| 6.2 | 0   | 0   | 123 | 150 | 192 | 0   | 0   |
| 6.3 | 0   | 0   | 0   | 0   | 120 | 240 | 180 |

```

6.4 0    0    0    120 0    0    50

7.1 0    157  145  0    0    0    0
7.2 0    0    124  0    168  0    0
7.3 0    0    0    0    145  165  178
7.4 0    0    0    0    140  0    230

8.1 0    0    257  245  0    0    0
8.2 0    0    0    0    268  224  0
8.3 0    0    0    0    145  165  178
8.4 0    0    0    0    0    150  150

```

```
;
```

**Table** a(i,j,k) capable machine set

|     | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1.2 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 1.3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 1.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 2.1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.2 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 2.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 3.1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3.2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 3.3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 3.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 4.1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4.2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 4.3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 4.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 5.1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5.2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 5.3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 5.4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |



```

6.1 0 1 1 1 0 0 0
6.2 0 0 1 1 1 0 0
6.3 0 0 0 0 1 1 1
6.4 0 0 0 1 0 0 1

7.1 0 1 1 0 0 0 0
7.2 0 0 1 0 1 0 0
7.3 0 0 0 0 1 1 1
7.4 0 0 0 0 1 0 1

8.1 0 0 1 1 0 0 0
8.2 0 0 0 0 1 1 0
8.3 0 0 0 0 1 1 1
8.4 0 0 0 0 0 1 1
;
Scalar M /10000/;

Variables
t(i,j) Oij nin baslama zamanı
Tm(k,l) k. makinede l. sıradaki isin baslama zamanı
x(i,j,k,l,c) Oij k. makinede l. sıraya atanmışsa
Cmax
EE
zamac ;

Binary Variables
z(k,c)
y(i,c)
x(i,j,k,l,c)
S(i,j,k,l,c)
F(i,j,k,l,c)
v(i,k,c)
U(i,k,c)
H(i,k,c);

Positive Variables
t
Tm
void;

```

**Equations**

amac1 (i, j, c) Cmax

amac2 EE

amac\_toplam

amac3

eq1 (i, j)

eq2 (k, l, c)

eq3 (i, j, k)

eq4 (i, j, c)

eq5 (k, l, c)

eq6 (i, j, k, l, c)

eq7 (i, j, k, l, c)

eq8 (k)

eq10 (c)

eq11 (i)

eq12 (i, j, k, l, c)

eq13 (i, j, k, l, c)

eq14 (i, j, k, l, c)

eq15 (i, j, k, l, c)

eq16 (i, j, k, l, c)

eq17 (c)

eq19 (i, k, c)

eq20 (i, k, c)

eq21 (i, k, c)

eq22 (i, k, c)

eq23 (i, k, c);

amac1 (i, j, c) .. Cmax=g=t (i, j) +sum (k, sum (l, x (i, j, k, l, c) \*p (i, j, k)));

amac2 .. EE=e=sum ((i, j, k, l, c), (F (i, j, k, l, c) -S (i, j, k, l, c)));

amac3 .. void=e=sum ((i, k, c), U (i, k, c) -H (i, k, c));

amac\_toplam .. zamac=e=Cmax + EE+void;

eq1 (i, j) .. sum (k, sum (l, sum (c, x (i, j, k, l, c))))=e=1;

eq2 (k, l, c) .. sum (i, sum (j, x (i, j, k, l, c)))=l=1;

eq3 (i, j, k) .. sum (l, sum (c, x (i, j, k, l, c)))=l=a (i, j, k);

```

eq4 (i, j, c) $ (ord(j) lt
card(j)) .. t(i, j+1) = g = t(i, j) + sum(k, sum(l, x(i, j, k, l, c) * p(i, j, k)));

eq5 (k, l, c) $ (ord(l) lt
card(l)) .. Tm(k, l+1) = g = Tm(k, l) + sum(i, sum(j, x(i, j, k, l, c) * p(i, j, k)));

eq6 (i, j, k, l, c) .. Tm(k, l) = l = t(i, j) + M * (1 - x(i, j, k, l, c));

eq7 (i, j, k, l, c) .. Tm(k, l) = g = t(i, j) - M * (1 - x(i, j, k, l, c));

eq8 (k) .. sum(c, z(k, c)) = e = 1;

eq10 (c) .. sum(k, z(k, c)) = g = 1;

eq11 (i) .. sum(c, y(i, c)) = e = 1;

eq17 (c) .. sum(i, y(i, c)) = g = 1;

eq12 (i, j, k, l, c) .. x(i, j, k, l, c) = l = a(i, j, k) * z(k, c);

eq13 (i, j, k, l, c) .. x(i, j, k, l, c) + z(k, c) = g = 2 * F(i, j, k, l, c);

eq14 (i, j, k, l, c) .. x(i, j, k, l, c) + z(k, c) = l = 1 + F(i, j, k, l, c);

eq15 (i, j, k, l, c) .. x(i, j, k, l, c) + z(k, c) + y(i, c) = g = 3 * S(i, j, k, l, c);

eq16 (i, j, k, l, c) .. x(i, j, k, l, c) + z(k, c) + y(i, c) = l = 2 + S(i, j, k, l, c);

eq19 (i, k, c) .. v(i, k, c) = l = sum((j, l), x(i, j, k, l, c));

eq20 (i, k, c) .. y(i, c) + z(k, c) = g = 2 * U(i, k, c);

eq21 (i, k, c) .. y(i, c) + z(k, c) = l = 1 + U(i, k, c);

eq22 (i, k, c) .. y(i, c) + z(k, c) + v(i, k, c) = g = 3 * H(i, k, c);

eq23 (i, k, c) .. y(i, c) + z(k, c) + v(i, k, c) = l = 2 + H(i, k, c);

model fjsp /all/;
OPTION LIMROW = 1000;

```

```
OPTION LIMCOL=1000;  
OPTION optcr=0;  
OPTION reslim=3600;  
solve fjsp using mip minimizing zamac;
```

## Ek Açıklama C: Matlab kodu

### MAIN

```
clear all
clc
```

```
tic
```

```
global part machine cell operations part_operation_list part_operation_machine
part_operation_durations nvars part_min part_max machine_min machine_max penalty_p
penalty_m penalty_o penalty_t
```

```
part=3; %parca sayısı
machine=5; %makine sayısı
cell=2; %hücre sayısı
operations=[3 3 3]; %parçalara ait operasyon sayıları >> 1.eleman 1.parçanın
operasyon sayısı...
```

```
part_operation_machine=[
1 2 0 0
2 4 0 0
4 5 0 0
1 3 0 0
2 3 0 0
3 5 0 0
1 2 0 0
3 4 0 0
4 5 0 0
]; %parça operasyonlarını gerçekleştirebilecek makine setleri >>
```

```
part_operation_durations=[
117 125 0 0 0
0 130 0 140 0
0 0 0 150 160
214 0 150 0 0
0 66 55 0 0
0 0 65 0 78
87 62 0 0 0
0 0 80 70 0
0 0 0 190 100
]; %parça operasyonlarının makinelerde gerçekleşme süreleri >>
part_operation_machine matrisi ile uyumlu
```

```
part_operation_list=zeros(part,sum(operations));
t=1;
```

```
for i=1:1:part %data matrislerinin birinci satır birinci parça-birinci operasyon, ikinci
satır birinci parça-ikinci operasyon >> bu ilişkiyi içeren liste oluştur
```

```
for j=1:1:operations(i)
```

```

        part_operation_list(i,j)=t;
        t=t+1;
    end
end

part_min=1;
part_max=3;
penalty_p=500;
machine_min=1;
machine_max=5;
penalty_m=500;
penalty_o=500;
penalty_t=500;

nvars=part+machine+2*sum(operations);
lb=zeros(1,nvars);
ub=ones(1,nvars);

pop=50;      %population size
gen=200;     %generation size
elite_count=10; %elite count number
xover_fract=0.9; %crossover ratio
mutation_fract=0.15; %mutation ratio

init_pop=rand(pop,nvars);
k=1;
for i=1:1:part
    init_pop(:,(part+machine+sum(operations)+k))=zeros(pop,1);
    k=k+operations(i);
end

options=gaoptimset('InitialPopulation',init_pop,'PopulationSize',pop,'Generations',gen,'EliteCount',elite_count,'CrossoverFcn',@crossoverscattered,'CrossoverFraction',xover_fract,'MutationFcn',{@mutationadaptfeasible},'SelectionFcn',{@selectiontournament,5},'PlotFcns',{@gaplotbestf});
[x,fval]=ga(@objective_function,nvars,[],[],[],[],lb,ub,[],options);

[ x_decoded,x_orders ] = chromosome_decode( x );
[cell_part,cell_machine,part_operation_machine_order] = assignments(
x_decoded,x_orders );
[total_part_ee,end_time,penalty_part,penalty_machine,part_operation_machine_order_transport,total_void,void_cell,efficacy] =
output_calculations(cell_part,cell_machine,part_operation_machine_order);
cell_part
cell_machine
void_cell
part_operation_machine_order_transport
end_time
total_part_ee
total_void
toc

```

**CHROMOSOME DECODE**

```

function [ x_decoded,x_orders ] = chromosome_decode( x )
%KROMOZOM_DONUSTUR
%kromozom yapısı, rassal sayılardan parça operasyon makine sıra bilgisine dönüştürülür.

global part machine cell operations part_operation_list part_operation_machine
part_operation_durations nvars part_min part_max machine_min machine_max penalty_p
penalty_m penalty_o penalty_t

x1_temp=zeros(1,part+machine);

x2_temp=zeros(1,sum(operations));

x1_pre=x(1:part+machine);

x2_pre=x(part+machine+1:part+machine+sum(operations));

for i=1:1:(part+machine)           %makine ve parçaların hangi hücelere atandığını bul
    for j=1:1:cell
        if x1_pre(i)<=(j/cell)
            x1_temp(i)=j;
            break
        end
    end
end

for i=1:1:sum(operations)
    proper_machines=size(find(part_operation_machine(i,:)),2);
    %part_operation_machine satırlarında sıfır olmayan eleman sayıları >> uygun makine sayıları

    for j=1:1:proper_machines
        if x2_pre(i)<=(j/proper_machines)
            x2_temp(i)=part_operation_machine(i,j);
            break
        end
    end
end

x_decoded=[x1_temp x2_temp];

x_orders=x(part+machine+sum(operations)+1:nvars);
end

