



**SIRA BAĞIMLI HAZIRLIK ZAMANLI AMELİYATHANE  
ÇİZELGELEME PROBLEMLERİ İÇİN YENİ ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI**

**Melike AKPINAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEMMUZ 2019**

Melike AKPINAR tarafından hazırlanan “SIRA BAĞIMLI HAZIRLIK ZAMANLI AMELİYATHANE ÇİZELGELEME PROBLEMLERİ İÇİN YENİ ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Doç. Dr. Talip KELLEGÖZ

Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

**Başkan:** Dr. Öğr. Üyesi Adnan AKTEPE

Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi

.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

**Üye:** Dr. Öğr. Üyesi Tahsin ÇETİNYOKUŞ

Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 17/07/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu çalışmanın Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

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

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

.....  
Melike AKPINAR  
17/07/2019

SIRA BAĞIMLI HAZIRLIK ZAMANLI AMELİYATHANE ÇİZELGELEME  
PROBLEMLERİ İÇİN YENİ ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI

(Yüksek Lisans Tezi)

Melike AKPINAR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2019

ÖZET

Hastaneler yüksek maliyetlere ve belirsizliklere sahip; aynı zamanda sınırlı kaynaklarla mümkün olan en kaliteli hizmeti sağlama amacıyla yönetilen sistemlerdir. Bu sistemin en önemli gelir ve gider kaynaklarından birisini ameliyathane oluşturmaktadır. Ameliyathane çizelgeleme, hastane kaynaklarını hastalara tahsis ederek operasyonların gerçekleşme zamanlarını belirler. Bu çalışmada sıra bağımlı cerrah ve oda hazırlık zamanlarına sahip çok-odali tek-aşamalı ameliyathane çizelgeleme problemi göz önünde bulundurulmuştur. Hem hazırlık zamanları hem de ameliyat süreleri deterministik olup problemin performans kriteri tüm operasyonların tamamlanma zamanının en küçüklenmesidir. Problemin formal tanımı yapılmış ve karma tam sayılı doğrusal programlama yapısında matematiksel formülasyonu oluşturulmuştur. Orta ve büyük boyutlu problemlerin çözümü amacıyla popülasyon tabanlı sezgisel olan genetik algoritmanın yanı sıra tek-çözüm tabanlı sezgisel olarak tavlama benzetimi geliştirilmiştir. Deneysel çalışma kapsamında önerilen matematiksel modelin ve sezgisel yöntemlerin performansları çeşitli büyüklüklerdeki test problemleri üzerinde incelenerek sonuçları sunulmuştur.

Bilim Kodu : 90617  
Anahtar Kelimeler : Ameliyathane Çizelgeleme, Sıra Bağımlı Hazırlık Zamanları, Karışık Tamsayılı Programlama, Genetik Algoritmalar, Tavlama Benzetimi  
Sayfa Adedi : 88  
Danışman : Doç. Dr. Talip KELLEĞÖZ

NEW SOLUTION APPROACHES FOR OPERATING ROOM SCHEDULING  
PROBLEMS WITH SEQUENCE-DEPENDENT SETUP TIMES

(M. Sc. Thesis)

Melike AKPINAR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2019

ABSTRACT

Hospitals are systems, which have uncertainties and high costs and also managed with limited resources to provide the highest quality service possible. One of the most important income and expense sources of these systems are the operating rooms. Operating room scheduling allocates hospital resources to patients, and it determines a starting time for each operation. In this study, multi-room single-stage operating room scheduling problem with sequence-dependent setup times for surgeons and operating rooms is considered. Both setup times and operation times are deterministic and the performance criterion of the problem is the minimization of the completion time of all operations. The formal definition of the problem is made and the mathematical formulation of the mixed integer linear programming structure is developed. In order to solve medium and large-scale problems, simulated annealing as a single-solution-based heuristic has been developed in addition to genetic algorithm that is a well-known population-based heuristic. In the experimental study, performances of proposed mathematical model and heuristics are examined on test problems of various sizes and the results are presented.

Science Code : 90617

Key Words : Operating Room Scheduling, Sequence-dependent Setup Times, Mixed Integer Programming, Genetic Algorithms, Simulated Annealing

Page Number : 88

Supervisor : Assoc. Prof. Talip KELLEGÖZ

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve çalışmalarım süresince bana her adımda yol gösteren; emeğini, zamanını ve ilgisini esirgemeyen, karşılaştığım zorluklarda sabırla beni doğruya yönlendiren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Talip KELLEĞÖZ'e katkılarından dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Hayatım boyunca sevgi ve destekleriyle yanımda olan aileme ve eğitimim için her türlü fedakarlığı gösteren eşime teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                    | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------|-------|
| ÖZET .....                                                         | iv    |
| ABSTRACT.....                                                      | v     |
| TEŞEKKÜR.....                                                      | vi    |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....                                          | x     |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....                                           | xi    |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                                       | xiii  |
| 1. GİRİŞ.....                                                      | 1     |
| 2. LİTERATÜR TARAMASI.....                                         | 5     |
| 3. AMELİYATHANE ÇİZELGELEME PROBLEMLERİ .....                      | 11    |
| 3.1. Temel Kavramlar .....                                         | 11    |
| 3.1.1. Hasta türleri.....                                          | 11    |
| 3.1.2. Çizelge türleri.....                                        | 13    |
| 3.1.3. Ameliyat süreci .....                                       | 15    |
| 3.1.4. Ameliyathanede kullanılan zaman kavramları.....             | 16    |
| 3.1.5. Performans ölçütleri .....                                  | 19    |
| 3.2. Ameliyathane Çizelgeleme Problemlerinin Çözüm Yöntemleri..... | 21    |
| 3.2.1. Kesin çözüm yöntemleri .....                                | 21    |
| 3.2.2. Sezgisel yöntemler .....                                    | 23    |
| 3.2.3. Benzetim .....                                              | 25    |
| 4. GENETİK ALGORİTMALAR .....                                      | 27    |
| 4.1. Genetik Algoritmanın İşleyişi .....                           | 28    |
| 4.2. Genetik Algoritma Kavramları .....                            | 29    |

|                                                            | <b>Sayfa</b> |
|------------------------------------------------------------|--------------|
| 4.2.1. Kodlama .....                                       | 30           |
| 4.2.2. Seçim.....                                          | 32           |
| 4.2.3. Çaprazlama.....                                     | 34           |
| 4.2.4. Mutasyon.....                                       | 37           |
| 4.3. Genetik Algoritma Parametrelerinin Belirlenmesi.....  | 39           |
| <b>5. TAVLAMA BENZETİMİ .....</b>                          | <b>41</b>    |
| 5.1. Tavlama Benzetiminin İşleyişi.....                    | 43           |
| 5.2. Tavlama Benzetimi Kavramları .....                    | 43           |
| 5.2.1. Başlangıç çözümü .....                              | 43           |
| 5.2.2. Uygunluk fonksiyonu.....                            | 44           |
| 5.2.3. Komşuluk yapısı .....                               | 44           |
| 5.3. Tavlama Benzetimi Parametrelerinin Belirlenmesi ..... | 45           |
| <b>6. PROBLEM TANIMI VE KARMAŞIKLIĞI.....</b>              | <b>47</b>    |
| 6.1. Problem Tanımı.....                                   | 47           |
| 6.2. Problemin Karmaşıklığı .....                          | 48           |
| <b>7. PROBLEMİN MATEMATİKSEL FORMÜLASYONU.....</b>         | <b>49</b>    |
| <b>8. ÖNERİLEN SEZGİSEL YÖNTEMLER.....</b>                 | <b>53</b>    |
| 8.1. Önerilen Genetik Algoritma.....                       | 53           |
| 8.1.1. Kodlama .....                                       | 53           |
| 8.1.2. Amaç fonksiyonu ve uygunluk fonksiyonu .....        | 54           |
| 8.1.3. Seçim.....                                          | 56           |
| 8.1.4. Çaprazlama.....                                     | 57           |
| 8.1.5. Mutasyon.....                                       | 58           |

**Sayfa**

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| 8.1.6. Durdurma kriteri .....                                  | 60 |
| 8.2. Önerilen Tavlama Benzetimi .....                          | 60 |
| 9. KARŞILAŞTIRMA ÇALIŞMASI.....                                | 63 |
| 9.1. Test Problemleri .....                                    | 63 |
| 9.2. Parametre Optimizasyonu .....                             | 64 |
| 9.3. Bulgular.....                                             | 65 |
| 10. SONUÇ VE ÖNERİLER .....                                    | 71 |
| KAYNAKLAR .....                                                | 73 |
| EKLER.....                                                     | 81 |
| EK-1. Test problemlerine ait sonuçlar (Önem faktörü=0,1).....  | 82 |
| EK-2. Test problemlerine ait sonuçlar (Önem faktörü=0,25)..... | 85 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                 | 88 |

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge                                                                                  | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 3.1. Açık çizelge örneği .....                                                   | 14    |
| Çizelge 3.2. Blok çizelge örneği .....                                                   | 14    |
| Çizelge 3.3. Modifiye blok çizelgeleme örneği .....                                      | 15    |
| Çizelge 5.1. İniş algoritması .....                                                      | 42    |
| Çizelge 5.2. Tavlama benzetimi algoritması.....                                          | 42    |
| Çizelge 8.1. Operasyon işlem süreleri ve ilk operasyon hazırlık süreleri (dk) .....      | 55    |
| Çizelge 8.2. Operasyonları gerçekleştirebilen doktorlar kümesi .....                     | 55    |
| Çizelge 8.3. Oda hazırlık süreleri (dk).....                                             | 55    |
| Çizelge 8.4. Doktor hazırlık süreleri (dk) .....                                         | 55    |
| Çizelge 9.1. Test problemleri.....                                                       | 63    |
| Çizelge 9.2. Genetik algoritma için parametre optimizasyonunda kullanılan değerler ..... | 64    |
| Çizelge 9.3. Tavlama benzetimi için parametre optimizasyonunda kullanılan değerler ..... | 64    |
| Çizelge 9.4. Matematiksel model sonuçları (önem faktörü=0,1 değeri için).....            | 65    |
| Çizelge 9.5. Matematiksel model sonuçları (önem faktörü=0,25 değeri için).....           | 66    |
| Çizelge 9.6. Test problemlerinde en iyi sonucu bulan yöntemler.....                      | 67    |
| Çizelge 9.7. Yöntemlerin bulunan en iyi sonuçlardan ortalama sapması .....               | 68    |
| Çizelge 9.8. Ortalama çözüm süreleri (CPU) .....                                         | 69    |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                               | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 3.1. Yatan hasta ameliyat prosesi .....                                       | 13    |
| Şekil 3.2. Ameliyat Süreci .....                                                    | 16    |
| Şekil 3.3. Ameliyathane çizelgeleme probleminde kullanılan çözüm yaklaşımları ..... | 21    |
| Şekil 4.1. Genetik algoritma işleyişi .....                                         | 29    |
| Şekil 4.2. Gen, kromozom ve popülasyon yapısı.....                                  | 30    |
| Şekil 4.3. İkili sayı sisteminde kodlama .....                                      | 31    |
| Şekil 4.4. Permütasyon tipi kodlama .....                                           | 31    |
| Şekil 4.5. Değer kodlama.....                                                       | 31    |
| Şekil 4.6. Ağaç kodlama .....                                                       | 31    |
| Şekil 4.7. Rulet çemberi seçimi .....                                               | 32    |
| Şekil 4.8. Turnuva seçimi .....                                                     | 33    |
| Şekil 4.9. Tek noktalı çaprazlama örneği.....                                       | 34    |
| Şekil 4.10. Çok noktalı çaprazlama örneği (İlk versiyon) .....                      | 35    |
| Şekil 4.11. Çok noktalı çaprazlama örneği (İkinci versiyon) .....                   | 35    |
| Şekil 4.12. Pozisyona dayalı çaprazlama örneği.....                                 | 36    |
| Şekil 4.13. Sıraya dayalı çaprazlama örneği.....                                    | 36    |
| Şekil 4.14. Kısmi eşleşmeli çaprazlama örneği .....                                 | 37    |
| Şekil 4.15. Komşu iki geni değiştirme örneği.....                                   | 38    |
| Şekil 4.16. Keyfi iki geni değiştirme örneği .....                                  | 38    |
| Şekil 4.17. Ters mutasyon örneği .....                                              | 39    |
| Şekil 5.1. Çiftli yer değiştirme (swap) mekanizması.....                            | 44    |
| Şekil 5.2. Yerleştirme (insert) mekanizması.....                                    | 45    |

| <b>Şekil</b>                                                                  | <b>Sayfa</b> |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 8.1. Kromozom gösterimi .....                                           | 54           |
| Şekil 8.2. Örnek kromozomun karşılık geldiği çözüme ait Gant şeması.....      | 56           |
| Şekil 8.3. Önerilen genetik algoritma için çaprazlama işlemi .....            | 57           |
| Şekil 8.4. Önerilen Mutasyon Operatörü (Rassal sayı ilk aralıkta ise).....    | 58           |
| Şekil 8.5. Önerilen Mutasyon Operatörü (Rassal sayı ikinci aralıkta ise)..... | 59           |
| Şekil 8.6. Önerilen Mutasyon Operatörü (Rassal sayı üçüncü aralıkta ise)..... | 59           |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