```

## ASSIGNMENTS

```

function [cell_part,cell_machine,part_operation_machine_order] = assignments(
x_decoded,x_orders )
%ATAMA_HESAPLA
%decode edilmiş kromozomdan hücelere atama ve işlem-makine atamalarını hesaplama

global part machine cell operations part_operation_list part_operation_machine
part_operation_durations nvars part_min part_max machine_min machine_max penalty_p
penalty_m penalty_o penalty_t

cell_part=zeros(cell,part);
cell_machine=zeros(cell,machine);
temp=zeros(sum(operations),2);
temp1=zeros(sum(operations),1);

for k=1:1:cell
    t=1;
    for i=1:1:part
        if x_decoded(i)==k
            cell_part(k,t)=i;    %hüce-parça matrisi oluştur >> satırlar hüce, içerik parça
            t=t+1;
        end
    end
end

for k=1:1:cell
    t=1;
    for i=part+1:1:part+machine
        if x_decoded(i)==k
            cell_machine(k,t)=i-part;    %hüce-makine matrisi oluştur >> satırlar hüce,
            içerik makine
            t=t+1;
        end
    end
end

t=1;
for i=1:1:part
    for j=1:1:operations(i)
        temp(t,:)= [i j];
        t=t+1;
    end
end

part_operation_machine_pre=[temp
x_decoded(part+machine+1:part+machine+sum(operations))' x_orders'];    %parça,
operasyon, makine, sıra matrisi >> sıraya dizilmemiş halde
part_operation_machine_ordered=sortrows(part_operation_machine_pre,[3,4]);

```



```
part_operation_machine_assignment=part_operation_machine_ordered((1:sum(operations)),(1:3));
```

```
temp1(1)=1;
for i=2:1:sum(operations)
    if part_operation_machine_assignment(i,3)==part_operation_machine_assignment(i-1,3)
        temp1(i)=temp1(i-1)+1;
    else
        temp1(i)=1;
    end
end
```

```
part_operation_machine_order=[part_operation_machine_assignment temp1];
%parça, işlem, makine, sıra bilgisi içeren matris
```

```
end
```

## OUTPUT CALCULATIONS

```
function
```

```
[total_part_ee,end_time,penalty_part,penalty_machine,part_operation_machine_order_transport,total_void,void_cell,efficacy] =
```

```
output_calculations(cell_part,cell_machine,part_operation_machine_order)
```

```
%yapılan atamalara göre çıktı değerleri hesaplama
```

```
global part machine cell operations part_operation_list part_operation_machine
part_operation_durations nvars part_min part_max machine_min machine_max penalty_p
penalty_m penalty_o penalty_t
```

```
% atanma zamanları hesaplama
```

```
a=max(part_operation_machine_order(:,4)); %makinelere atanmış olan en fazla operasyon sayısı
```

```
b=max(operations); %parçalara ait en fazla operation sayısı
```

```
part_operation_flag=zeros(part,b); %parça operation uygunluk flags
```

```
machine_order_flag=zeros(machine,a); %makine sıra uygunluk flags
```

```
part_operation_flag(:,1)=ones(part,1); %ilk operation her zaman uygun
```

```
machine_order_flag(:,1)=ones(machine,1); %ilk sıra her zaman uygun
```

```
machine_avail_time=zeros(machine,1); %makine ne zaman uygun
```

```
part_avail_time=zeros(part,1); %parça ne zaman uygun
```

```
temp2=sortrows(part_operation_machine_order,[4,3]);
```

```
count=sum(operations);
```

```
count1=0;
```

```
found=0;
```

```
while (count~=0 && count1~=sum(operations))
```

```
    for i=1:1:a
```

```

for j=1:1:machine
    for k=1:1:sum(operations)
        if (temp2(k,3)==j && temp2(k,4)==i)    %ilgili makine'nin incelenen sırasında
            hangi part/order ataması var >>
                p=temp2(k,1);
                o=temp2(k,2);
                found=1;
                break
        end
    end

    if (found==1 && part_operation_flag(p,o)==1 && machine_order_flag(j,i)==1)
        %ilgili makine sırasındaki parça/operation uygun mu >> makina boş mu, önceki operation
        bitti mi kontrolü
            t1=machine_avail_time(j);
            t2=part_avail_time(p);
            t3=max(t1,t2);
            process_time=part_operation_durations(part_operation_list(p,o),j);
            machine_avail_time(j)=process_time+t3;    %işlem zamanları güncelle
            part_avail_time(p)=process_time+t3;

            part_operation_flag(p,o)=0;    %tekrarı önlemek için flag güncelle
            machine_order_flag(j,i)=0;

            part_operation_flag(p,o+1)=1;    %bir sonraki operasyon ve sıra için flag
güncelle >>
            machine_order_flag(j,i+1)=1;

            count=count-1;
        end
        found=0;
    end
end

count1=count1+1;

end

if count1==sum(operations)
    end_time=penalty_o;
else
    end_time=max(machine_avail_time);
end

%hücrelerdeki max/min atanmaları hesaplama
penalty_part=zeros(cell,1);
penalty_machine=zeros(cell,1);
for i=1:1:cell
    tt1=cell_part(i,:);
    tt2=cell_machine(i,:);
    ttt1=size(find(tt1),2);

```

```

ttt2=size(find(tt2),2);

if ( ttt1<part_min || ttt1>part_max )
    penalty_part(i)=penalty_p;
end

if ( ttt2<machine_min || ttt2>machine_max )
    penalty_machine(i)=penalty_m;
end
end

%tasimaları hesapla
temp3=part_operation_machine_order;
part_cell=zeros(part,2);
machine_cell=zeros(machine,2);
part_ee=zeros(sum(operations),1);

t=1;
for i=1:1:cell
    for j=1:1:part
        if (cell_part(i,j)~=0)
            part_cell(t,1)=cell_part(i,j);
            part_cell(t,2)=i;
            t=t+1;
        end
    end
end

t=1;
for i=1:1:cell
    for j=1:1:machine
        if (cell_machine(i,j)~=0)
            machine_cell(t,1)=cell_machine(i,j);
            machine_cell(t,2)=i;
            t=t+1;
        end
    end
end

part_cell=sortrows(part_cell,1);
machine_cell=sortrows(machine_cell,1);

for i=1:1:sum(operations)
    prt=temp3(i,1);
    mchn=temp3(i,3);
    if (part_cell(prt,2)~=machine_cell(mchn,2))
        part_ee(i)=1;
    end
end

part_operation_machine_order_transport=[part_operation_machine_order part_ee];

```

```

total_part_ee=sum(part_ee);

part_machine=[part_operation_machine_order(:,1) part_operation_machine_order(:,3)];
void_cell=zeros(1,cell);
void_cell_pre=zeros(1,cell);
cell_operat_max=zeros(1,cell);

for i=1:1:cell

    no_machine_checked=size(find(cell_machine(i,:),2),2);
    no_part_checked=size(find(cell_part(i,:),2),2);

    if ((no_machine_checked==0)||no_part_checked==0)
        void_cell_pre(i)=0;
    else
        for j=1:1:no_machine_checked
            for k=1:1:no_part_checked
                part1=cell_part(i,k);
                mach1=cell_machine(i,j);
                pm_temp=part_machine;
                pm_temp(:,1)=pm_temp(:,1)-part1;
                pm_temp(:,2)=pm_temp(:,2)-mach1;
                for t=1:1:sum(operations)
                    if((pm_temp(t,1)==0)&&(pm_temp(t,2)==0))
                        void_cell_pre(i)=void_cell_pre(i)+1;
                        break
                    end
                end
            end
        end
    end
end

void_cell(i)=(no_machine_checked*no_part_checked)-void_cell_pre(i);

end

total_void=sum(void_cell);

end

```

### OBJECTIVE FUNCTION

```

function [ obj ] = objective_function( x )

[ x_decoded,x_orders ]=chromosome_decode( x );

[cell_part,cell_machine,part_operation_machine_order]=assignments(
x_decoded,x_orders );

```

```
[total_part_ee,end_time,penalty_part,penalty_machine,part_operation_machine_order_transport,total_void,void_cell,efficacy]=output_calculations(cell_part,cell_machine,part_operation_machine_order);
```

```
obj=total_void+total_part_ee+end_time+sum(penalty_part)+sum(penalty_machine);
```

```
end
```

**Ek Açıklama D: Uygulama problemi verileri**

|   | <b>Parça no.</b> | <b>İşlem no.</b> | <b>İşlem Adı</b> | <b>Alternatif Tezgahlar</b> | <b>İşlem Süresi (dk)</b> |
|---|------------------|------------------|------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 1 | 1                |                  | Tornalama        | 1, 2, 9                     | 35, 46, 38               |
|   | 2                |                  | Azdırma          | 4, 5, 7                     | 42, 35, 50               |
|   | 3                |                  | Yıkama           | 8, 14                       | 7, 9                     |
|   | 4                |                  | Raspalama        | 3, 6                        | 8, 10                    |
|   | 5                |                  | Karbürasyon      | 13, 15                      | 15, 18                   |
|   | 6                |                  | Taşlama          | 16, 18, 21                  | 34, 36, 42               |
|   | 7                |                  | Markalama        | 20, 22                      | 10, 12                   |
| 2 | 1                |                  | Honlama          | 17, 19                      | 38, 45                   |
|   | 2                |                  | Burç Çakma       | 23, 24                      | 10, 15                   |
|   | 3                |                  | Burç Tornalama   | 1, 2                        | 6, 9                     |
|   | 4                |                  | Yıkama           | 8, 14                       | 23, 25                   |
| 3 | 1                |                  | Tornalama        | 1, 9                        | 10,15                    |
|   | 2                |                  | Azdırma          | 4, 5, 7                     | 34, 36, 43               |
|   | 3                |                  | Yıkama           | 8, 14                       | 12, 14                   |
|   | 4                |                  | Frezeleme        | 10, 11, 12                  | 12, 16, 18               |
|   | 5                |                  | Raspalama        | 3, 6                        | 4, 6                     |
|   | 6                |                  | Yıkama           | 8, 14                       | 10, 13                   |
| 4 | 1                |                  | Karbürasyon      | 13, 15                      | 15, 17                   |
|   | 2                |                  | Taşlama          | 16, 18, 21                  | 5, 8, 9                  |
|   | 3                |                  | Markalama        | 20, 22                      | 4, 7                     |
|   | 4                |                  | Honlama          | 17, 19                      | 11, 16                   |
|   | 5                |                  | Burç Çakma       | 23, 24                      | 5, 8                     |
|   | 6                |                  | Burç Tornalama   | 1, 9                        | 14, 16                   |
|   | 7                |                  | Yıkama           | 8, 14                       | 10, 11                   |
| 5 | 1                |                  | Frezeleme        | 10, 11, 12                  | 6, 8, 11                 |
|   | 2                |                  | Matkapla Delme   | 20, 22                      | 3, 5                     |
|   | 3                |                  | Tornalama        | 1, 2, 9                     | 7, 9, 10                 |
|   | 4                |                  | Frezeleme        | 10, 12                      | 14, 17                   |
|   | 5                |                  | Kademeli Delme   | 20, 22                      | 3, 4                     |
|   | 6                |                  | Diş Çekme        | 10, 11                      | 8, 9                     |
|   | 7                |                  | Yıkama           | 8, 14                       | 10, 12                   |
| 6 | 1                |                  | Taşlama          | 16, 18, 21                  | 24, 32, 29               |
|   | 2                |                  | Yüzey Frezeleme  | 10, 11, 12                  | 16, 21, 23               |
|   | 3                |                  | Delik Delme      | 20, 22                      | 5, 7                     |
|   | 4                |                  | Çentik Açma      | 1, 9                        | 3, 2                     |
|   | 5                |                  | Burç Çakma       | 23, 24                      | 4, 6                     |
|   | 6                |                  | Honlama          | 17, 19                      | 11, 14                   |
| 7 | 1                |                  | Frezeleme        | 10, 11                      | 60, 52                   |
|   | 2                |                  | Matkapla Delme   | 20, 22                      | 10, 12                   |
|   | 3                |                  | Tornalama        | 1, 9                        | 24, 35                   |
|   | 4                |                  | Kademeli Delme   | 20, 22                      | 5, 6                     |
|   | 5                |                  | Yıkama           | 8, 14                       | 11, 12                   |

**Ek Açıklama D: Uygulama problemi verileri (devam)**

| Parça no. | İşlem no. | İşlem Adı              | Alternatif Tezgahlar | İşlem Süresi (dk) |
|-----------|-----------|------------------------|----------------------|-------------------|
| 8         | 1         | Yüzey Taşlama          | 16, 18, 21           | 4, 8, 6           |
|           | 2         | Açılı Yüzey Frezeleme  | 10, 11               | 25, 18            |
|           | 3         | Pah Kırma              | 20, 22               | 5, 8              |
|           | 4         | Tornalama              | 2, 9                 | 17, 22            |
|           | 5         | Burç Çakma             | 23, 24               | 6, 8              |
|           | 6         | Finiş Taşlama          | 16, 18               | 11, 13            |
|           | 7         | Honlama                | 17, 19               | 10, 14            |
|           | 8         | Yıkama                 | 8, 14                | 14, 12            |
| 9         | 1         | Kaba Frezeleme         | 10, 11, 12           | 22, 18, 26        |
|           | 2         | Delik Delme            | 20, 22               | 9, 10             |
|           | 3         | Finiş Frezeleme        | 10, 12               | 16, 17            |
|           | 4         | Pah Kırma              | 20, 22               | 5, 3              |
|           | 5         | Diş Çekme              | 10, 11               | 6, 7              |
|           | 6         | Delik Delme            | 20, 22               | 11, 9             |
|           | 7         | Yıkama                 | 8, 14                | 12, 14            |
|           | 8         | Honlama                | 17, 19               | 10, 15            |
|           | 9         | Tapa Çakma             | 10, 12               | 5, 8              |
| 10        | 1         | Parça Greydeleme       | 10, 11               | 17, 15            |
|           | 2         | Tornalama              | 1, 2, 9              | 27, 35, 36        |
|           | 3         | Frezeleme              | 10, 11, 12           | 22, 18, 24        |
|           | 4         | Flanş Delikleri İşleme | 1, 2                 | 24, 30            |
|           | 5         | Yağ Delikleri Delme    | 20, 22               | 10, 15            |
|           | 6         | Taşlama                | 16, 18, 21           | 8, 12, 15         |
|           | 7         | Yıkama                 | 8, 14                | 11, 13            |
| 11        | 1         | Tornalama              | 1, 2, 9              | 17, 22, 25        |
|           | 2         | Azdırma                | 4, 5, 7              | 10, 15, 13        |
|           | 3         | Yıkama                 | 8, 14                | 13, 11            |
|           | 4         | Raspalama              | 3, 6                 | 8, 13             |
|           | 5         | Karbürasyon            | 13, 15               | 11, 14            |
|           | 6         | Taşlama                | 16, 18, 21           | 6, 8, 9           |
|           | 7         | Burç Tornalama         | 1, 9                 | 21, 26            |
|           | 8         | Yıkama                 | 8, 14                | 5, 9              |
| 12        | 1         | Tornalama              | 1, 2, 9              | 6, 7, 11          |
|           | 2         | Azdırma                | 4, 5, 7              | 16, 18, 14        |
|           | 3         | Yıkama                 | 8, 14                | 4, 7              |
|           | 4         | Raspalama              | 3, 6                 | 5, 9              |
|           | 5         | Taşlama                | 16, 18, 21           | 26, 24, 28        |

**Ek Açıklama E:** Uygulama problemi için deney tasarımı planı

$$(w_{HDE}, w_{HiB}, w_{Cenb}) = (1, 1, 1)$$

| Deney no. | Popülasyon Büyüklüğü | Çaprazlama Olasılığı | Mutasyon olasılığı | Çaprazlama olasılığı | Seçim Kuralı |               | Tekrar 1 | Tekrar 2      | Ortalama |       |
|-----------|----------------------|----------------------|--------------------|----------------------|--------------|---------------|----------|---------------|----------|-------|
| 1         | 2000                 | Tek nokta            | 0.05               | 0.7                  | Rulet        | (41, 30, 195) | 266      | (38, 28, 190) | 256      | 261   |
| 2         | 2000                 | Tek nokta            | 0.10               | 0.8                  | Stokastik    | (41, 23, 197) | 261      | (48, 21, 192) | 261      | 261   |
| 3         | 2000                 | Tek nokta            | 0.15               | 0.9                  | Turnuva      | (48, 23, 215) | 286      | (43, 49, 217) | 309      | 297,5 |
| 4         | 2000                 | İki nokta            | 0.05               | 0.7                  | Stokastik    | (47, 20, 187) | 254      | (42, 24, 171) | 237      | 245,5 |
| 5         | 2000                 | İki nokta            | 0.10               | 0.8                  | Turnuva      | (50, 24, 211) | 285      | (30, 23, 259) | 312      | 298,5 |
| 6         | 2000                 | İki nokta            | 0.15               | 0.9                  | Rulet        | (41, 31, 187) | 259      | (32, 45, 229) | 306      | 282,5 |
| 7         | 2000                 | Dağıtık              | 0.05               | 0.8                  | Rulet        | (27, 41, 170) | 238      | (24, 43, 178) | 245      | 241,5 |
| 8         | 2000                 | Dağıtık              | 0.10               | 0.9                  | Stokastik    | (41, 31, 178) | 250      | (39, 31, 187) | 257      | 253,5 |
| 9         | 2000                 | Dağıtık              | 0.15               | 0.7                  | Turnuva      | (28, 51, 217) | 296      | (41, 27, 205) | 273      | 284,5 |
| 10        | 3000                 | Tek nokta            | 0.05               | 0.9                  | Turnuva      | (37, 43, 203) | 283      | (31, 34, 201) | 266      | 274,5 |
| 11        | 3000                 | Tek nokta            | 0.10               | 0.7                  | Rulet        | (35, 33, 204) | 272      | (40, 21, 182) | 243      | 257,5 |
| 12        | 3000                 | Tek nokta            | 0.15               | 0.8                  | Stokastik    | (46, 22, 173) | 241      | (53, 21, 222) | 296      | 268,5 |
| 13        | 3000                 | İki nokta            | 0.05               | 0.8                  | Turnuva      | (42, 20, 190) | 252      | (20, 41, 194) | 255      | 253,5 |
| 14        | 3000                 | İki nokta            | 0.10               | 0.9                  | Rulet        | (26, 43, 176) | 245      | (39, 25, 191) | 255      | 250   |
| 15        | 3000                 | İki nokta            | 0.15               | 0.7                  | Stokastik    | (46, 14, 177) | 237      | (45, 19, 182) | 246      | 241,5 |
| 16        | 3000                 | Dağıtık              | 0.05               | 0.9                  | Stokastik    | (37, 29, 170) | 236      | (39, 30, 184) | 253      | 244,5 |
| 17        | 3000                 | Dağıtık              | 0.10               | 0.7                  | Turnuva      | (35, 38, 181) | 254      | (24, 42, 183) | 269      | 261,5 |
| 18        | 3000                 | Dağıtık              | 0.15               | 0.8                  | Rulet        | (27, 41, 170) | 238      | (43, 20, 165) | 236      | 237   |