### Simgeler

### Açıklamalar

|            |                                                    |
|------------|----------------------------------------------------|
| $\Omega$   | Operasyon kümesi                                   |
| $\delta$   | Doktor kümesi                                      |
| $\rho$     | Ameliyat odası kümesi                              |
| $p$ ve $q$ | Operasyon indisi                                   |
| $d$        | Doktor indisi                                      |
| $r$        | Ameliyat odası indisi                              |
| $n$        | Ameliyat sayısı                                    |
| $h$        | Doktor sayısı                                      |
| $o$        | Ameliyat odası sayısı                              |
| $t_p$      | Ameliyat süresi                                    |
| $StO_{pq}$ | Oda hazırlık süresi                                |
| $StD_{pq}$ | Doktor hazırlık süresi                             |
| $GD_p$     | p operasyonunu gerçekleştirebilen doktorlar kümesi |

### Kısaltmalar

### Açıklamalar

|      |                                  |
|------|----------------------------------|
| EDD  | En Erken Teslim Tarihi           |
| FCFS | İlk Giren İlk Çıkar              |
| GA   | Genetik Algoritma                |
| LPT  | En Uzun İşlem Süresi             |
| LST  | En Uzun Hazırlık Süreli Sıralama |
| SPT  | En Kısa İşlem Süresi             |
| TB   | Tavlama Benzetimi                |

## 1. GİRİŞ

İşletmelerin günümüz ekonomisinde rekabet edebilmeleri hatta hayatta kalabilmeleri için, müşteri taleplerine hızla cevap verebilmeleri, müşteri memnuniyetini sürekli olarak sağlayabilmeleri ve maliyetlerini düşürerek rekabetçi fiyatlar sunabilmeleri gerekmektedir [1]. İşletmeleri daha rekabetçi hale getirecek, kısıtlı zaman periyotları içerisinde tam kapasite ile en yüksek oranda çıktıya ulaşmayı amaçlayan doğru planlama yapmanın önemi gün geçtikçe artmaktadır. Üretim ve hizmet sektöründe görev alan işletme yöneticileri verimliliği artırmak için yaptığı çizelge ve planlarında akademik çalışmalardan olabildiğince yararlanmayı amaçlamaktadır [2].

Çizelgeleme, üretim ve hizmet sektöründe işletmelerin kıt kaynaklarının gerekli görevlere atanmasını sağlayan bir karar verme sürecidir. Kaynakların atanmasındaki başarı, işletme açısından önemli performans ölçütlerinin ve amaçların eniyilenme seviyesiyle ölçülür [3]. Etkin bir çizelge yaptığı sıralamalar ile işletmenin hızını, kaynakların kullanımındaki verimlilik ile de maliyetleri iyileştirecektir [4].

Çizelgelemenin temel unsurları olan kaynak ve görevler kullanıldığı sektöre göre değişiklik göstermektedir. Bir işletmede sahip olunan kaynaklar; fabrikadaki makineler, hava alanındaki pistler veya hastanede çalışan personeller olabilirken, görevler ise üretim bandındaki ürünler, inmeyi veya havalanmayı bekleyen uçaklar veya hastanede hizmet bekleyen hastalar olabilir. Kaynak, görev ve amaçlar farklılık gösterse de çizelgelemede ortak amaç mevcut kapasiteyi yüksek seviyede kullanmak, talep değişimlerine hızlı cevap vermek, üretime esneklik kazandırmak ve işleri zamanında teslim etmek olarak ifade edilebilir [3,5].

Mevcut kapasitenin etkin ve verimli kullanılmasına ve organizasyonun hedeflerine ulaşmasına yardımcı olan çizelgeleme, hem üretim hem de hizmet sektöründe yaygın olarak uygulanan bir planlama sürecidir [2].

Hizmet sektörü kapsamında yer alan sağlık sektörünün önemi gün geçtikçe artmaktadır. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerdeki gayri safi yurtiçi hasılanın önemli bir yüzdesi sağlık harcamalarına aittir [6]. Sağlık kuruluşları hem tıbbi cihazlarda hem de yönetim araçlarında,

değişen çevreye ve hızla gelişen teknolojiye uyum sağlamak zorundadırlar [7]. Ayrıca, yaşlanan nüfusla birlikte tıbbi bakım için sürekli büyüyen talep ve daha iyi bilgilendirilmiş hastaların gereksinimleri bu yapısal zorluklara eklenerek sorunun karmaşıklığını artırmaktadır [8].

Hastaneler sağlık endüstrisinin temel unsurlarından biridir. Eczane, ameliyathane, iyileşme ünitesi, kan bankası, laboratuvar ve radyoloji gibi çeşitli birimlerden oluşur [9]. Hastaneler, sınırlı kapasitedeki malzeme ve insan kaynakları ile çalışan çok hizmetli bir üretim sistemidir [10]. Hastanelerde hastalara sağlık hizmeti sunmanın yönetsel yönü giderek önem kazanmaktadır. Hastaneler bir yandan maliyetleri düşürmek ve finansal varlıklarını iyileştirmek, bir yandan da hasta ve personel memnuniyetini en üst düzeye çıkarmak istemektedir [11]. İşgücü ve zaman, artan nüfusa hizmet veren hastanelerin en önemli kaynaklarından olmuştur. İşgücünün etkin kullanımıyla hizmet kalitesi artmakta ve rekabet avantajı sağlanmakta, zamanın etkin kullanımı ile de maliyetler düşürülmekte ve daha çok hastanın hizmet görmesi sağlanmaktadır.

Ameliyathanelerin hastanelerdeki en değerli varlıklar arasında olduğu bilinmektedir. Bir hastanedeki toplam işletme maliyetinin %40'ından fazlasını ameliyathanelerle ilgili giderler oluştururken, gelirlerin %40'ından fazlası da ameliyathanelerden sağlanmaktadır. Bu nedenle, ameliyathaneler en büyük maliyet merkezinin yanı sıra en büyük gelir kaynağı olarak kabul edilir. Dolayısıyla, karı artırmak ve işletme maliyetlerini azaltmak için büyük potansiyel oluştururlar [12].

Hastanelerde ameliyathanelere tahsis edilen kaynaklar, diğer klinik birimlere tahsis edilen kaynaklardan daha pahalıdır. Bu gerçek, yöneticileri ve araştırmacıları ameliyathaneleri yönetme ve çözelgelemeye, dolayısıyla kaynakları mümkün olan en iyi şekilde tahsis etmeye teşvik etmektedir [13]. Hastanelerde ameliyathanelerin etkin yönetimi, hastaların memnuniyetini sağlarken, cerrahi hizmetleri de makul bir maliyetle sunmanın anahtarıdır. Ameliyathane çözelgeleme cerrahi personelin, hastaların, odaların ve diğer kısıtlamaların varlığını göz önünde bulundurmalıdır [14]. Ameliyatlar için talep genellikle arzdan daha fazladır. Bu durum hastalar için uzun bekleme sürelerine, hizmet kalitesinin düşmesine ve memnuniyetsizliğin artmasına yol açar. Ameliyathanelerde zamanın verimli kullanılabilmesi için, verimsiz zamanları oluşturan tüm unsurların belirlenip ortadan kaldırılması gerekmektedir.

Farklı ameliyat türleri, farklı ekipman ve kaynaklar gerektirebilir. Bazı mobil cihazlar ve kaynaklar birkaç ameliyat odası arasında paylaşılabilirken, bazıları belirli bir ameliyat odasına atanmıştır. Bir ameliyat bittiğinde, ameliyathaneyi temizlemek, ekipmanı değiştirmek, sterilize olması gereken kaynakların yenilenmesi ve uygun personelin (cerrahlar, hemşireler ve anestezi uzmanları) hazır olması için bazı hazırlık çalışmaları bir sonraki ameliyatın başlamasından önce yapılmalıdır. Hazırlık zamanları, iki ardışık ameliyatın türüne bağlıdır ve bu nedenle ameliyat sıralamasına bağlıdır. Genel olarak iki ameliyat farklı türde ise, büyük hazırlıklar ve süreler gerekli iken, iki ameliyat benzer özelliklere sahip ise yalnızca küçük hazırlıklar gerektirir [15].

Hazırlık zamanları çoğu çalışmada göz ardı edilmektedir ya da operasyonlar arasında sabit bir süre olarak alınmaktadır. Bazı çalışmalarda ise ameliyat sürelerine dahil edilmektedir. Operasyonların çizelgelenmesinde kaçınılmaz olan bu sürelerin olması gerekenden az hesaplanması tüm operasyonların zamanlamasını bozarken, olması gerekenden fazla olarak alınması odaların verimsiz kullanılmasına ve boş beklemesine neden olmaktadır. Operasyonları gerçekleştirecek cerrahi ekipler, biten bir operasyonun ardından yeni bir operasyona başlayabilmek için belirli bir süreye ihtiyaç duyarlar. Benzer şekilde bu süreler de operasyonların türüne göre değişiklik göstermekte olup yine sıra bağımlıdır.

Bu çalışmada açık çizelgeleme yöntemi kullanılarak ameliyathane çizelgeleme üzerinde durulmuştur. Operasyonlar arasında gerekli hazırlıkların gerçekleştirilebilmesi için hazırlık zamanları mevcuttur ve sıra bağımlıdır. Aynı zamanda cerrahlar için de operasyonlar arası hazırlık zamanları bulunmaktadır. Oda hazırlık ve cerrah hazırlık zamanları göz önünde bulundurularak operasyonların ameliyat odalarına ve cerrahlara ataması ve çizelgelemesi yapılacaktır. Amaç tüm operasyonların tamamlanma zamanını minimize etmektir. Problemin detaylı tanımı yapılmış ve matematiksel formülasyonu geliştirilmiştir. Matematiksel formülasyon, karma tam sayılı programlama yapısındadır. Ardından, probleme ait genetik algoritma ve tavlama benzetimi sezgiselleri geliştirilir parametreleri optimize edilmiştir. Matematiksel model ve sezgisel yöntemlerin çeşitli büyüklükteki test problemleri kullanılarak performansı incelenmiş ve sonuçları sunulmuştur.

Çalışmanın ikinci bölümünde konu ile ilgili literatür taraması verilmiştir. Üçüncü bölümde ameliyathane çizelgeleme problemi açıklanmıştır. Sonraki bölümler sırasıyla genetik algoritma ve tavlama benzetimine yönelik bilgiler içermektedir. Altıncı bölümde problemin

tanımı yapılmış ve karmaşıklığından bahsedilmiş, yedinci bölümde ise geliştirilen karışık tam sayılı doğrusal programlama formundaki matematiksel model sunulmuştur. Sekizinci bölümde ise sırasıyla önerilen genetik algoritma ve tavlama benzetimi algoritmalarına yer verilmiştir. Dokuzuncu bölüme yöntemlerin performansını değerlendirmek amacıyla kullanılan test problemlerinin nasıl oluşturulduğu bilgisi ile başlanmış, önerilen sezgisellere yönelik parametre optimizasyonuna değinilmiş, matematiksel model ve önerilen sezgisel yöntemlerin test problemleri üzerindeki performans sonuçlarının analizi yapılmıştır. Son bölümde ise çalışmanın genel değerlendirmesi yapılmış ve gelecek çalışmalarla ilgili öneriler verilmiştir.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Ameliyathane planlama ve çizelgeleme; ameliyat odası kullanımını, hasta ve personel memnuniyetini artırma, maliyetleri azaltma ve bu sayede hastane gelirlerini artırma üzerinde büyük etkilere sahiptir. Ancak ameliyathaneyi yönetmek yalnızca çelişen öncelikler ve tercihler nedeniyle değil, aynı zamanda pahalı kaynakların azlığı nedeniyle de oldukça zordur [16].

Ameliyathaneler; belirsizlikler, çelişen öncelikler ve amaçların çeşitliliği ile yeterince kompleks yapılar iken, iş sayısının fazlalığı ve kaynakların kıtlığı bu karmaşayı daha da zorlaştırmaktadır. İşte ameliyathane çizelgeleme süreci; tüm bu karmaşıklığı yönetmeyi, işletme amaçlarına hizmet etmeyi ve verilen hizmetin kalitesini artırmayı sağlamak amacıyla literatürde geniş çapta yer bulmuştur. Hastanelerdeki yönetsel ve sistemsal farklılıklar ile amaçların çeşitliliği literatürde çok çeşitli çalışmaların yapılmasına neden olmuştur.

Ameliyathane çizelgeleme problemleri farklı kaynak, süreç ve amaçları dikkate alarak, birçok kombinasyon şeklinde incelendiği için kategorize etmek zordur. Bu nedenle literatürde yer alan çalışmalar, Cardoen vd. [11] 'un çalışması referans alınarak 5 kritere göre gruplandırılıp incelenmiştir. Bu kriterler aşağıdaki gibidir:

- Hasta özellikleri
- Performans ölçütleri
- Karar alanı
- Araştırma metodolojisi
- Belirsizlik

Ameliyathanelerin planlanması ve çizelgelenmesinde acil ve randevulu olmak üzere iki temel hasta sınıfı kullanılmaktadır. Randevulu hastalar yatan ve ayakta tedavi gören hasta olarak ayrılırken, acil hastalar ise acil ve çok acil olarak incelenmiştir. Acil hastalarda belirsizliğin fazla olması ve planlanmasının zor olması nedeniyle randevulu hastalara göre literatürde daha az incelenmiştir. Augusto vd. [17], Roland vd. [7], Mateus vd. [18] ve birçok araştırmacı çalışmalarında randevulu hastaları incelemiştir. Acil hastalar ise genel olarak randevulu hastalarla beraber değerlendirilmiştir. Lamiri vd. [19, 20] çalışmalarında acil

hastaların neden olduğu belirsizlikler altında randevulu ameliyathane planlanmasını araştırmışlardır.

Çeşitli performans ölçütleri ile ameliyathane çizelgeleme ve planlama prosedürü değerlendirilebilir. Bu ölçütler analiz edilmek istenen kriterlere göre belirlenmektedir. Literatürde sık incelenen performans ölçütleri hasta bekleme süreleri, tedavi edilen hasta sayısı, kullanım, kaynak seviyeleme, tamamlanma zamanı, hasta erteleme, finansal önlemler ve tercihlerdir. Bazı çalışmalar tek performans ölçütünü dikkate alırken, bazı çalışmalarda ise birden fazla performans ölçütü aynı anda kullanılmaktadır. Tanfani ve Testi [21], çalışmasında hasta bekleme sürelerini, ameliyat odası kullanımını ve finansal varlıkları performans kriteri olarak değerlendirmiştir. Lamiri vd. [20], van Essen vd. [22] ve Arnaout [23] çalışmalarında tamamlanma zamanını değerlendirmişlerdir. Testi vd. [24], operasyon ertelemelerini ve cerrah tercihlerini göz önünde bulundurmıştır. Santibanez vd. [25] çalışmasında performans ölçütü olarak kaynak seviyelendirmeyi ve tedavi gören hasta sayısının maksimizasyonunu kullanmıştır.

Ameliyathane çizelgeleme alanındaki karar alanı verilen kararların neye yönelik olacağı ile ilgilidir. Cardoen vd. [11] çalışmasında karar alanını üç sınıfa ayırmıştır. Bunlar (1) servis veya departman, (2) cerrah ve (3) hasta seviyesinde alınan kararlardır. Testi vd. [24] ve Santibanez vd. [25] çalışmalarında cerrahi servise ayrılan blok süreleri, odaların servislere tahsisini ve gerçekleşecek operasyonları belirlemişlerdir. Kharraja vd. [26], operasyonları gerçekleştirecek cerrahi ekiplere yönelik bir çalışma yapmışlardır. Fei vd. [27] ise hasta memnuniyetini sağlamak amacıyla zaman çizelgelerinin oluşturulmasını amaçlamışlardır [28].

Araştırma metodolojisi problemin çözümünde kullanılan yöntemleri ifade etmektedir. Ameliyathane çizelgeleme problemlerinde kullanılan çözüm yöntemleri bir sonraki bölümde daha detaylı açıklanmış olup, kesin çözüm yöntemleri, sezgisel yöntemler ve benzetim şeklinde gruplandırılabilir. Kesin çözüm yöntemleri çalışmalarda sıklıkla kullanılmasına rağmen, problem boyutu büyüdüğünde yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle genellikle sezgisel yöntemler ile desteklenmektedirler. Ogulata ve Erol [29], Zhao ve Li [15], Hanset vd. [30] ve Jebali vd. [31] çalışmalarında kesin çözüm yöntemlerini kullanmışlardır. Karmaşık ve büyük boyutlu problemlerin çözümü için çoğu çalışma sezgisel yöntemlere başvurmuştur. En sık kullanılan sezgisel yöntemler genetik algoritma, karınca kolonisi ve

tavlama benzetimidir. Roland vd. [7], Vali-Siar vd. [9] ve Chaabane vd. [10] sezgisel yöntem kullanan çalışmalardandır. Büyük boyutlu, belirsizliklerin olduğu sistemlere yönelik stokastik yapıli problemlerin çözümü amacıyla benzetim tekniğı kullanan çalışmalar da literatürde mevcuttur. Buna Arnaout [23], Arnaout ve Kulbashian [32]'in çalışmaları örnek verilebilir.

Ameliyathanelerde belirsizlik en yoğun karşılaşılan problemlerdendir. Acil hastaların geliş, operasyon sürelerindeki değışiklik, kaynakların müsait olmayışı ve gecikmeler gibi pek çok durum belirsizliğe sebebiyet verebilir. Belirsizliklerin varlığında çizelge oluşturmak oldukça güçtür. Ameliyathane çizelgelemeye yönelik yapılan çalışmaların çoğı deterministik olsa da stokastik durumları inceleyen çalışmalar da mevcuttur. Yukarıda bahsedilen çalışmalara ilaveten Lamiri vd. [20]'in çalışması da buna bir örnek oluşturmaktadır.

Literatürde, farklı tipte ameliyathane çizelgeleme problemlerine ait pek çok çalışma olmasına rağmen, sıra bağımlı hazırlık zamanlarının incelendiğı çalışma sayısı azdır. Bu çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Zhao ve Li [15], çok sayıdaki ameliyat odasına acil olmayan operasyonların çizelgelenmesi problemini ele almıştır. Yazarlar günlük çizelgeleme kararlarını üç yönden incelemiştir; (1) açılacak ameliyat odasının sayısı, (2) operasyonların ameliyat odalarına tahsisi ve (3) her odadaki operasyonların sıralanmasıdır. Ameliyatlar arasında hazırlık zamanları mevcuttur ve sıra bağımlıdır. Hazırlık zamanları ve operasyon süreleri deterministik olarak bilinmektedir. Problemin çözümü için karma tam sayılı programlama ve kısıt programlama modelleri kurulmuş ve bu iki modelin performansları karşılaştırılmıştır.

Arnaout ve Kulbashian [32], ameliyat odası çizelgeleme problemini sıra bağımlı hazırlık zamanlarına sahip özdeş paralel makine çizelgeleme problemi şeklinde modellemiştir. Operasyon süreleri stokastik olup amaç fonksiyonu maksimum tamamlanma zamanını minimize etmektir. Çözüm için geliştirilen sıralama sezgiselleri, var olan sistem ile ayırık olay simülasyonu kullanılarak karşılaştırılmıştır. Acil olmayan hastaların çizelgelenmesi yapılmış olup cerrahlar ilk gelen ilk hizmet alır kuralına göre blok zamanlara atanmaktadır.

Arnaout [23] diğeri bir çalışmasında, ameliyat odalarının kullanımının maksimizasyonu problemini incelemiştir. Problemi, amacı tamamlanma zamanını minimize etmek olan sıra

bağımlı hazırlık zamanına sahip paralel makine çizelgeleme problemi şeklinde modelleyerek incelemiştir. Gerçek hayata daha uyumlu olabilmesi için operasyon süreleri ve hazırlık zamanları stokastiktir. Acil olmayan, randevulu hastalara ait günlük çizelgeler oluşturulmaktadır. Çalışmada üç adet sıralama sezgiseli geliştirilmiş, bu sezgiseller kesikli olay simülasyonu kullanılarak karşılaştırılmıştır.

Lahijanlian, Zarandi ve Farahani [6], randevulu hastalarla ameliyat odası çizelgeleme için karma tam sayılı programlama modeli geliştirmiştir. Bu model, toplam ağırlıklı başlangıç zamanlarını en aza indirmeyi hedeflemektedir. Ağırlıklandırma hesaplaması için üç farklı yaş grubu kullanılmıştır. Bu hasta gruplarında hazırlık zamanları sıra bağımlıdır ve cerrahi operasyon süreleri bulanık sayılar olarak dikkate alınmaktadır. İncelenen problemin çözümü amacıyla iki aşamalı hibrit bir algoritma önerilmiştir. İlk aşamada, başlangıç çözümü ağırlıklandırılmış en kısa işlem süresi kuralı kullanılarak elde edilir. İkinci aşamada rassal değişim yöntemiyle akıllı yer değiştirmeler yapılır. Elde edilen sonuçlar ışığında operasyon sürelerinin bulanık sayı olarak modellenmesinin daha gerçekçi olduğu ifade edilmiştir.

Hamid vd. [33] açık kalp cerrahisi bölümünün performansını artırmak için iki aşamalı bir prosedür geliştirmişlerdir. İlk aşamada sıra bağımlı hazırlık zamanlarını dikkate alarak ameliyathane planlanması ve çizelgelenmesi için matematiksel model önermişlerdir. Bir sonraki aşamada ise kesikli olay simülasyonu yöntemini kullanarak yoğun bakım ünitesi yatak sayısını belirlemişlerdir. Son olarak, gerçek hayattan bir örnek üzerinde önerilen modelin uygulanabilirliğini göstermiş ve belirlenen yoğun bakım ünitesi yatağının sayısının ameliyathane performansı üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir.

Holmgren ve Persson [34], bir ameliyathanede devam eden ameliyatın operasyon sonrası faaliyetleri ile aynı odaya atanan bir sonraki ameliyatın operasyon öncesi faaliyetlerinin örtüşmesine izin vererek çevrim süresini azaltmayı amaçlayan bir yaklaşım önermişlerdir. Üç ameliyat odasından oluşan bir ameliyathane için günlük programların oluşturulup karşılaştırıldığı bir deney sunmuşlardır.

Bilindiği kadarıyla, ameliyathane odaları ve cerrahlar için sıra bağımlı hazırlık zamanlarını dikkate alarak operasyonlara oda ve doktor ataması gerçekleştiren bir çalışma literatürde bulunmamaktadır. Bu çalışmanın birincil katkısı hem odaların hem de cerrahların hazırlık zamanlarının kendinden önceki operasyona bağlı olduğu ameliyathane çizelgeleme

problemini ilk kez ele alıyor olmasıdır. Hazırlık zamanları göz önünde bulundurularak operasyonlara oda ve cerrah ataması gerçekleştirilecektir.



### 3. AMELİYATHANE ÇİZELGELEME PROBLEMLERİ

Ameliyathaneler birçok bölümün etkileşimli olarak çalıştığı, birbirine bağlı süreçlerden oluşan kompleks yapıdaki birimlerdir. Bölümünde uzmanlaşmış birçok personelin gerektiği, ekip çalışmasının öne çıktığı, steril ve teknolojik pek çok kaynağın kullanıldığı bu birimlerde kaynakların tamamını senkronize ve verimli kullanmak oldukça güçtür.

Hastanın özelliğine göre ameliyat öncesi ve sonrası süreçler farklılık gösterse de hastanın ameliyat olma durumu kesinleştiğinde başlayan ameliyathane planlama ve çizelgeleme prosesi benzerdir. Hastanelerde yapılan plan ve çizelgelerin çoğu elle yapılmaktadır. Elle yapılan çizelgeler kompleks bir sisteme en iyi çözümü çoğu durumda getirememekle beraber uzun zamanlar gerektirmekte ve esnek olmamaktadır. Bu nedenle literatürde gerçek hayatta bulunan kısıtları ve gerekli esneklikleri de hesaba katarak yapılan personel çizelgeleme ve ameliyathane çizelgeleme çalışmalarının sayısı artmaktadır [35].

Ameliyathane çizelgeleme problemi birbirine bağlı süreçler, kullanılan yenilenebilir ve yenilenemeyen kaynaklar, tercihler, öncelikler ve belirsizlikler nedeniyle incelemesi zor bir problemidir. Bahsedilen tüm kısıtlar dikkate alınarak kapsamlı bir çalışma yapılamadığında ise ameliyathane için darboğaz oluşturan kaynaklar ve önemli amaçlar doğrultusunda oluşturulan problemler göz önünde bulundurulmaktadır.

#### 3.1. Temel Kavramlar

Ameliyathane çizelgeleme problemlerine ilişkin önemli bazı kavramlar aşağıdaki gibidir. Bu kavramlar hem problemi tanımlamakta hem de problem sınıflarını ortaya koymaktadır.