**Ek Açıklama E:** Uygulama problemi için deney tasarımı planı (devam)

$$(w_{HDE}, w_{HiB}, w_{Cenb}) = (1, 1, 1/2)$$

| Deney no. | Popülasyon Büyüklüğü | Çaprazlama Olasılığı | Mutasyon olasılığı | Çaprazlama olasılığı | Seçim Kuralı | Tekrar 1      | Tekrar 2 | Ortalama      |       |        |
|-----------|----------------------|----------------------|--------------------|----------------------|--------------|---------------|----------|---------------|-------|--------|
| 1         | 2000                 | Tek nokta            | 0.05               | 0.7                  | Rulet        | (38, 43, 169) | 165,5    | (45, 22, 200) | 167,0 | 166,25 |
| 2         | 2000                 | Tek nokta            | 0.10               | 0.8                  | Stokastik    | (40, 27, 180) | 157,0    | (40, 32, 180) | 162,0 | 159,50 |
| 3         | 2000                 | Tek nokta            | 0.15               | 0.9                  | Turnuva      | (30, 34, 194) | 161,0    | (24, 49, 196) | 171,0 | 166,00 |
| 4         | 2000                 | İki nokta            | 0.05               | 0.7                  | Stokastik    | (38, 42, 168) | 164,0    | (59, 14, 223) | 184,5 | 174,25 |
| 5         | 2000                 | İki nokta            | 0.10               | 0.8                  | Turnuva      | (53, 19, 207) | 175,5    | (35, 34, 213) | 175,5 | 175,50 |
| 6         | 2000                 | İki nokta            | 0.15               | 0.9                  | Rulet        | (24, 37, 215) | 168,5    | (55, 18, 212) | 179,0 | 173,75 |
| 7         | 2000                 | Dağıtık              | 0.05               | 0.8                  | Rulet        | (50, 22, 183) | 163,5    | (38, 43, 169) | 165,5 | 164,50 |
| 8         | 2000                 | Dağıtık              | 0.10               | 0.9                  | Stokastik    | (22, 35, 171) | 142,5    | (29, 41, 183) | 161,5 | 152,00 |
| 9         | 2000                 | Dağıtık              | 0.15               | 0.7                  | Turnuva      | (51, 20, 191) | 166,5    | (24, 37, 217) | 169,5 | 168,00 |
| 10        | 3000                 | Tek nokta            | 0.05               | 0.9                  | Turnuva      | (53, 19, 207) | 175,5    | (31, 36, 176) | 155,0 | 165,25 |
| 11        | 3000                 | Tek nokta            | 0.10               | 0.7                  | Rulet        | (25, 43, 185) | 160,5    | (30, 34, 201) | 168,5 | 164,50 |
| 12        | 3000                 | Tek nokta            | 0.15               | 0.8                  | Stokastik    | (40, 27, 180) | 157,0    | (31, 36, 176) | 155,0 | 156,00 |
| 13        | 3000                 | İki nokta            | 0.05               | 0.8                  | Turnuva      | (24, 49, 196) | 171,0    | (52, 17, 184) | 161,0 | 166,00 |
| 14        | 3000                 | İki nokta            | 0.10               | 0.9                  | Rulet        | (35, 34, 213) | 175,5    | (35, 28, 232) | 179,0 | 177,25 |
| 15        | 3000                 | İki nokta            | 0.15               | 0.7                  | Stokastik    | (30, 24, 201) | 164,5    | (31, 38, 180) | 159,0 | 161,75 |
| 16        | 3000                 | Dağıtık              | 0.05               | 0.9                  | Stokastik    | (32, 32, 187) | 157,5    | (17, 45, 166) | 145,0 | 151,25 |
| 17        | 3000                 | Dağıtık              | 0.10               | 0.7                  | Turnuva      | (45, 22, 200) | 167,0    | (24, 49, 196) | 171,0 | 169,00 |
| 18        | 3000                 | Dağıtık              | 0.15               | 0.8                  | Rulet        | (37, 27, 182) | 155,0    | (27, 37, 184) | 159,0 | 157,00 |

**Ek Açıklama E:** Uygulama problemi için deney tasarımı planı (devam)

$$(w_{HDE}, w_{HiB}, w_{Cenb}) = (1, 1, 1/4)$$

| Deney no. | Popülasyon Büyüklüğü | Çaprazlama Olasılığı | Mutasyon olasılığı | Çaprazlama olasılığı | Seçim Kuralı | Tekrar 1      |        | Tekrar 2      |        | Ortalama |
|-----------|----------------------|----------------------|--------------------|----------------------|--------------|---------------|--------|---------------|--------|----------|
| 1         | 2000                 | Tek nokta            | 0.05               | 0.7                  | Rulet        | (26, 36, 181) | 107,25 | (34, 28, 164) | 103,00 | 105,125  |
| 2         | 2000                 | Tek nokta            | 0.10               | 0.8                  | Stokastik    | (29, 27, 217) | 110,25 | (49, 21, 198) | 119,50 | 114,875  |
| 3         | 2000                 | Tek nokta            | 0.15               | 0.9                  | Turnuva      | (36, 35, 193) | 119,25 | (45, 25, 195) | 118,75 | 119,000  |
| 4         | 2000                 | İki nokta            | 0.05               | 0.7                  | Stokastik    | (26, 43, 187) | 115,75 | (22, 44, 188) | 113,00 | 114,375  |
| 5         | 2000                 | İki nokta            | 0.10               | 0.8                  | Turnuva      | (26, 40, 270) | 133,50 | (45, 25, 195) | 118,75 | 126,125  |
| 6         | 2000                 | İki nokta            | 0.15               | 0.9                  | Rulet        | (45, 25, 195) | 118,75 | (45, 26, 185) | 117,25 | 118,000  |
| 7         | 2000                 | Dağıtık              | 0.05               | 0.8                  | Rulet        | (37, 23, 174) | 103,50 | (36, 35, 193) | 119,25 | 111,375  |
| 8         | 2000                 | Dağıtık              | 0.10               | 0.9                  | Stokastik    | (31, 41, 203) | 122,75 | (21, 36, 174) | 100,50 | 111,625  |
| 9         | 2000                 | Dağıtık              | 0.15               | 0.7                  | Turnuva      | (25, 29, 178) | 98,50  | (31, 39, 202) | 120,50 | 109,500  |
| 10        | 3000                 | Tek nokta            | 0.05               | 0.9                  | Turnuva      | (41, 26, 207) | 108,75 | (42, 26, 209) | 120,25 | 114,500  |
| 11        | 3000                 | Tek nokta            | 0.10               | 0.7                  | Rulet        | (37, 26, 188) | 110,00 | (44, 23, 169) | 109,25 | 109,625  |
| 12        | 3000                 | Tek nokta            | 0.15               | 0.8                  | Stokastik    | (44, 21, 227) | 121,75 | (41, 26, 207) | 118,75 | 120,250  |
| 13        | 3000                 | İki nokta            | 0.05               | 0.8                  | Turnuva      | (43, 32, 255) | 138,75 | (47, 17, 169) | 106,25 | 122,500  |
| 14        | 3000                 | İki nokta            | 0.10               | 0.9                  | Rulet        | (20, 44, 210) | 116,50 | (46, 30, 184) | 122,00 | 119,250  |
| 15        | 3000                 | İki nokta            | 0.15               | 0.7                  | Stokastik    | (33, 31, 185) | 110,25 | (36, 24, 185) | 106,25 | 108,250  |
| 16        | 3000                 | Dağıtık              | 0.05               | 0.9                  | Stokastik    | (32, 30, 178) | 106,50 | (35, 28, 172) | 106,00 | 106,250  |
| 17        | 3000                 | Dağıtık              | 0.10               | 0.7                  | Turnuva      | (35, 24, 195) | 107,75 | (26, 43, 187) | 115,75 | 111,750  |
| 18        | 3000                 | Dağıtık              | 0.15               | 0.8                  | Rulet        | (20, 41, 166) | 102,50 | (34, 28, 164) | 103,00 | 102,750  |

**Ek Açıklama E:** Uygulama problemi için deney tasarımı planı (devam)

$$(w_{HDE}, w_{HiB}, w_{Cenb}) = (1, 1, 1/8)$$

| Deney no. | Popülasyon Büyüklüğü | Çaprazlama Olasılığı | Mutasyon olasılığı | Çaprazlama olasılığı | Seçim Kuralı | Tekrar 1      |         | Tekrar 2      |         | Ortalama |
|-----------|----------------------|----------------------|--------------------|----------------------|--------------|---------------|---------|---------------|---------|----------|
| 1         | 2000                 | Tek nokta            | 0.05               | 0.7                  | Rulet        | (37, 22, 218) | 86,250  | (41, 22, 213) | 89,625  | 87,9375  |
| 2         | 2000                 | Tek nokta            | 0.10               | 0.8                  | Stokastik    | (50, 17, 183) | 89,875  | (41, 29, 216) | 97,500  | 93,6875  |
| 3         | 2000                 | Tek nokta            | 0.15               | 0.9                  | Turnuva      | (36, 30, 230) | 94,750  | (48, 26, 216) | 101,000 | 97,8750  |
| 4         | 2000                 | İki nokta            | 0.05               | 0.7                  | Stokastik    | (44, 16, 204) | 85,500  | (30, 24, 198) | 78,750  | 82,1250  |
| 5         | 2000                 | İki nokta            | 0.10               | 0.8                  | Turnuva      | (26, 38, 210) | 90,250  | (31, 29, 262) | 92,750  | 91,5000  |
| 6         | 2000                 | İki nokta            | 0.15               | 0.9                  | Rulet        | (29, 44, 195) | 97,375  | (30, 45, 198) | 99,750  | 98,5625  |
| 7         | 2000                 | Dağıtık              | 0.05               | 0.8                  | Rulet        | (32, 28, 218) | 87,250  | (20, 43, 200) | 88,000  | 87,6250  |
| 8         | 2000                 | Dağıtık              | 0.10               | 0.9                  | Stokastik    | (39, 18, 208) | 83,000  | (26, 38, 204) | 89,500  | 86,2500  |
| 9         | 2000                 | Dağıtık              | 0.15               | 0.7                  | Turnuva      | (34, 32, 192) | 90,000  | (32, 28, 218) | 87,250  | 88,6250  |
| 10        | 3000                 | Tek nokta            | 0.05               | 0.9                  | Turnuva      | (34, 29, 209) | 89,125  | (27, 33, 247) | 90,875  | 90,0000  |
| 11        | 3000                 | Tek nokta            | 0.10               | 0.7                  | Rulet        | (33, 25, 188) | 81,500  | (20, 43, 200) | 88,000  | 84,7500  |
| 12        | 3000                 | Tek nokta            | 0.15               | 0.8                  | Stokastik    | (36, 30, 287) | 101,875 | (23, 37, 222) | 87,750  | 94,8125  |
| 13        | 3000                 | İki nokta            | 0.05               | 0.8                  | Turnuva      | (59, 15, 198) | 98,750  | (37, 22, 176) | 81,000  | 89,8750  |
| 14        | 3000                 | İki nokta            | 0.10               | 0.9                  | Rulet        | (33, 25, 207) | 83,875  | (40, 26, 244) | 96,500  | 90,1875  |
| 15        | 3000                 | İki nokta            | 0.15               | 0.7                  | Stokastik    | (41, 21, 177) | 84,125  | (46, 25, 191) | 94,875  | 89,5000  |
| 16        | 3000                 | Dağıtık              | 0.05               | 0.9                  | Stokastik    | (43, 21, 174) | 85,750  | (28, 22, 222) | 77,750  | 81,7500  |
| 17        | 3000                 | Dağıtık              | 0.10               | 0.7                  | Turnuva      | (27, 32, 215) | 85,875  | (30, 24, 198) | 78,750  | 82,3125  |
| 18        | 3000                 | Dağıtık              | 0.15               | 0.8                  | Rulet        | (30, 36, 179) | 88,375  | (39, 18, 208) | 83,000  | 85,6875  |