##### 3.1.1. Hasta türleri

Ameliyathane çizelgeleme literatüründe hastalar acil hastalar ve acil olmayan yani randevulu (elektif) hastalar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Acil hastalar, plan dahilinde olmayan, günün herhangi bir saatinde hastaneye ulaşabilen ve ulaştıktan sonra en kısa süre içerisinde cerrahi müdahalesi yapılması gereken hastalardır. Bazı hastaneler acil hastalar için ayrı ameliyathane bulundururken, bazıları ise ortak ameliyathanede planlı ameliyatların

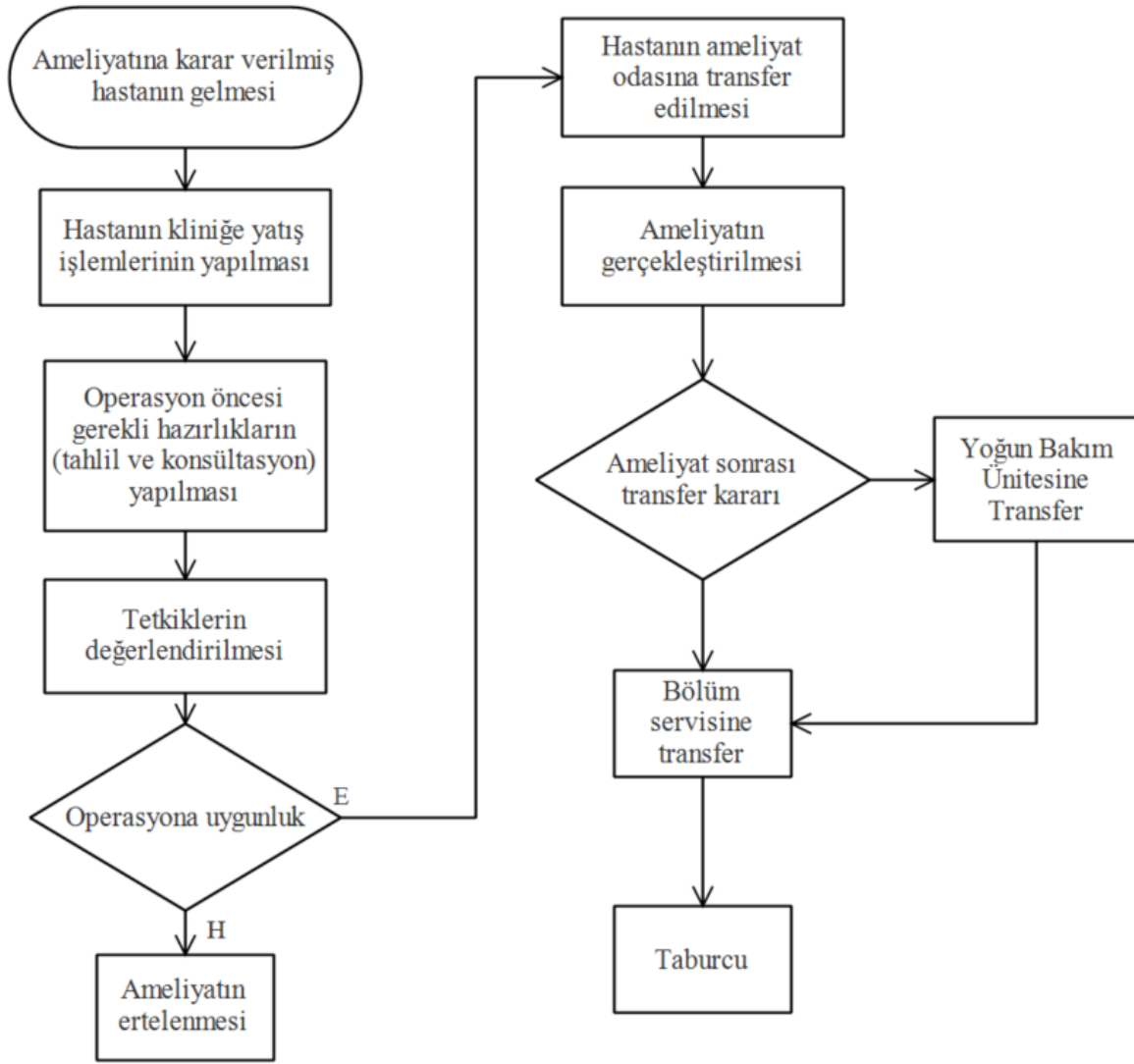
arasındaki zamanlarda gerçekleştirebilmektedir. Böyle bir durum, planlı ameliyat çizelgesinde gecikmelere yol açmakta ve fazla mesai olasılığını yükseltmektedir. Acil hastalar için ayrıca ameliyat odası bulunan hastanelerde ise gelen acil hastalara müdahale hızı yüksektir ve hastaların bekleme süreleri kısadır. Buna karşın maliyetli ameliyat odası kapasitesinin düşük kullanımı söz konusudur [28].

İlk grup, ameliyatı beklenmeyen ve bu nedenle acil olarak yapılması gereken hastaları temsil ederken, ikinci grup yani randevulu hastalar ameliyatı önceden planlanabilecek hastaları temsil eder [11]. Bu hastalar durumu acil olmayan, ameliyatı ileri bir tarihe, doktor ve hastanın birlikte karar vermesi ile gerçekleştirilebilen hastalardır. Randevulu hastalar da yatan hasta ve ayakta tedavi gören hastalar olarak ikiye ayrılmaktadır [36].

Yatan hastaların ve ayakta tedavi gören hastaların ameliyat proses akışları farklılık göstermektedir. Yatan hastalar, öncelikle ilgili servisten veya acil bölümünden hastaneye kabul edilip gerekli tahlil ve işlemlerin yapılması için servisteki odalarına alınırlar. Buradaki işlemleri tamamlandıktan sonra ameliyathaneye alınırlar ve ameliyat bitişine müteakip yoğun bakım ünitesi veya ameliyat sonrası bakım ünitesinde bir süre bekletilip ilgili hastane servisine gönderilirler. Ayakta tedavi gören hastalar ise ameliyat günü sabahı hastaneye gelirler ve ameliyat sonrasında bir süre bekletildikleri dinlenme odasından taburcu edilirler [28]. Şekil 3.1’de randevulu yatan hastaya ait proses verilmektedir.

Acil hastaların ameliyat prosesleri ise randevulu hastalara göre farklılık göstermektedir. Hastaneye acil bölümünden giriş yapan hastaların ön muayenesi ve varsa gerekli tahlilleri yapılır. Mesai saatleri içerisinde hastaneye ulaşan ve acil ameliyat odası bulunmayan hastanelerde, acil ameliyatlara plan dahilinde olan ameliyat sırasını bölüp gerçekleştirilebilmektedir. Bu nedenle ameliyatın gerçekleştirileceği uygun ameliyat odasının ayarlanmasını beklemek durumundadır.

Özel acil ameliyat odası bulunan hastanelerde ise ameliyat beklemeden gerçekleştirilebilir. Acil hastanın ameliyatı başladıktan sonraki prosesi randevulu hasta ile benzer şekilde işlemektedir.



Şekil 3.1. Yatan hasta ameliyat prosesi

### 3.1.2. Çizelge türleri

Literatürde çizelgeleme türleri açık çizelgeleme, blok çizelgeleme ve modifiye blok çizelgeleme olmak üzere üçe ayrılmaktadır.

Açık çizelgeleme stratejisinde zaman blokları belirli cerrahi gruplara ait değildir ve cerrahların istekleri doğrultusunda cerrahi işlemler planlanmaktadır. Her çizelgeleme periyodu için boş bir çizelge sunar. Bu çizelge cerrahlardan gelen bilgi dahilinde ilk gelen ilk servis görür prensibi ile doldurulur [8]. Bu yöntem Dexter vd. [37]'nin çalışmasında “herhangi bir gün” olarak da isimlendirilir çünkü cerrahlar cerrahi vaka için istedikleri günü seçebilirler. Bu süreçte farklı doktorların ya da bölümlerin operasyonları aynı çalışma

periyoduna art arda atanabilir. Açık çizelgele yöntemi kullanılarak yapılmış günlük ameliyathane çizelgesine Çizelge 3.1’de örnek verilmiştir.

Çizelge 3.1. Açık çizelge örneği

|       | Oda 1                                  | Oda 2                                  | Oda 3                              | Oda 4                            |
|-------|----------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| 08:00 | Kalp ve Damar Cer.<br>Hasta No.5       | Genel Cer.<br>Hasta No.7               | Beyin ve Sinir Cer.<br>Hasta No.12 | Kalp ve Damar Cer.<br>Hasta No.1 |
| 09:00 |                                        |                                        |                                    |                                  |
| 10:00 |                                        |                                        |                                    |                                  |
| 11:00 |                                        |                                        |                                    |                                  |
| 12:00 |                                        | Ortopedi ve Travmatoloji<br>Hasta No.2 | Beyin ve Sinir Cer.<br>Hasta No.10 |                                  |
| 13:00 | Üroloji<br>Hasta No.4                  |                                        |                                    |                                  |
| 14:00 |                                        |                                        |                                    |                                  |
| 15:00 | Ortopedi ve Travmatoloji<br>Hasta No.6 | Üroloji<br>Hasta No.8                  | Genel Cer.<br>Hasta No.11          | Genel Cer.<br>Hasta No.3         |
| 16:00 |                                        | KBB Hasta No.9                         |                                    |                                  |
| 17:00 |                                        |                                        |                                    |                                  |

Blok çizelgeleme stratejisinde ise çizelge periyodu cerrahlara, cerrahi uzmanlık alanlarına veya cerrah gruplarına ayrılan oturumlara bölünmüştür [10]. Gerçekleştirilecek operasyonları olsun ya da olmasın kendi süreleri önceden ayrılmıştır ve yalnızca kendileri kullanabilirler. Cerrahlar ya da bölümler bu süre içerisinde kendi operasyonlarını organize edebilirler. Blok çizelge örneği Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Blok çizelge örneği

|       | Oda 1                    | Oda 2                      | Oda 3                    | Oda 4                  |
|-------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|------------------------|
| 08:00 | Genel Cerrahi            | Kalp ve Damar Hastalıkları | Ortopedi ve Travmatoloji | KBB                    |
| 09:00 |                          |                            |                          | Beyin ve Sinir Cerrahi |
| 10:00 |                          |                            |                          |                        |
| 11:00 |                          |                            |                          |                        |
| 12:00 |                          |                            |                          |                        |
| 13:00 | Ortopedi ve Travmatoloji |                            |                          |                        |
| 14:00 |                          |                            |                          |                        |
| 15:00 |                          |                            |                          |                        |
| 16:00 |                          |                            |                          |                        |
| 17:00 | Üroloji                  |                            |                          |                        |

Modifiye blok çizelgeleme ise blok çizelgeleme stratejisinin esnek halidir. Esneklik iki farklı yolla sağlanabilir. Ya ameliyat odalarının bazıları önemli cerrah ve cerrahi gruplara atanırken bazıları çizelgelenmemiş olanlar için açık bırakılır ya da kullanılmayacak zaman

blokları ameliyat gününden belirli bir süre öncesinde serbest bırakılır [38]. Modifiye blok çizelgeleme sistemini, çizelgeleme sınıflandırmasına Patterson [39] eklemiştir. Modifiye blok çizelgeleme yöntemi ile yapılmış çizelge örneği Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Modifiye blok çizelgeleme örneği

|       | Pazartesi                | Salı                     | Çarşamba      | Perşembe               | Cuma                       |
|-------|--------------------------|--------------------------|---------------|------------------------|----------------------------|
| 08:00 | Ortopedi ve Travmatoloji | Üroloji                  | Genel Cerrahi | Beyin ve Sinir Cerrahi | Kalp ve Damar Hastalıkları |
| 09:00 |                          |                          |               |                        |                            |
| 10:00 |                          |                          |               |                        |                            |
| 11:00 |                          |                          |               |                        |                            |
| 12:00 |                          | Ortopedi ve Travmatoloji |               |                        |                            |
| 13:00 |                          |                          |               |                        |                            |
| 14:00 | Genel Cerrahi            |                          |               |                        |                            |
| 15:00 |                          |                          | KBB           |                        |                            |
| 16:00 |                          |                          |               |                        |                            |
| 17:00 |                          |                          |               |                        |                            |

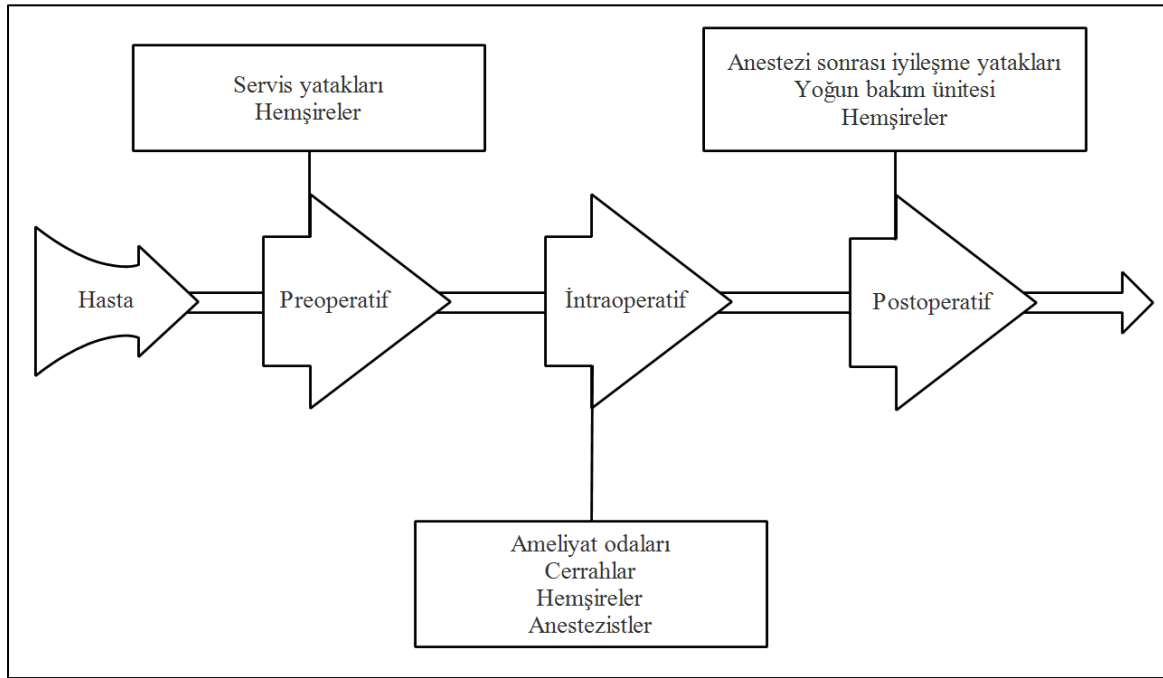
### 3.1.3. Ameliyat süreci

Ameliyat prosedürü esas olarak ameliyat öncesi (preoperatif), cerrahi (intraoperatif) ve ameliyat sonrası (postoperatif) aşamalarından geçer.

Preoperatif aşama ameliyat öncesi evre olarak tanımlanır. Bu aşamada ilgili serviste yer alan yataklar ve hemşireler gibi çeşitli kaynaklar vardır. Hemşireler çoğu hastanede gün boyu ameliyat öncesi hazırlık birimlerinde kalır, kayıt ve belge kontrolü de dahil olmak üzere cerrahi vakaların hazırlanmasına ilişkin görevler yaparlar. Ameliyat öncesi aşamada hasta cerrahi tesise ulaşır, hemşire tarafından kayıtları alınır, laboratuvar verileri kontrol edilir ve hasta prosedür için hazırlanır. Anestezist, hemşireler, cerrah ve ameliyat odası hazır olduğunda, hasta programlanmış ameliyat odasına taşınır. Hastanın durumu izlenir ve uyuşturulur [40].

İntraoperatif aşama cerrahi aşama olarak tanımlanır. Ameliyatı gerçekleştirmek için gerekli personelleri (cerrahlar, hemşireler, anestezistler), odaları ve ekipmanları içerir. Genelde cerrahi operasyon en az bir cerrah, bir anestezi uzmanı ve iki hemşire gerektirir. Bazen, bazı basit cerrahi vakalar için bir cerrah, bir anestezist ve bir hemşire yeterlidir. Bu nedenle ameliyat ekibindeki sayı ve nitelikleri ameliyatın karmaşıklığına göre belirlenir.

Postoperatif aşama evresi ameliyat sonrası iyileşme evresi olarak tanımlanır. Bu bölümde anestezi sonrası bakım ünitesinde bulunan yataklar, anestezi uzmanları ve yoğun bakım ünitesindeki yataklar gereklidir [41]. Ameliyat sonrası hasta, servisteki yatağına taşınmadan veya taburcu edilmeden önce anestezi sonrası bakım ünitesine nakledilir. Az sayıda hasta ameliyat sonrası yoğun bakım ünitesine transfer edilmeyi gerektirecek durumdadır. Ameliyatı gerçekleştiren cerrah ve anestezi uzmanları bu tür kabul kararlarını birlikte alırlar ve kabullerin düzenlenmesinden sorumludurlar. Anestezi uzmanı, yoğun bakım ünitesini bilgilendirmeli ve transferden önce yatak, ekipman ve personel için ayarlama yapmalıdır. Bazı durumlarda, hasta anestezi sonrası bakım ünitesine alınır ve daha sonra yoğun bakım ünitesine taşınır [40]. Ameliyat süreci Şekil 3.2. 'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Ameliyat Süreci

#### 3.1.4. Ameliyathanede kullanılan zaman kavramları

Ameliyathane çizelgeleme prosesinin cerrahi aşamasında kullanılan zaman kavramları ameliyat süreleri, hazırlık zamanları, fazla mesai süreleridir. Ameliyathanede verimlilik az kullanılmış ya da fazla kullanılmış ameliyathane süreleri cinsinden tanımlanmaktadır. Bu nedenle ameliyat odasının etkin kullanılması ve bu etkinliğin artırılabilmesi için kullanılan sürelerin gerçeğe yakın belirlenmesi gerekmektedir. Fazla kullanılan ameliyat odası süresinin maliyeti, hem fazla mesai doğrudan maliyetlerini hem de olası çalışan memnuniyetsizliği, istifa ve işe alımın dolaylı maliyetlerini içerir. Az kullanılmış süreler ise,

gün içerisinde gerçekleştirilebilecekten daha az randevulu hasta planlanmasına, ameliyat odalarının ve uzman personelin boş beklemesine ve hasta bekleme listelerindeki artışa neden olmaktadır. Bu durum da personel ve ameliyathane giderleri sabit kalırken, gelirin azalmasının sebebidir [42].

### Ameliyat süreleri

Ameliyat süreleri hastanın ameliyatının başlangıcından ameliyat odasını terk edene kadar geçen süre olarak tanımlanır [42]. Ameliyat odalarının planlanabilmesi ve zamanın verimli kullanılabilmesi için ameliyat sürelerinin bilinmesi gerekir. Ameliyatlar doğası gereği belirsizliklere sahip olmasına rağmen, planlama yapılması için çoğu çalışmada deterministik olarak dikkate alınmaktadır. Ameliyat sürelerinin stokastik olması odaların kullanımını hesaplamayı zorlaştırmaktadır. Ameliyat süreleri olması gerekenden fazla hesaplandığında ameliyat odasının kullanımı düşerken, az hesaplandığında fazla mesai ya da ameliyat iptallerine neden olmaktadır. Ameliyat sürelerinin üretilmesinde literatürde genel olarak normal ve log-normal dağılımlardan faydalanılmıştır. Strum vd. [43], çalışmasında cerrahi sürelerin hesaplanması için normal ve lognormal dağılımlardan faydalanmış ve istatistiksel analizleri ile gerçek sürelerine en yakın değerlerini karşılayacak olasılık dağılımlarının lognormal dağılımlar olduğunu göstermiştir.

### Hazırlık zamanları

Hazırlık zamanları literatürdeki çalışmalarda çoğunlukla ihmal edilmiş veya işlem zamanlarının bir parçası olarak düşünülmüştür. Değerlendirme kriterleri farklılığı nedeniyle hazırlık zamanlarının ihmal edilmesi ya da işlem zamanlarının bir parçası olarak düşünülmesi bazı çizelgeleme problemleri için kullanışlı olabilirken diğer birçok problemde hazırlık zamanı ayrı olarak göz önüne alınır. Ayrı hazırlık zamanları problemlerde iki şekilde kullanılabilir. Birincisinde hazırlık zamanı sadece işlem görecektir işe bağlıdır ve sıra bağımsız olarak tanımlanır. İkincisinde ise hazırlık zamanı hem işlem görecektir işe, hem de ondan önce yapılan işe bağlıdır ve sıra bağımlı olarak ifade edilir [44].

Hazırlık zamanları, ameliyathane için gelir kaybına neden olan “katma değeri olmayan” zamanı temsil eder. Uygulamada ise olması şart olan sürelerdendir. Biten bir operasyonun ardından yeni operasyonun başlayabilmesi için odada ekipman değişikliği, hazırlığı ve

sterilizasyonu, oda temizliği gibi bazı hazırlıkların yapılması gereklidir. Ameliyata girecek olan personelin de art arda operasyonları arasında dinlenmek ve yeni operasyona hazırlık yapmak için gerekli hazırlık süreleri mevcuttur. Bu süreler oda hazırlık zamanı ve cerrahi personel hazırlık zamanı olarak adlandırılır.

Randevulu ameliyat çizelgelemede oda hazırlık zamanı çok önemli bir faktördür. Bir ameliyat odasında operasyonun bitmesi ile aynı odada yeni operasyonun başlamaya hazır olduğu süreyi temsil eder. Ameliyatlarda kullanılan teknolojik ve steril kaynaklar farklılık gösterdiği için özellikle bölümler arasında paylaşılan hastanelerde bu sürelerin etkisi büyüktür. Aynı türde ve basit operasyonlar arasında daha kısa hazırlık zamanları gerekirken, farklı türde operasyonlar arasında ise daha kapsamlı hazırlıklar için uzun hazırlık zamanları gerekmektedir. Bu nedenle hazırlık zamanları art arda iki ameliyatın türüne bağlıdır ve bu nedenle sıra bağımlıdır [15]. Ancak sıra bağımlı hazırlık zamanları problemin zorluk seviyesini artırdığı için genellikle bu süreler her operasyonun ardından sabit bir süre olarak alınabilmektedir [18,17].

Cerrahlar da bir operasyonun bitişinin ardından, biten operasyona ait notların alınması, hastanın transfer edileceği bölümün kararının anesteziist ile beraber verilmesi, bir sonraki operasyonundan önce bir miktar dinlenmesi ve yeni operasyonuna steril giyinme ve el yıkama talimatlarına uygun şekilde hazırlanması gerekmektedir. Çalışmalarda göz ardı edilen bu hazırlık zamanları ameliyat çizelgesinin aksamalara neden olmadan uygulanmasını ve ameliyat odasının etkin kullanımını etkilemektedir.

#### Fazla mesai süreleri

Ameliyathane planlanmasındaki eksikler ve hatalar ameliyat iptallerine ya da fazla mesaiye neden olmaktadır. Ameliyat iptali, yatan hasta için zaman ve nakit kaybına neden olurken, hasta memnuniyetsizliğini de üst seviyeye çıkarmaktadır. Bu hastane hizmet kalitesinin düşmesine ve tercih edilmemesine sebebiyet vermektedir. Bu nedenle hastane yöneticileri ameliyat iptali yerine fazla mesai ile tüm operasyonları tamamlamayı tercih etmektedir. Personelin mesai süresi dışında kalan süreler fazla mesai süreleri olarak tanımlanır. Ameliyat odasının verimli kullanılmamasından doğan fazla mesailer hastaneye maliyet olarak dönmektedir. Aynı zamanda sürekli oluşan fazla mesailer personel memnuniyetsizliğine de neden olabilmektedir.

### 3.1.5. Performans ölçütleri

Ameliyathanelerin verimli bir şekilde programlanması ve çalıştırılması gerekir çünkü bunlar bir bütün olarak kurumun mali sağlığına etki ederler. Bu nedenle bazı yazarlar, cerrahi tesislerin diğer rekabetçi ticari girişimlerle benzer olduğuna inanmaktadır, çünkü hizmetleri rekabetçi bir avantajla sunabilmeleri gerekir. Yöneticilerin bir cerrahi tesisin rekabetçi olup olmadığını ve uygun değilse, rekabetçi hale getirmek için ne gibi önlemler alınabileceğini belirlemeleri gerekir [40]. Bu önlemlerin alınabilmesi için öncelikle tesisin performansını nelerin etkilediği ortaya konmalıdır.

Cardoen vd. [11], çalışmasında ameliyathane planlama ve çizelgeleme prosedürlerini değerlendirmek için birbiriyle ilişkili ve etkileşimli 8 ana performans ölçütünü belirlemiştir. Bu performans ölçütleri literatürdeki çoğu çalışmanın amaçlarını oluşturmaktadır.

- Bekleme süreleri
- Verim
- Kaynak kullanımı
- Kaynak seviyelendirme
- Tamamlanma zamanı
- Hasta erteleme
- Finansal değerlendirme
- Tercihler

Uzun bekleme listeleri, genel sağlık hizmetlerinde en çok duyulan şikayetler arasındadır ve bu, hastaların bekleme sürelerini azaltmayı amaçlayan birçok çalışmayı haklı çıkarmaktadır. Hasta memnuniyetinin önemli olduğu kadar cerrahlarında memnuniyetine önem verilmesi; ayrıca, cerrahın ameliyathanede pahalı bir kaynak olması nedeniyle cerrahların bekleme süresinin azaltılması birçok araştırmaya konu olmuştur [11,45].

İkinci amaç olan verim, hastanın bekleme süresi ile yakından ilgilidir. Literatürde verimlilik adı altında sınıflandırılan çalışmaların çoğu dolaylı olarak daha kısa bekleme sürelerini sağlayan tedavi edilen hasta sayısını artırmaya odaklanır. Böylece hizmet gören hasta sayısının artması işletme verimliliğine olumlu etki etmektedir.

Üçüncü amaç ise kaynak kullanımıdır. Ameliyathanede ameliyatların gerçekleştirilebilmesi için pek çok senkronize kaynak gereklidir. Birbirine bağlı süreçlerin tamamında personel, ekipman, oda ve yataklar kullanılmaktadır. Bu kaynaklar çoğunlukla eş zamanlı olarak kullanıldığı için kullanım esnasında bekllemeler oluşmaktadır. Kaynakların kullanım oranı ameliyathane çizelgeleme performans ölçütlerinden birini oluşturmaktadır. Kaynaklar hastane için maliyet oluştururken aynı zamanda gelir sebebidirler. Dolayısıyla en iyi fayda-maliyet dengesinin sağlanması için en büyük kaynak kullanımının da sağlanması gerekir [28].

Dördüncü amaç olan kaynak seviyelendirme, hastanenin önemli kaynaklarının analizi ve modellenmesi, dengesiz kullanımların tespiti amacıyla kullanılan yönetim aracıdır. Kaynak seviyelendirme talep üzerinde öngörüler yaparak, talebi karşılayabilmeyi ve talepteki dalgalanmalarla başa çıkabilmeyi amaçlamaktadır.