**Ek Açıklama F: Varyans analizi sonuçları**

$$(W_{HDE}, W_{HiB}, W_{Cenb}) = (1, 1, 1)$$

Analysis of Variance for ortalama, using Adjusted SS for Tests

| Source         | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F     | P     |
|----------------|----|--------|--------|--------|-------|-------|
| pop-buy        | 1  | 1042,7 | 1042,7 | 1042,7 | 10,20 | 0,013 |
| caprazlama     | 2  | 792,2  | 792,2  | 396,1  | 3,88  | 0,067 |
| mutasyon       | 2  | 718,5  | 718,5  | 359,3  | 3,52  | 0,080 |
| caprazlama-ola | 2  | 248,9  | 248,9  | 124,4  | 1,22  | 0,345 |
| secim          | 2  | 2452,5 | 2452,5 | 1226,3 | 12,00 | 0,004 |
| Error          | 8  | 817,4  | 817,4  | 102,2  |       |       |
| Total          | 17 | 6072,3 |        |        |       |       |

S = 10,1084    R-Sq = 86,54%    R-Sq(adj) = 71,39%

$$(W_{HDE}, W_{HiB}, W_{Cenb}) = (1, 1, 1/2)$$

Analysis of Variance for ortalama, using Adjusted SS for Tests

| Source         | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F     | P     |
|----------------|----|--------|--------|--------|-------|-------|
| pop-buy        | 1  | 56,00  | 56,00  | 56,00  | 2,88  | 0,128 |
| caprazlama     | 2  | 405,81 | 405,81 | 202,91 | 10,44 | 0,006 |
| mutasyon       | 2  | 20,15  | 20,15  | 10,07  | 0,52  | 0,614 |
| caprazlama-ola | 2  | 56,65  | 56,65  | 28,32  | 1,46  | 0,289 |
| secim          | 2  | 301,08 | 301,08 | 150,54 | 7,75  | 0,013 |
| Error          | 8  | 155,47 | 155,47 | 19,43  |       |       |
| Total          | 17 | 995,16 |        |        |       |       |

S = 4,40831    R-Sq = 84,38%    R-Sq(adj) = 66,80%

$$(W_{HDE}, W_{HiB}, W_{Cenb}) = (1, 1, 1/4)$$

Analysis of Variance for ortalama, using Adjusted SS for Tests

| Source         | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F    | P     |
|----------------|----|--------|--------|--------|------|-------|
| pop-buy        | 1  | 12,29  | 12,29  | 12,29  | 0,86 | 0,380 |
| caprazlama     | 2  | 255,07 | 255,07 | 127,54 | 8,96 | 0,009 |
| mutasyon       | 2  | 34,40  | 34,40  | 17,20  | 1,21 | 0,348 |
| caprazlama-ola | 2  | 140,34 | 140,34 | 70,17  | 4,93 | 0,040 |
| secim          | 2  | 124,88 | 124,88 | 62,44  | 4,39 | 0,052 |
| Error          | 8  | 113,87 | 113,87 | 14,23  |      |       |
| Total          | 17 | 680,86 |        |        |      |       |

S = 3,77279    R-Sq = 83,28%    R-Sq(adj) = 64,46%

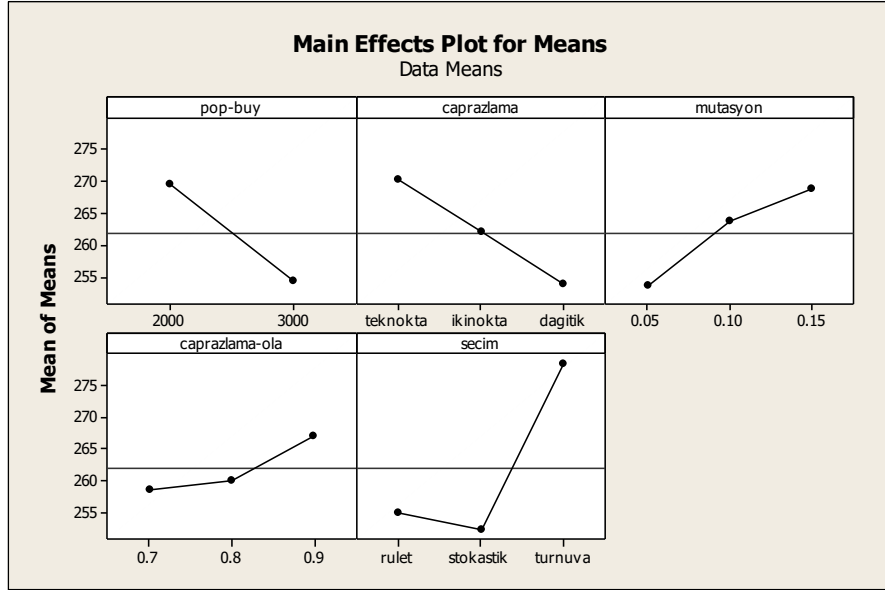
$$(W_{HDE}, W_{HiB}, W_{Cenb}) = (1, 1, 1/8)$$

Analysis of Variance for ortalama, using Adjusted SS for Tests

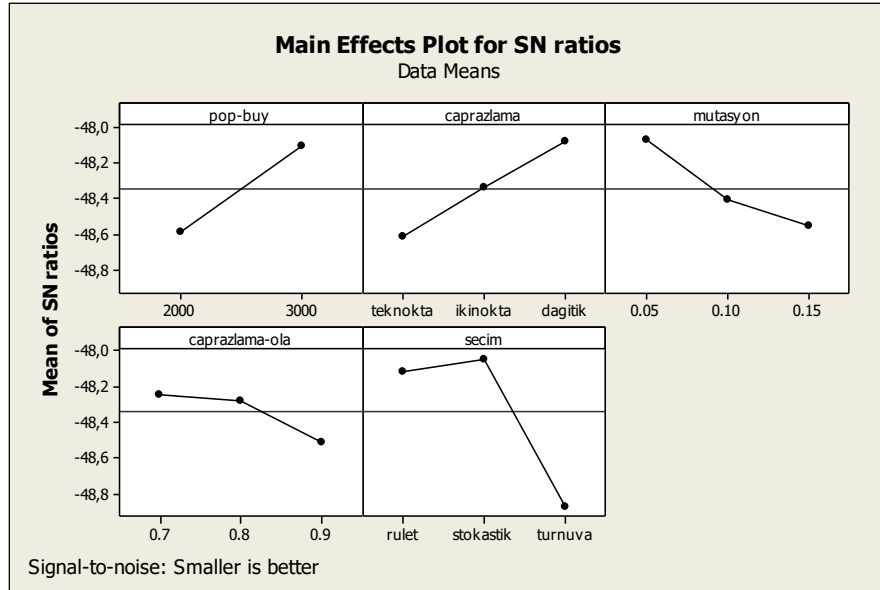
| Source         | DF | Seq SS  | Adj SS  | Adj MS | F     | P     |
|----------------|----|---------|---------|--------|-------|-------|
| pop-buy        | 1  | 35,596  | 35,596  | 35,596 | 7,20  | 0,028 |
| caprazlama     | 2  | 126,605 | 126,605 | 63,302 | 12,80 | 0,003 |
| mutasyon       | 2  | 114,533 | 114,533 | 57,266 | 11,58 | 0,004 |
| caprazlama-ola | 2  | 91,414  | 91,414  | 45,707 | 9,24  | 0,008 |
| secim          | 2  | 12,164  | 12,164  | 6,082  | 1,23  | 0,342 |
| Error          | 8  | 39,574  | 39,574  | 4,947  |       |       |
| Total          | 17 | 419,887 |         |        |       |       |

S = 2,22414    R-Sq = 90,58%    R-Sq(adj) = 79,97%

**Ek Açıklama G:** Farklı ağırlıklar için a) ortalama ve b) sinyal gürültü oranı grafikleri  
 $(w_{HDE}, w_{HIB}, w_{Cenb}) = (1, 1, 1)$



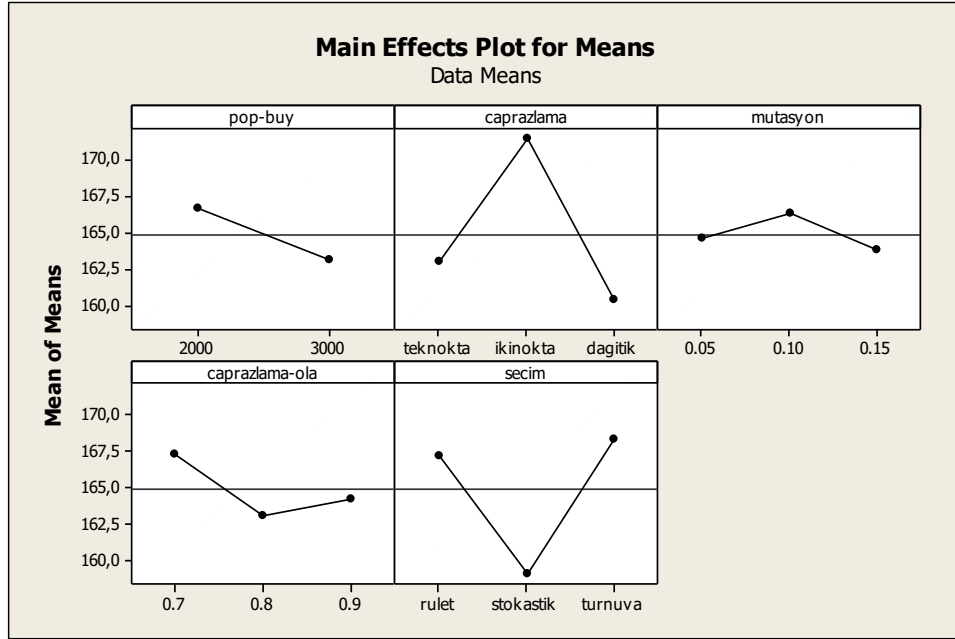
(a)