Yaygın olarak çalışılan beşinci amaç ise tamamlanma zamanıdır. Genel olarak, ilk hastanın girişi ile son hastanın işlemlerinin bitmesi arasındaki zaman olarak tanımlanabilir. Tamamlanma zamanı ameliyathane kullanımının hesaplanmasında kullanılmaktadır. Aynı zamanda fazla mesainin azaltılmasına da yardımcı olmaktadır. Tamamlanma zamanı sıklıkla ameliyathane için değerlendirilse de, Marcon ve Dexter [46] 'in çalışması anestezi sonrası bakım birimi gibi ameliyathane ile yakın ilgili kaynaklardan biri için de çalışılabileceğini göstermektedir.

Altıncı amaç, hasta erteleme veya reddetme sayısının en aza indirilmesi ile ilgilidir. Yıldırım [28]'e göre; ertelenen ve iptal edilen ameliyatlar düşük servis kalitesinin bir göstergesi olup ayrıca yeniden çizelgeleme ve atama süreçleri için ameliyathane ve hastaneye yeni yönetsel iş yükü ve maliyet getirir. Çizelgeleme hataları, yetersiz hasta hazırlığı, ekipman eksikliği gibi sebeplerden kaynaklanabilen ameliyat erteleme ve iptallerinin sebeplerinin araştırılması ve en küçüklenmeye çalışılması hasta, hastane ve ameliyathane için olumlu sonuçlar getirebilecektir.

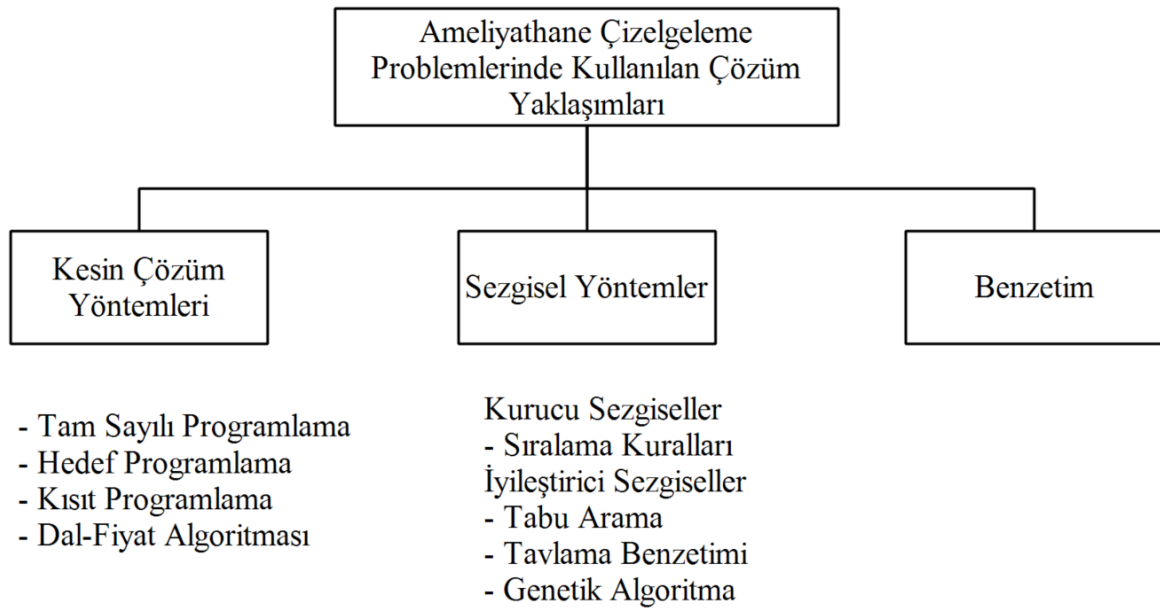
Ameliyathane çizelgeleme problemlerinde en genel hedeflerden biri de mali açıdan beklenen performans dereceleridir. Genel olarak bir ameliyathane planlama ve çizelgeleme problemi diğer hedefler dikkate alındığında bile dolaylı olarak maddi açıdan etkisi görülmektedir.

Yani bu sebeple aslında bu ölçüt sağlık hizmeti veren birimlerin temel taşları arasında yer almaktadır.

Son kategori ise ameliyathane sürecine dahil olan personelin veya hastaların tercihlerini içerir. Cerrahların ameliyata gireceği ekip (hemşireler ve anesteziistler) ve operasyonu gerçekleştireceği zamanlar ile ilgili tercihleri olabileceği gibi, hastaların da kendi operasyonlarının öncelikleri ile ilgili tercihleri olabilmektedir. Hem personel hem de hasta memnuniyetini konu alan bu kategori ile sunulan sağlık hizmetinin kalitesi arasında ilişki kurulmuştur.

### 3.2. Ameliyathane Çizelgeleme Problemlerinin Çözüm Yöntemleri

Ameliyathane çizelgeleme problemlerinin çözümü için literatürde sık kullanılan yöntemler Şekil 3.3 'deki gibi sınıflandırılabilir.



Şekil 3.3. Ameliyathane çizelgeleme probleminde kullanılan çözüm yaklaşımları

#### 3.2.1. Kesin çözüm yöntemleri

Kesin çözüm yöntemleri kapsamında matematiksel programlama yaklaşımları ameliyathane planlama ve çizelgeleme problemlerini çözmek için popülerdir. Popüler olmasının nedeni ILOG, GAMS, LINDO gibi hızla gelişen çözücülerden kaynaklanmaktadır. Matematiksel programlama yöntemleri mümkün olan bütün çözüm kümesini araştırmak yerine kısıtları

sağlamak şartıyla bunların bir kısmını araştırarak optimum çözümü bulmayı amaçlamaktadır. Fakat problemin boyutu büyüdükçe başarı şansı azalır [4]. Literatürde ameliyathane çizelgeleme problemleri için en yaygın kullanılan kesin çözüm yöntemleri tam sayılı programlama, hedef programlama, kısıt programlama ve dal-fiyat algoritmasıdır.

Tümü tam sayılı programlama, tüm değişkenlerin tam sayı ile sınırlandırıldığı modeldir. Değişkenlerin sadece bir kısmının tam sayı olduğu model ise karma tam sayılı programlama olarak tanımlanmaktadır. Çoğu NP-zor sınıfında yer alan çizelgeleme problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılan tam sayılı programlama, kolay modelleme olanağı sunmasına karşın, en iyi çözüm elde etmede çok fazla işlem yükü gerektirmektedir [28].

Hedef programlama, birden fazla ve hatta birbiri ile çelişen amaçların olduğu durumlarda karar vericinin tüm amaçlarını en azından belli bir düzeyde karşılayan bir karar verebilmesi için birden fazla amacı tek bir amaca indirgeyen bir programlama türüdür [47]. Hedef programlama ile aynı anda birden fazla ve farklı ölçekli hedefler saptanabilir ve belirlenen kısıtlar altında bu hedeflere ulaşılmasına çalışılır [48]. Hedef programlama modeli oluşturulurken, probleme ait hedefler modele kısıt olarak girilir. Bununla birlikte amaç fonksiyonu ise hedeflerden sapmaları içerecek şekilde yeniden formüle edilecektir. Bu şekilde birden fazla olan amaç bir amaca indirgenmiş olacaktır [47].

Kısıt programlama hesaplama ve mantığa dayalı tekniklerin kombinasyonunu olarak geliştirilen bir problem çözme yöntemidir. Kısıtlar, her birisi tanımlanan bir alandaki değerlerden birisini alabilen değişkenler arasındaki ilişkileri ifade etmek amacıyla kullanılan formlardır. Kısıt programlama, tanımlı alanlardan oluşan değişkenlerin kombinasyonu olarak tanımlanabilir. Bu yöntemde, ana mantık problemin sahip olduğu kısıtların matematiksel ve mantıksal ifadelerle oluşturulması ve uygun çözüm alanlarının tanımlanmasıdır. Tanımlanan çözüm alanlarından değişkenlerin alabileceği uygun değerler bulunur ve problemin çözümü elde edilir [49].

Dal-fiyat ve dal-kesme algoritmaları dal ve sınır algoritmasından türemişlerdir. Cerrahi operasyon atama problemleri gibi büyük ölçekli karışık tam sayılı programlamanın başarılı çözümü, doğrusal programlama gevşetmelerinde uygulanabilir çözümlerin iyi bir yaklaşımını yapan formülasyonları gerektirir. Bu düşünceye dayanarak, dal-kesme ve dal-fiyat yaklaşımlarına büyük özen gösterilmiştir. Dal-kesme ve dal-fiyat algoritmalarının

Çalışma prensipleri benzerdir. Dal-kesme algoritması satır üretimine odaklanırken, dal-fiyat algoritması sütun üretimine odaklanmaktadır [50].

### 3.2.2. Sezgisel yöntemler

Kesin özüm yöntemleri küçük boyutlu ve kolay problemleri kısa sürede başarıyla çözüp optimal sonuca ulaşabilirler. Ancak çoğu çizelgeleme problemi NP-Zor olduğundan kesin çözüm yöntemleri ile büyük boyutlu problemleri çözmek mümkün olmamaktadır. Bu nedenle, büyük boyutlu problemlere kaliteli çözümleri kabul edilebilir sürelerde üretmek için farklı sezgisel yaklaşımlar geliştirilmiştir. Sezgisel yöntemler, optimal çözümü garanti etmeyen fakat optimal çözümü olası bir uzaklıkla çevreleyen, kısa sürelerde yaklaşık çözümler veren algoritmalarlardır [4].

Sezgisel yöntemler kurucu ve iyileştirici olmak üzere iki temel sınıfa ayrılır. Kurucu sezgiseller genellikle çok kısa zamanlarda uygun çözüm üretirler, ancak çözüm kalitesi tatmin edici olmayabilir. Bu nedenle iyileştirici sezgisellerde sadece kurucu sezgisel ile elde edilen çözümle yetinilmeyip, bu özümleden hareketle daha iyi çözümler araştırılır. Tavlama benzetimi, genetik algoritmalar, tabu arama, karınca kolonisi, kuş sürüsü vb. tüm iyileştirici yöntemlerde ana amaç budur. Süre yönünden bakıldığında iyileştirici sezgiseller kurucu sezgisellere göre daha uzun süreler gerektirirler; ancak daha iyi çözümler elde ederler [51].

#### Kurucu sezgiseller

Çizelgeleme problemleri kapsamında kurucu sezgiseller olarak sıralama kuralları sıklıkla kullanılmaktadır. Çizelgelenecek işler, üretilecek çizelgenin amacına ve ulaşmak istenen esas amaca göre belirli kurallara göre çizelgelenir. Sıralama kurallarının kullanımının ve anlaşılmasının kolay olması açısından oldukça avantajlıdır [52]. Literatürde sık kullanılan sıralama kurallarından bazıları aşağıda açıklanmıştır.

En uzun işlem süresi (LPT) kuralı, en uzun işlem süresine sahip olan işe ilk çizelgelenmesi için öncelik verir. En uzun işlem süresi kuralına göre, en kısa işlem süreli işin ataması en son yapılacaktır. İşler işlem sürelerine göre büyükten küçüğe doğru sıralanır. Bu sıralamaya göre işlere çizelgeleme önceliği tanınır.

En kısa işlem süresi (SPT) kuralı, en kısa işlem süresi olan işe ilk çizelgelenmesi için öncelik verir. En kısa işlem süresi kuralına göre, en uzun işlem süreli işin ataması en son yapılacaktır [32].

En erken teslim tarihi (EDD) kuralı, işleri teslim tarihi en erken olandan en geç olana doğru sıralar. En erken teslim tarihi kuralı atama önceliğini teslim tarihi en erken olan ve henüz işlem görmemiş olan işe verir [4].

İlk giren ilk çıkar (FCFS) kuralı, sisteme gelen ilk işin önce işlem görmesi şeklinde sistemi yönlendirir.

En kısa hazırlık süreli sıralama (SST) kuralında en kısa hazırlık süresine sahip iş makinede ilk işlem görececek önceliğe sahiptir.

En uzun hazırlık süreli sıralama (LST) kuralı ise en kısa hazırlık süreli sıralama kuralının aksine uzun hazırlık süreli işlerin önce işlem görmesini temel alır [28].

### İyileştirici sezgiseller

Mevcut çözümün komşularının araştırılmasıyla karmaşık problemlerin en iyi ya da yaklaşık en iyi çözümünü bulmaya çalışan komşuluk arama yöntemleri, üretilen büyük çözüm alanı içerisindeki daha kabul edilebilir yerel alt çözümleri araştırır. Başarılı bir arama stratejisi geliştirmek için komşular arasındaki ilişkilerin tanımlandığı komşuluk yapısının tasarımı oldukça önemlidir [28].

#### *Tabu arama*

Tabu arama, komşu kabul yapısı hariç tavlama benzetimine oldukça benzemektedir. Bu yaklaşımda komşu kabulü olasılıklı değildir. Bununla beraber daha önce ziyaret edilmiş bir komşunun tekrar ele alınmasını önlemek için, ziyaret edilen komşulara ilişkin özellikler tabu listesi olarak adlandırılan bir yasak listesinde bir süre tutularak tekrar üretilmesini önler. Böylece algoritma yerel minimumdan kolay kurtulur. Ancak üretilen komşunun amaç fonksiyonu değeri aspirasyon ölçütünü sağlıyorsa o komşu tabu listesinde olsa bile yeni çözüm olarak kabul edilir. Tabu listesindeki özellikler bir süre sonra listeden düşürülerek

tekrar ele alınmasına imkan tanınır. Bu sayede çözüm global optimuma doğru hızlı bir şekilde ilerletilmeye çalışılır [53].

#### *Tavlama benzetimi*

Tavlama benzetimi algoritması ilk defa Kirkpatrick vd. [54] tarafından ortaya konulan stokastik bir yaklaşımdır. Bu algoritma, metallerin fiziksel olarak tavllanması işleminden esinlenilerek kombinatorial problemlerin çözümleri için geliştirilmiştir. Metallerin fiziksel olarak tavllanması işleminde, bir metal eriyene kadar ısıtılır ve metalin sıcaklığı, metal en düşük enerji durumuna veya taban durumuna erişinceye kadar yavaşça düşürülür [55].

Tavlama benzetimi algoritmasında başlangıç sıcaklığında başlangıç çözümü oluşturulur ve amaç fonksiyonu hesaplanır. Belirlenen değişiklik operatörü ile komşu çözüm üretilir. Komşu çözümün amaç fonksiyonu hesaplanır ve mevcut çözüm ile karşılaştırması yapılır. Eğer komşu çözümün amaç fonksiyonu, mevcut çözümün amaç fonksiyonundan iyi ise komşu çözüm mevcut çözümün yerini alır. Eğer komşu çözümün amaç fonksiyonu mevcut çözümün amaç fonksiyonundan daha kötü ise belirlenen kriterlere göre kabul veya reddedilir. Sıcaklık azaltılarak, bitiş sıcaklığına ulaşana kadar hesaplamalara bu şekilde devam edilir. Tavlama benzetimi algoritması ilerideki bölümde daha detaylı olarak anlatılmıştır.

#### *Genetik algoritma*

Genetik algoritmalar, doğal seçim ilkelerine dayanan bir arama ve optimizasyon yöntemidir. Karmaşık çok boyutlu arama uzayında en iyinin hayatta kalması ilkesine göre global en iyi çözümü arar. Temel ilkeleri Holland [56] tarafından ortaya atılmıştır. Genetik algoritmalar problemlere tek bir çözüm üretmek yerine farklı çözümlerden oluşan bir çözüm popülasyonu üretir. Böylelikle, arama uzayında aynı anda birçok nokta değerlendirilmekte ve sonuçta da global en iyi çözüme ulaşma olasılığı yükselmektedir [57]. Genetik algoritma hakkında daha detaylı bilgi ileriki bölümlerde verilmiştir.

### **3.2.3. Benzetim**

Benzetim, gerçek bir sistemin modelini tasarlayarak, bu model üzerinde bilgisayar ortamında denemeler yapılmasını ve gerçek sistemin davranışlarının incelenmesini veya

tahmin edilmesini sağlayan yöntemdir. Benzetim gerçek sistem üzerinde deney yapmanın mümkün olmadığı durumlarda veya yeni kurulacak bir sistemin kurulmadan önce analizi yapılmak isteniyorsa kullanılabilir. Kurulacak olan sistemin bilgisayar ortamında bir benzeri modellenir ve sistemin nasıl çalışacağı ile ilgili kullanıcıya fikir vermesi amaçlanır. Yapılabilecek değişikliklerin sistemin performansını nasıl etkileyeceğini gözlemleme imkanı sunar [58].

Benzetim tek başına bir eniyileme tekniği olmayıp sadece karar değişkenlerinin bir kombinasyonu için tahmini değerlerin elde edilmesini sağlar. Dolayısıyla, zm uzayı büyüdükçe karar değişkenlerinin oluşturacağı tüm kombinasyonların benzetim ile denenmesi imkansızdır. Bu nedenle, benzetim modeli ve eniyileme algoritmalarının birlikte kullanıldığı benzetim eniyilemesi teknikleri günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [59].

## 4. GENETİK ALGORİTMALAR

Holland [56] tarafından 1975 yılında “Adaptation in Natural and Artificial Systems” adlı kitabında tanıtılan Genetik algoritma, Darwin'in en güçlülerin hayatta kalma ilkesine dayanan bir optimizasyon yöntemidir. Bu yaklaşım çeşitli kombinatoriyel optimizasyon problemlerine başarıyla uygulanmıştır [16].

Genetik algoritmalar konusundaki esas gelişme ise, John Holland'ın doktora öğrencisi David E. Goldberg [60] tarafından 1985 yılında hazırlanan “Gaz Boru hatlarının Genetik Algoritma Kullanılarak Denetlenmesi” konulu tezi ile sağlanmıştır. Bu ilk uygulamasından sonra 1988 yılında yayımladığı “Makine Öğrenmesi, Arama ve Optimizasyon için Genetik Algoritma” adlı kitabı, genetik algoritmayı farklı bir çerçeveye taşımış ve günümüzde halen genetik algoritma konusunda en kapsamlı referans olma özelliğini korumaktadır [61,62].

Genetik algoritmalar, canlıların doğal hayatlarını örnek alır ve güçlü bireylerin hayatlarına devam edip, zayıf bireylerin yok olması prensibi ile çalışır. Çocuk kendisini meydana getiren ebeveynlerinin genlerini taşımaktadır. Bu algoritma da ebeveynlerin genlerinden oluşan çocuk bireylerin koşullara uyum sağlayıp, hayatta kalmalarına dayanır. Çocuk bireyler ebeveynlerinden iyi genleri alabileceği gibi kötü genleri de alabilmektedir. Kötü genlere sahip çocuk bireyler varlıklarını uzun süre sürdürememektedir [63].

Genetik algoritmada çözüme yönelik en küçük bilgi biyolojideki genleri temsil ederken, genlerin toplu kümesi de kromozomu oluşturmaktadır. Genetik algoritmaların her bir bireyi yani problemin her bir olası çözümü kromozom şeklinde temsil edilir. Birden fazla sayıda kromozomun oluşturduğu küme ise popülasyon olarak adlandırılır. Her yeni popülasyon, bir önceki popülasyonda iyi olan bireylere daha fazla yaşama şansı veren stokastik bir değişim sürecinin uygulanmasıyla elde edilmektedir [64].

Genetik algoritmada çözüm gösterimi bir problemten diğerine farklılık gösterebilmektedir. Genetik algoritma popülasyonu kromozomlardan oluşur ve iterasyonlardan oluşan bir süreçle nüfus daha kaliteli bir popülasyona doğru evrilir. Algoritmanın ilk adımı, belirli sayıda birey (çözüm) içeren rastgele veya bazı probleme özgü kurucu sezgisellerin uygulanmasıyla bir popülasyon oluşturulmasıdır. Her iterasyonda, bireyin kalitesi uygunluk

fonksiyonu ile değerlendirilir. Popülasyonu geliştirmek ve daha yüksek kalitede bireyler elde etmek için her iterasyonda belirli olasılıklar ile bireylere çaprazlama ve mutasyon operatörleri uygulanır. Çaprazlama operatörünün işlevi, ebeveynlere ait kalıtsal özellikleri kullanarak çocukları oluşturmaktır. Ayrıca, bazı bireyler de mutasyondan etkilenecektir. Mutasyon operatörü, bir bireyin kromozomunun bir veya daha fazla genini mutasyona uğratır. Her iterasyonun sonunda, algoritma uygunluk fonksiyon değerlerine göre daha iyi kalitede olan bireyleri seçerek yeni popülasyonunu oluşturur ve bir sonraki iterasyonu başlatır. Algoritma durma kriterine yani öncesinde belirlenen işlem zamanına ya da iterasyon sayısına ulaşana kadar tekrarlanır [9].

#### 4.1. Genetik Algoritmanın İşleyişi

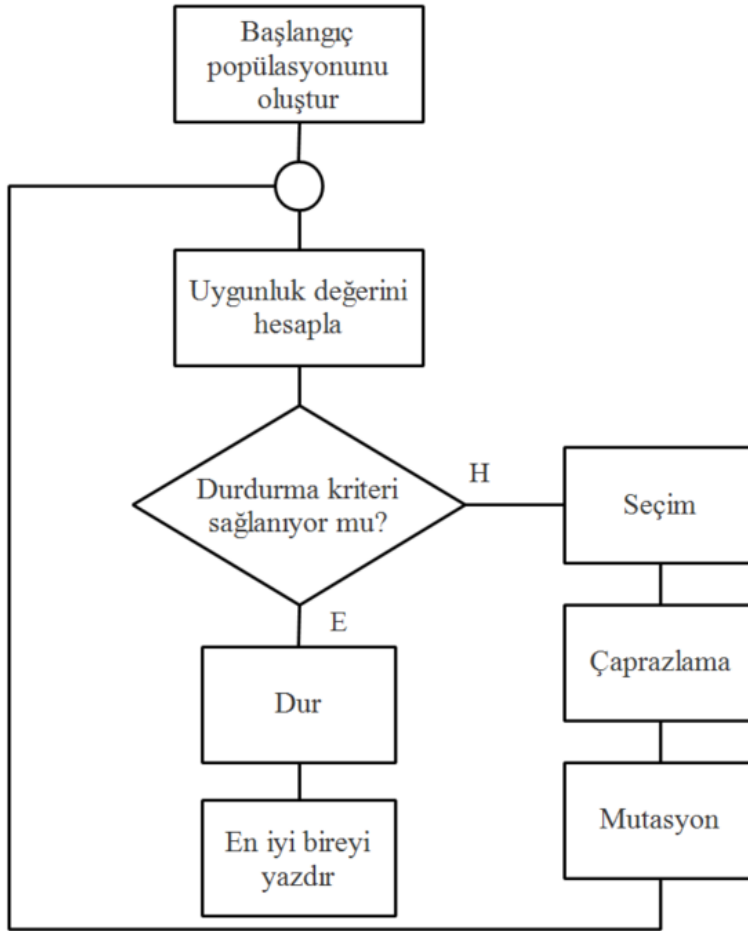
Genetik algoritma herhangi bir probleme uygulanmadan önce, problemin özelliklerine uygun şekilde algoritma parametreleri ve kullanılacak operatörler belirlenir. Çözümdeki gerekli bilgiyi barındıracak şekilde kromozomlar kodlanır. Kromozomların problem için ne kadar iyi bir çözüm ifade ettiğini bulan fonksiyona uygunluk fonksiyonu denir. Bu fonksiyon kullanılarak kromozomların uygunlukları hesaplanır. Bu fonksiyon genetik algoritmanın beynini oluşturmaktadır [57].

Bir sonraki nesil için anne ve baba olacak ebeveynler seçim yöntemlerinden tercih edilen birisi ile seçilir. Ebeveynler belirlenen çaprazlama operatörü kullanılarak çaprazlama oranına uygun şekilde çaprazlanır. Mutasyon oranı dahilinde bireyler mutasyona maruz tutulur. Bu işlemler sonucunda elde edilen popülasyon yeni nesili oluşturur. Elitizm uygulanıyor ise önceki nesil içindeki en iyi bir veya birkaç birey hiçbir değişikliğe uğramadan bir sonraki nesle aktarılır.

Genetik algoritmaların yapısı oldukça basittir ve bir probleme kolaylıkla uygulanabilir. Neyin iyi olduğunu genetik algoritmaya bildirmek için bir uygunluk (amaç) fonksiyonu oluşturulması ve problemin değişkenlerinin kodlanmasıyla her çeşit karmaşık problem genetik algoritmalar sayesinde çözüme ulaşabilir [65].

Genetik algoritmanın işleyişi Şekil 4.1 'de verilmiştir. Bir genetik algoritma genel olarak beş temel bileşene sahiptir [66]:

- Genetik algoritmaya uygun yapıda çözüm gösterimi
- Başlangıç popülasyonu oluşturma yöntemi
- Çözümleri değerlendirmeyi sağlayacak uygunluk fonksiyonu
- Yeni neslin oluşumu sırasında bireyleri değiştirecek genetik operatörler
- Genetik algoritma parametrelerine ait değerler.



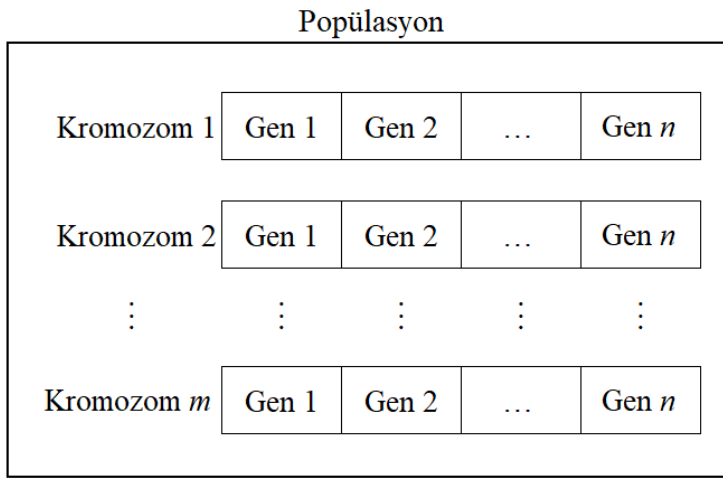
Şekil 4.1. Genetik algoritma işleyişi

#### 4.2. Genetik Algoritma Kavramları

Gen, organizmanın karakterinin belirlenmesinde görev alan kalıtsal yapılara denir. Yapay sistemlerde gen, kendi başına anlamlı bilgi taşıyan en küçük birim olarak tanımlanır [67].