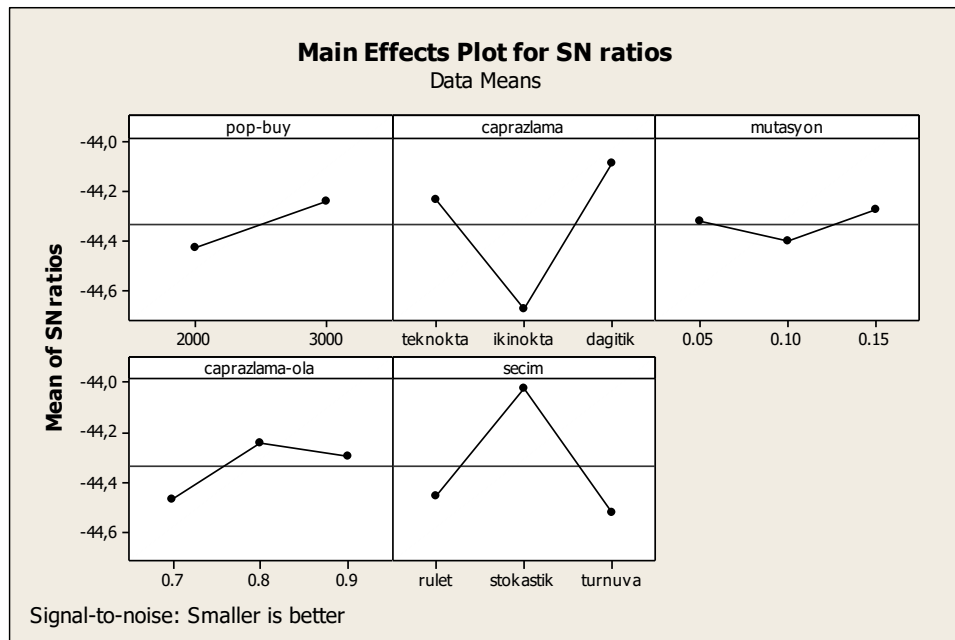
(b)

**Ek Açıklama G:** Farklı ağırlıklar için a) ortalama ve b) sinyal gürültü oranı grafikleri (devam)

$$(w_{HDE}, w_{H1B}, w_{Cenb}) = (1, 1, 1/2)$$



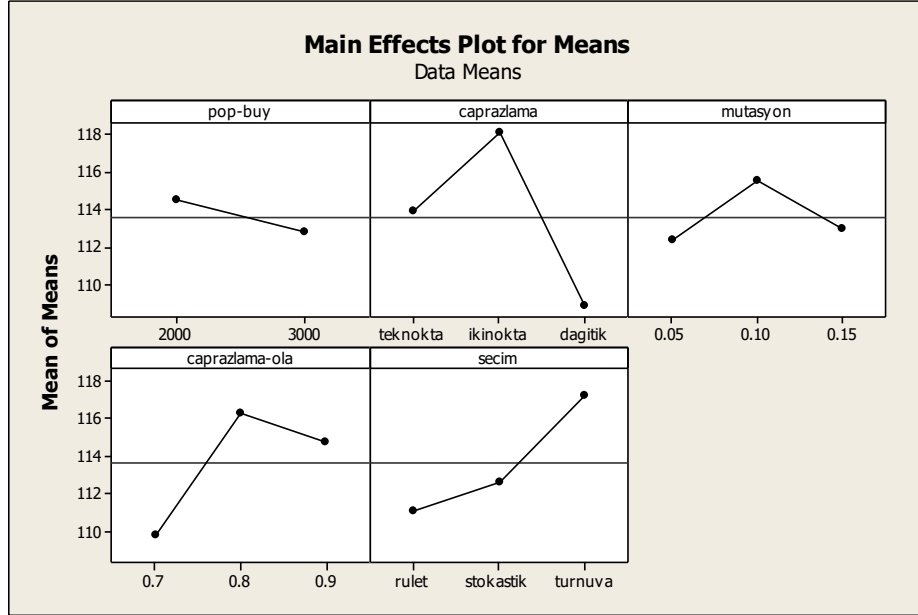
(a)



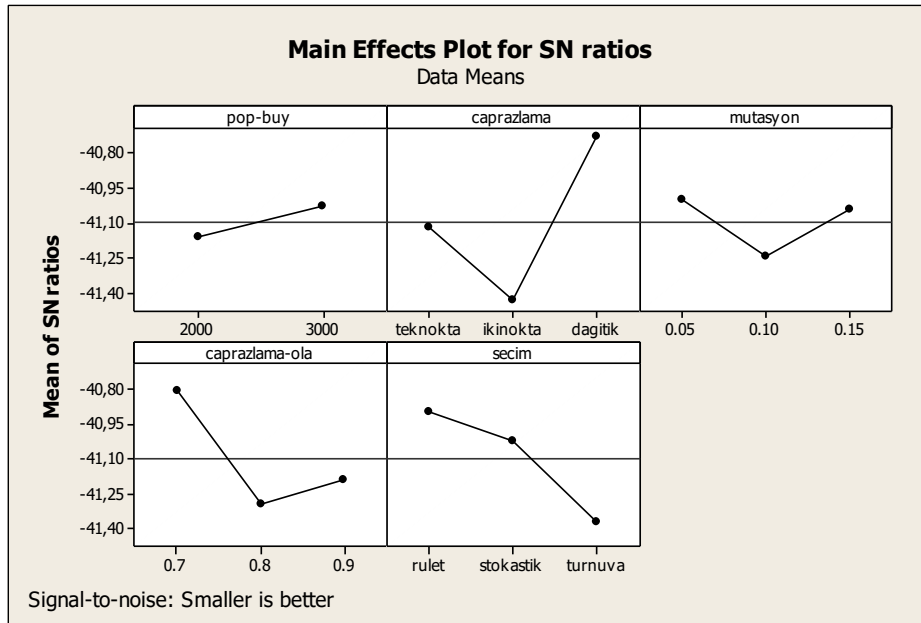
(b)

**Ek Açıklama G:** Farklı ağırlıklar için a) ortalama ve b) sinyal gürültü oranı grafikleri (devam)

$$(w_{HDE}, w_{HiB}, w_{Cenb}) = (1, 1, 1/4)$$



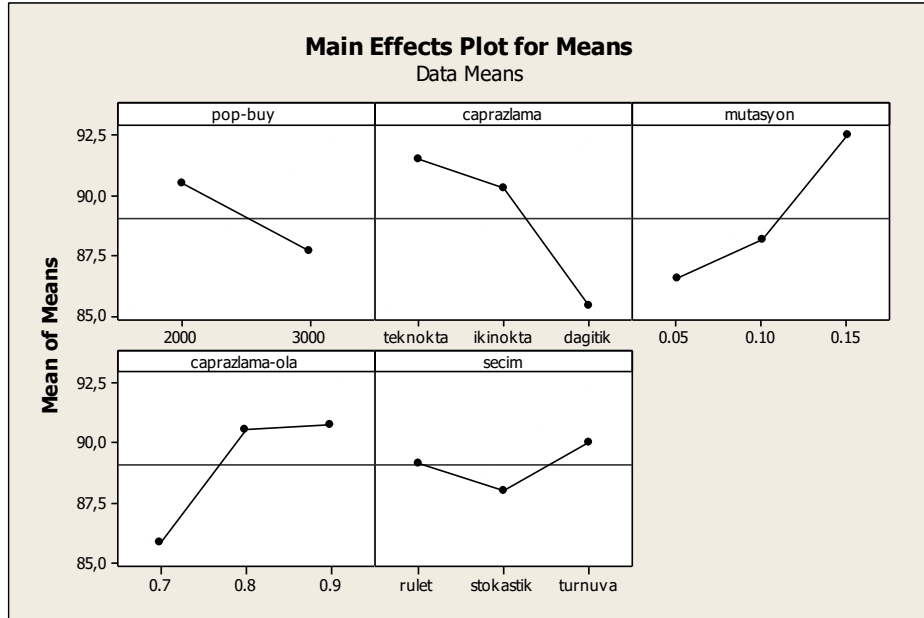
(a)



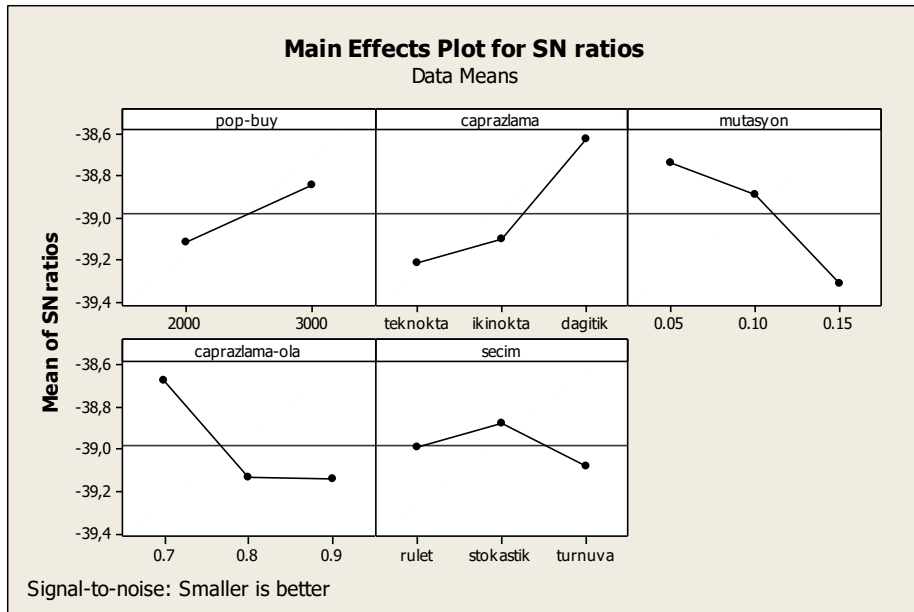
(b)

**Ek Açıklama G:** Farklı ağırlıklar için a) ortalama ve b) sinyal gürültü oranı grafikleri (devam)

$$(w_{HDE}, w_{H1B}, w_{Cenb}) = (1, 1, 1/8)$$



(a)



(b)



**Ek Açıklama H: Mevcut sistem çizelgeleme sonuçları**

| Parça | İşlem | Makine | Sıra | Parça | İşlem | Makine | Sıra |
|-------|-------|--------|------|-------|-------|--------|------|
| 1     | 1     | 9      | 1    | 8     | 1     | 21     | 1    |
|       | 2     | 7      | 1    |       | 2     | 10     | 4    |
|       | 3     | 14     | 2    |       | 3     | 20     | 3    |
|       | 4     | 6      | 2    |       | 4     | 2      | 5    |
|       | 5     | 13     | 1    |       | 5     | 23     | 3    |
|       | 6     | 21     | 2    |       | 6     | 16     | 3    |
|       | 7     | 20     | 6    |       | 7     | 17     | 1    |
| 2     | 1     | 19     | 1    |       | 8     | 8      | 5    |
|       | 2     | 23     | 1    | 1     | 11    | 2      |      |
|       | 3     | 2      | 4    | 2     | 22    | 2      |      |
|       | 4     | 14     | 7    | 3     | 10    | 3      |      |
| 3     | 1     | 9      | 2    | 9     | 4     | 20     | 1    |
|       | 2     | 4      | 2    |       | 5     | 11     | 5    |
|       | 3     | 14     | 1    |       | 6     | 20     | 5    |
|       | 4     | 12     | 3    |       | 7     | 8      | 4    |
|       | 5     | 3      | 1    |       | 8     | 17     | 2    |
|       | 6     | 8      | 2    |       | 9     | 12     | 4    |
| 4     | 1     | 15     | 1    |       | 1     | 10     | 1    |
|       | 2     | 18     | 1    |       | 2     | 2      | 2    |
|       | 3     | 22     | 1    |       | 3     | 11     | 3    |
|       | 4     | 19     | 2    | 10    | 4     | 2      | 3    |
|       | 5     | 24     | 1    |       | 5     | 20     | 2    |
|       | 6     | 9      | 6    |       | 6     | 18     | 2    |
|       | 7     | 8      | 3    |       | 7     | 14     | 5    |
| 5     | 1     | 11     | 1    |       | 1     | 2      | 1    |
|       | 2     | 22     | 3    | 2     | 4     | 1      |      |
|       | 3     | 9      | 3    | 3     | 14    | 4      |      |
|       | 4     | 12     | 2    | 11    | 4     | 3      | 2    |
|       | 5     | 22     | 6    |       | 5     | 15     | 2    |
|       | 6     | 11     | 4    |       | 6     | 18     | 3    |
|       | 7     | 14     | 3    |       | 7     | 1      | 2    |
| 6     | 1     | 16     | 1    |       | 8     | 8      | 6    |
|       | 2     | 12     | 1    | 1     | 1     | 1      |      |
|       | 3     | 22     | 4    | 2     | 5     | 1      |      |
|       | 4     | 9      | 4    | 12    | 3     | 8      | 1    |
|       | 5     | 23     | 2    |       | 4     | 6      | 1    |
|       | 6     | 17     | 3    |       | 5     | 16     | 2    |
| 7     | 1     | 10     | 2    |       |       |        |      |
|       | 2     | 22     | 5    |       |       |        |      |
|       | 3     | 9      | 5    |       |       |        |      |
|       | 4     | 20     | 4    |       |       |        |      |
|       | 5     | 14     | 6    |       |       |        |      |

**Ek Açıklama I:** En iyi çözümler için hücre oluşturma ve çizelgeleme sonuçları  
 $(w_{HDE}, w_{H1B}, w_{Cenb}) = (1, 1, 1)$

| Hücre no. | Parça                     | Makine                                      |
|-----------|---------------------------|---|
| 1         | 2, 3, 4, 6, 8, 10, 11, 12 | 9, 21                                       |
| 2         | 1                         | 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 15, 16, 17, 18, 19, 23 |
| 3         | 5, 7, 9                   | 2, 10, 11, 12, 13, 14, 20                   |

| Parça | İşlem | Makine | Sıra | Parça | İşlem | Makine | Sıra |
|-------|-------|--------|------|-------|-------|--------|------|
| 1     | 1     | 1      | 1    | 8     | 1     | 21     | 2    |
| 1     | 2     | 4      | 1    | 8     | 2     | 11     | 3    |
| 1     | 3     | 8      | 3    | 8     | 3     | 20     | 5    |
| 1     | 4     | 6      | 1    | 8     | 4     | 9      | 5    |
| 1     | 5     | 15     | 2    | 8     | 5     | 23     | 1    |
| 1     | 6     | 18     | 1    | 8     | 6     | 16     | 1    |
| 1     | 7     | 22     | 5    | 8     | 7     | 19     | 2    |
| 2     | 1     | 17     | 1    | 8     | 8     | 14     | 6    |
| 2     | 2     | 24     | 1    | 9     | 1     | 11     | 1    |
| 2     | 3     | 1      | 2    | 9     | 2     | 20     | 1    |
| 2     | 4     | 14     | 1    | 9     | 3     | 12     | 1    |
| 3     | 1     | 9      | 1    | 9     | 4     | 20     | 3    |
| 3     | 2     | 5      | 1    | 9     | 5     | 10     | 2    |
| 3     | 3     | 8      | 1    | 9     | 6     | 22     | 1    |
| 3     | 4     | 12     | 3    | 9     | 7     | 14     | 4    |
| 3     | 5     | 3      | 1    | 9     | 8     | 17     | 2    |
| 3     | 6     | 14     | 2    | 9     | 9     | 12     | 4    |
| 4     | 1     | 15     | 1    | 10    | 1     | 11     | 2    |
| 4     | 2     | 21     | 3    | 10    | 2     | 9      | 4    |
| 4     | 3     | 20     | 4    | 10    | 3     | 10     | 4    |
| 4     | 4     | 19     | 1    | 10    | 4     | 1      | 4    |
| 4     | 5     | 23     | 2    | 10    | 5     | 20     | 7    |
| 4     | 6     | 9      | 7    | 10    | 6     | 16     | 2    |
| 4     | 7     | 8      | 4    | 10    | 7     | 14     | 7    |
| 5     | 1     | 12     | 2    | 11    | 1     | 9      | 2    |
| 5     | 2     | 20     | 2    | 11    | 2     | 4      | 2    |
| 5     | 3     | 2      | 1    | 11    | 3     | 14     | 3    |
| 5     | 4     | 10     | 3    | 11    | 4     | 3      | 2    |
| 5     | 5     | 22     | 2    | 11    | 5     | 13     | 1    |
| 5     | 6     | 11     | 5    | 11    | 6     | 21     | 4    |
| 5     | 7     | 8      | 5    | 11    | 7     | 1      | 5    |
| 6     | 1     | 21     | 1    | 11    | 8     | 8      | 6    |
| 6     | 2     | 11     | 4    | 12    | 1     | 9      | 3    |
| 6     | 3     | 22     | 3    | 12    | 2     | 7      | 1    |
| 6     | 4     | 9      | 6    | 12    | 3     | 8      | 2    |
| 6     | 5     | 23     | 3    | 12    | 4     | 3      | 3    |
| 6     | 6     | 17     | 3    | 12    | 5     | 21     | 5    |
| 7     | 1     | 10     | 1    |       |       |        |      |
| 7     | 2     | 20     | 6    |       |       |        |      |
| 7     | 3     | 1      | 3    |       |       |        |      |
| 7     | 4     | 22     | 4    |       |       |        |      |
| 7     | 5     | 14     | 5    |       |       |        |      |

**Ek Açıklama I:** En iyi çözümler için hücre oluşturma ve çizelgeleme sonuçları (devam)  
 $(w_{HDE}, w_{H1B}, w_{Cenb}) = (1, 1, 1/2)$

| Hücre no. | Parça                 | Makine   |
|-----------|-----------------------|--|
| 1         | 4                     | 1, 3, 4, 5, 6, 7, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 20, 21, 24 |
| 2         | 6, 8, 9, 10           | 2, 10, 11, 16, 19, 22, 23                            |
| 3         | 1, 2, 3, 5, 7, 11, 12 | 8, 9   |

| Parça | İşlem | Makine | Sıra | Parça | İşlem | Makine | Sıra |
|-------|-------|--------|------|-------|-------|--------|------|
| 1     | 1     | 2      | 1    | 8     | 1     | 16     | 1    |
| 1     | 2     | 5      | 1    | 8     | 2     | 10     | 3    |
| 1     | 3     | 8      | 3    | 8     | 3     | 20     | 4    |
| 1     | 4     | 3      | 1    | 8     | 4     | 2      | 3    |
| 1     | 5     | 15     | 1    | 8     | 5     | 23     | 2    |
| 1     | 6     | 16     | 3    | 8     | 6     | 18     | 2    |
| 1     | 7     | 22     | 7    | 8     | 7     | 19     | 1    |
| 2     | 1     | 17     | 1    | 8     | 8     | 14     | 1    |
| 2     | 2     | 23     | 3    | 9     | 1     | 10     | 1    |
| 2     | 3     | 1      | 2    | 9     | 2     | 22     | 1    |
| 2     | 4     | 8      | 9    | 9     | 3     | 12     | 2    |
| 3     | 1     | 9      | 1    | 9     | 4     | 22     | 3    |
| 3     | 2     | 4      | 1    | 9     | 5     | 11     | 2    |
| 3     | 3     | 8      | 1    | 9     | 6     | 22     | 5    |
| 3     | 4     | 12     | 4    | 9     | 7     | 8      | 4    |
| 3     | 5     | 3      | 2    | 9     | 8     | 19     | 3    |
| 3     | 6     | 8      | 6    | 9     | 9     | 10     | 5    |
| 4     | 1     | 13     | 1    | 10    | 1     | 10     | 2    |
| 4     | 2     | 18     | 1    | 10    | 2     | 2      | 2    |
| 4     | 3     | 20     | 1    | 10    | 3     | 11     | 4    |
| 4     | 4     | 17     | 2    | 10    | 4     | 1      | 1    |
| 4     | 5     | 24     | 1    | 10    | 5     | 22     | 6    |
| 4     | 6     | 1      | 3    | 10    | 6     | 16     | 4    |
| 4     | 7     | 14     | 2    | 10    | 7     | 14     | 3    |
| 5     | 1     | 12     | 1    | 11    | 1     | 9      | 2    |
| 5     | 2     | 22     | 2    | 11    | 2     | 4      | 2    |
| 5     | 3     | 9      | 4    | 11    | 3     | 8      | 2    |
| 5     | 4     | 12     | 3    | 11    | 4     | 6      | 1    |
| 5     | 5     | 20     | 3    | 11    | 5     | 15     | 2    |
| 5     | 6     | 10     | 4    | 11    | 6     | 18     | 3    |
| 5     | 7     | 8      | 8    | 11    | 7     | 9      | 7    |
| 6     | 1     | 16     | 2    | 11    | 8     | 8      | 10   |
| 6     | 2     | 11     | 3    | 12    | 1     | 9      | 3    |
| 6     | 3     | 22     | 4    | 12    | 2     | 5      | 2    |
| 6     | 4     | 9      | 6    | 12    | 3     | 8      | 7    |
| 6     | 5     | 23     | 1    | 12    | 4     | 6      | 2    |
| 6     | 6     | 19     | 2    | 12    | 5     | 21     | 1    |
| 7     | 1     | 11     | 1    |       |       |        |      |
| 7     | 2     | 20     | 2    |       |       |        |      |
| 7     | 3     | 9      | 5    |       |       |        |      |
| 7     | 4     | 20     | 5    |       |       |        |      |
| 7     | 5     | 8      | 5    |       |       |        |      |

**Ek Açıklama I:** En iyi çözümler için hücre oluşturma ve çizelgeleme sonuçları (devam)  
 $(w_{HDE}, w_{H1B}, w_{Cenb}) = (1, 1, 1/4)$

| Hücre no. | Parça                     | Makine   |
|-----------|---------------------------|--|
| 1         | 6, 8, 9                   | 10, 12, 16, 19, 20, 22, 23                       |
| 2         | 2, 3, 4, 5, 7, 10, 11, 12 | 1, 2, 8  |
| 3         | 1                         | 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 13, 14, 15, 17, 18, 21, 24 |

| Parça | İşlem | Makine | Sıra | Parça | İşlem | Makine | Sıra |
|-------|-------|--------|------|-------|-------|--------|------|
| 1     | 1     | 9      | 1    | 8     | 1     | 16     | 1    |
| 1     | 2     | 4      | 1    | 8     | 2     | 10     | 3    |
| 1     | 3     | 14     | 1    | 8     | 3     | 20     | 5    |
| 1     | 4     | 6      | 1    | 8     | 4     | 9      | 2    |
| 1     | 5     | 13     | 1    | 8     | 5     | 23     | 2    |
| 1     | 6     | 18     | 1    | 8     | 6     | 16     | 4    |
| 1     | 7     | 22     | 5    | 8     | 7     | 19     | 1    |
| 2     | 1     | 17     | 1    | 8     | 8     | 8      | 8    |
| 2     | 2     | 24     | 1    | 9     | 1     | 12     | 1    |
| 2     | 3     | 2      | 4    | 9     | 2     | 20     | 3    |
| 2     | 4     | 8      | 3    | 9     | 3     | 12     | 3    |
| 3     | 1     | 1      | 1    | 9     | 4     | 20     | 6    |
| 3     | 2     | 5      | 2    | 9     | 5     | 10     | 4    |
| 3     | 3     | 8      | 4    | 9     | 6     | 22     | 4    |
| 3     | 4     | 10     | 5    | 9     | 7     | 14     | 3    |
| 3     | 5     | 3      | 2    | 9     | 8     | 19     | 3    |
| 3     | 6     | 14     | 2    | 9     | 9     | 10     | 6    |
| 4     | 1     | 15     | 1    | 10    | 1     | 11     | 1    |
| 4     | 2     | 21     | 1    | 10    | 2     | 1      | 2    |
| 4     | 3     | 20     | 2    | 10    | 3     | 11     | 3    |
| 4     | 4     | 17     | 2    | 10    | 4     | 2      | 5    |
| 4     | 5     | 23     | 1    | 10    | 5     | 20     | 7    |
| 4     | 6     | 1      | 4    | 10    | 6     | 21     | 2    |
| 4     | 7     | 8      | 6    | 10    | 7     | 8      | 9    |
| 5     | 1     | 10     | 1    | 11    | 1     | 2      | 3    |
| 5     | 2     | 20     | 1    | 11    | 2     | 7      | 1    |
| 5     | 3     | 2      | 2    | 11    | 3     | 8      | 2    |
| 5     | 4     | 10     | 2    | 11    | 4     | 3      | 1    |
| 5     | 5     | 20     | 4    | 11    | 5     | 15     | 2    |
| 5     | 6     | 11     | 4    | 11    | 6     | 16     | 3    |
| 5     | 7     | 8      | 5    | 11    | 7     | 1      | 5    |
| 6     | 1     | 16     | 2    | 11    | 8     | 8      | 10   |
| 6     | 2     | 12     | 2    | 12    | 1     | 2      | 1    |
| 6     | 3     | 22     | 2    | 12    | 2     | 5      | 1    |
| 6     | 4     | 9      | 3    | 12    | 3     | 8      | 1    |
| 6     | 5     | 23     | 3    | 12    | 4     | 3      | 3    |
| 6     | 6     | 19     | 2    | 12    | 5     | 21     | 3    |
| 7     | 1     | 11     | 2    |       |       |        |      |
| 7     | 2     | 22     | 1    |       |       |        |      |
| 7     | 3     | 1      | 3    |       |       |        |      |
| 7     | 4     | 22     | 3    |       |       |        |      |
| 7     | 5     | 8      | 7    |       |       |        |      |

**“Ek Açıklama I: En iyi çözümler için hücre oluşturma ve çizelgeleme sonuçları (devam)**  
 $(w_{HDE}, w_{H1B}, w_{Cenb}) = (1, 1, 1/8)$

| Hücre no. | Parça                | Makine  |
|-----------|----------------------|---|
| 1         | 1, 4, 11, 12         | 1, 6, 7, 13, 14, 21                               |
| 2         | 6                    | 2, 3, 4, 5, 9, 10, 12, 15, 16, 18, 19, 22, 23, 24 |
| 3         | 2, 3, 5, 7, 8, 9, 10 | 8, 11, 17, 20                                     |

| Parça | İşlem | Makine | Sıra | Parça | İşlem | Makine | Sıra |
|-------|-------|--------|------|-------|-------|--------|------|
| 1     | 1     | 1      | 1    | 8     | 1     | 16     | 2    |
| 1     | 2     | 7      | 1    | 8     | 2     | 11     | 5    |
| 1     | 3     | 14     | 2    | 8     | 3     | 20     | 6    |
| 1     | 4     | 6      | 1    | 8     | 4     | 2      | 2    |
| 1     | 5     | 15     | 1    | 8     | 5     | 23     | 2    |
| 1     | 6     | 21     | 2    | 8     | 6     | 18     | 1    |
| 1     | 7     | 22     | 5    | 8     | 7     | 17     | 3    |
| 2     | 1     | 17     | 1    | 8     | 8     | 8      | 7    |
| 2     | 2     | 24     | 2    | 9     | 1     | 11     | 2    |
| 2     | 3     | 2      | 3    | 9     | 2     | 20     | 4    |
| 2     | 4     | 8      | 5    | 9     | 3     | 10     | 3    |
| 3     | 1     | 9      | 1    | 9     | 4     | 22     | 3    |
| 3     | 2     | 5      | 1    | 9     | 5     | 11     | 4    |
| 3     | 3     | 8      | 1    | 9     | 6     | 22     | 4    |
| 3     | 4     | 11     | 7    | 9     | 7     | 8      | 3    |
| 3     | 5     | 3      | 1    | 9     | 8     | 17     | 2    |
| 3     | 6     | 8      | 4    | 9     | 9     | 12     | 3    |
| 4     | 1     | 13     | 1    | 10    | 1     | 11     | 3    |
| 4     | 2     | 21     | 1    | 10    | 2     | 9      | 4    |
| 4     | 3     | 20     | 1    | 10    | 3     | 12     | 2    |
| 4     | 4     | 19     | 2    | 10    | 4     | 1      | 4    |
| 4     | 5     | 24     | 1    | 10    | 5     | 20     | 7    |
| 4     | 6     | 1      | 5    | 10    | 6     | 16     | 3    |
| 4     | 7     | 14     | 4    | 10    | 7     | 8      | 8    |
| 5     | 1     | 12     | 1    | 11    | 1     | 1      | 3    |
| 5     | 2     | 20     | 2    | 11    | 2     | 7      | 2    |
| 5     | 3     | 2      | 1    | 11    | 3     | 14     | 1    |
| 5     | 4     | 10     | 2    | 11    | 4     | 6      | 3    |
| 5     | 5     | 22     | 1    | 11    | 5     | 13     | 2    |
| 5     | 6     | 11     | 6    | 11    | 6     | 21     | 3    |
| 5     | 7     | 8      | 2    | 11    | 7     | 1      | 6    |
| 6     | 1     | 16     | 1    | 11    | 8     | 14     | 5    |
| 6     | 2     | 10     | 1    | 12    | 1     | 1      | 2    |
| 6     | 3     | 22     | 2    | 12    | 2     | 7      | 3    |
| 6     | 4     | 9      | 3    | 12    | 3     | 14     | 3    |
| 6     | 5     | 23     | 1    | 12    | 4     | 6      | 2    |
| 6     | 6     | 19     | 1    | 12    | 5     | 21     | 4    |
| 7     | 1     | 11     | 1    |       |       |        |      |
| 7     | 2     | 20     | 3    |       |       |        |      |
| 7     | 3     | 9      | 2    |       |       |        |      |
| 7     | 4     | 20     | 5    |       |       |        |      |
| 7     | 5     | 8      | 6    |       |       |        |      |

## ÖZGEÇMİŞ

**Doğum Tarihi** 14.09.1987

**Doğum Yeri** Eskişehir

### Öğrenim Durumu

Doktora 2012-2017 Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans 2009-2012 Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Lisans 2005-2009 Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Endüstri Mühendisliği Bölümü

Lise 2001-2005 Eskişehir Kılıçoğlu Anadolu Lisesi

### Çalıştığı Kurumlar

2010- Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Mühendislik Mimarlık Fakültesi  
Endüstri Mühendisliği Bölümü  
Araştırma Görevlisi