Kromozom, birden fazla genin bir araya gelerek oluşturduğu dizilerdir. Kromozomlar genetik algoritma yaklaşımında en önemli birim olduğu için, bilgilerin kromozoma doğru şekilde kodlanması gerekmektedir [57].

Popülasyon, her biri bir çözüme karşılık gelen kromozomların bir araya gelmesiyle oluşan kümedir. Yığındaki kromozom sayısı yani popülasyon boyutu çoğunlukla sabit olup problemin özelliğine göre büyüklüğü belirlenir. Çözüm uzayını etkileyen popülasyon boyutu büyük önem taşımaktadır. Popülasyon boyutunun küçük olması çoğu durumda çözüm uzayının taranan bölümünün küçük olmasına dolayısıyla da en iyi çözüm değerlerine ulaşamamasına neden olurken; popülasyon boyutunun çok büyük olması ise genetik algoritmanın etkinliğini azaltmakta ve çözümün farklı noktalarda aranmasına neden olmaktadır [63]. Gen, kromozom ve popülasyon yapısı Şekil 4.2’deki gibi gösterilebilir.



Şekil 4.2. Gen, kromozom ve popülasyon yapısı

#### 4.2.1. Kodlama

Probleme genetik algoritma uygulanmadan önce, bilgilerin uygun şekilde kodlanması gerekmektedir. Kurulan genetik modelin hızlı ve güvenilir çalışmasını kodlamanın yapısı çok etkiler [67]. Her problem kendine özgü kodlanmalıdır. Kodlama için seçilen yöntem problemin bilgilerini taşımaya yeterli olmalıdır. Problemin tipine göre ikili sayı sisteminde, permütasyon, değer ya da ağaç kodlama yapılabilir.

İkili sayı sisteminde kodlama; genetik algoritmanın ilk çalışmaları bu kodlama yöntemini kullanmıştır. İkili sayı sisteminde genler 0 ya da 1 değerini alırlar. Parametrelerin ikili sayı sistemine göre gösterilmesine Şekil 4.3 örnek verilebilir. İkili sayı sisteminde kodlama, gezgin satıcı, çizelgeleme, karesel atama gibi optimizasyon problemlerinde arama uzayını tam olarak temsil edememektedir.

|            |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Kromozom 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Kromozom 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |

Şekil 4.3. İkili sayı sisteminde kodlama

Permütasyon kodlama çoğunlukla gezgin satıcı, çizelgeleme ve araç rotalama gibi sıralamanın önemli olduğu problemlere uygulanır. Permütasyon kodlama örneği Şekil 4.4’ de verilmiştir.

|            |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Kromozom 1 | 2 | 5 | 4 | 7 | 8 | 6 | 3 | 9 | 1 |
| Kromozom 2 | 1 | 3 | 4 | 7 | 5 | 2 | 9 | 6 | 8 |

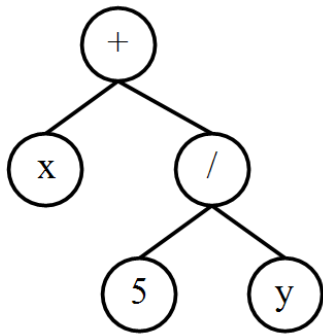
Şekil 4.4. Permütasyon tipi kodlama

Değer kodlama, gerçek sayılar gibi karmaşık değerlerin kullanıldığı problemlerde, ikili kodlama zor olduğu için doğrudan değer kodlaması kullanılabilir [67]. Değer kodlama Şekil 4.5 ile örneklendirilmiştir.

|            |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Kromozom 1 | 0,17 | 1,28 | 2,39 | 0,25 | 1,02 | 1,78 | 0,89 | 2,56 | 1,06 |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|

Şekil 4.5. Değer kodlama

Ağaç kodlama yönteminde her kromozom nesneleri içeren bir ağaç olarak gösterilir. Ağaç şeklinde kodlanabilecek yapılar için uygundur.  $x+5/y$  matematiksel işlemini ifade eden bir ağaç kodlama örneği Şekil 4.6’da verilmiştir.



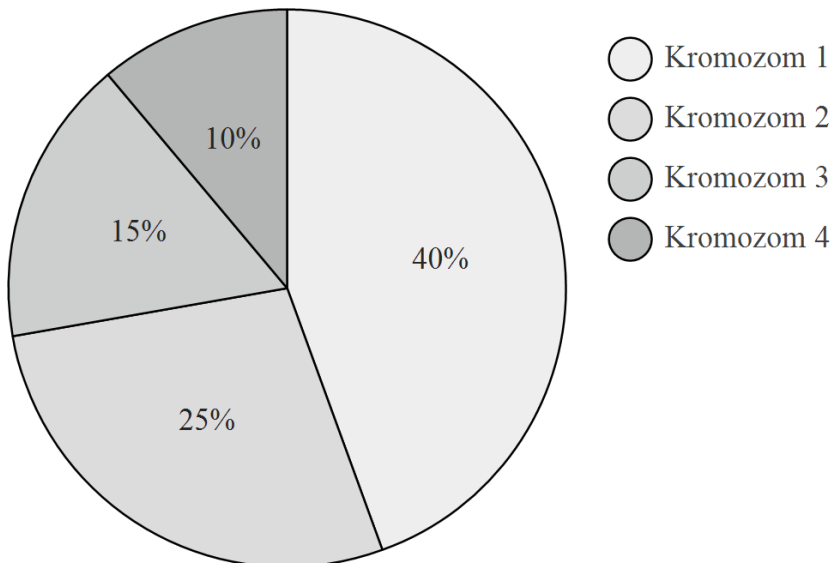
Şekil 4.6. Ağaç kodlama

#### 4.2.2. Seçim

Yeni nesil için ebeveyn kromozomların belirlenmesi sürecinde önceki popülasyondan gelen güçlü kromozomlara ait özelliklerin yeni popülasyona aktarılması gerekmektedir. Burada önemli olan bu kromozomların nasıl seçileceğidir. Her bir kromozomun uygunluk değeri hesaplandıktan sonra uygunluğu yüksek olan kromozomlara daha yüksek seçim şansı vermek için geliştirilmiş literatürde farklı seçim yöntemleri bulunmaktadır. Bunlardan en sık kullanılanları turnuva seçimi ve rulet çemberi seçim yöntemidir.

##### Rulet çemberi seçimi

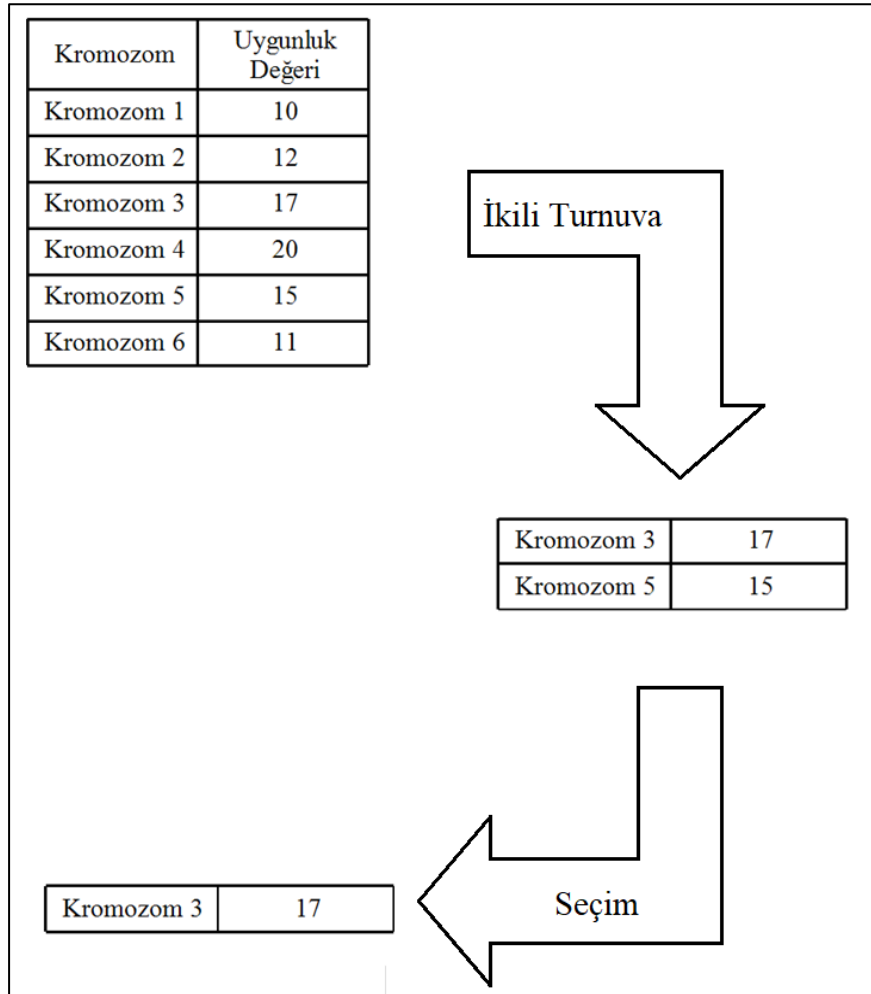
Rulet çemberi seçim operatöründe, bütün kromozomlar uygunluk değerlerine göre bir rulet etrafında dizilirler. Rulet üzerinde uygunluk değerlerine göre sıralanan kromozomlar seçilmek için kendi uygunluk değerinin iyiliğiyle orantılı bu rulet tekerinden bir pay almaktadır. Daha büyük alana sahip bireyin seçilme şansı daha fazla olacaktır. Bu metot yardımıyla kromozomlar uygunluk fonksiyonu değerlerinin toplam uygunluk fonksiyonuna oranları şeklinde hesaplanan olasılıklara uygun şekilde seçilirler. Ancak bu seçim yöntemi, uyum değeri çok büyük olan bireylerin seçilme olasılığı yüksek olduğu için hep aynı kromozomların seçilmesine neden olabilmektedir. Bu da popülasyon içindeki çeşitliliği azaltarak algoritmanın zamansız yakınsamasına sebep olabilmektedir [63]. Rulet çemberi seçimi Şekil 4.7’ de örneklenmiştir.



Şekil 4.7. Rulet çemberi seçimi

### Turnuva seçimi

Topluluktaki bireyler arasından rastgele belirli miktarda bireyler seçilerek aralarındaki uygunluk fonksiyonu değeri en yüksek olan birey seçilir. Diğer bir ifadeyle, yeni topluluğun ebeveyn bireyleri belli sayıdaki bireyler arasında yapılan yarışma sonucu oluşturulur [65]. Popülasyon boyutuna ulaşıncaya kadar bu işlem devam eder. Turnuva seçiminin gerçekleştirilmesi Şekil 4.8 ‘de örneklenmiştir.



Şekil 4.8. Turnuva seçimi

### Elitizm (seçkinlik) seçimi

Çaprazlama ve mutasyon ile yeni nesil oluşturulduğunda en iyi bireyin kaybedilebileceği büyük bir değişim meydana gelir. Elitizm adı verilen bu metotta ilk olarak yeni nesil için en iyi kromozomun bir kopyası alınır. Kaybolan en iyi çözümü koruduğu için bu metot çoğu çalışmada genetik algoritmanın performansını artırmaktadır [57].

### 4.2.3. Çaprazlama

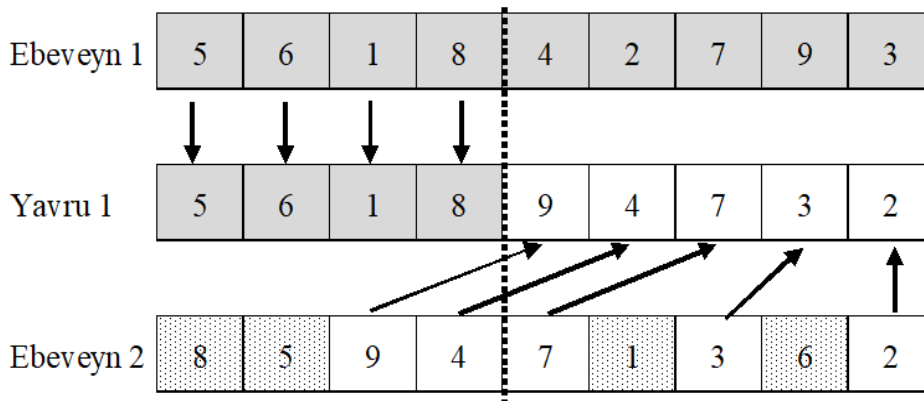
Çaprazlama operatörü iki dizinin bir araya gelerek karşılıklı gen yapılarının değişimi ile yeni dizilerin oluşumunu sağlayan operatördür. Çaprazlanarak gen değişiminin yapılmasından önce kromozomların çaprazlamaya tutulup tutulmayacağı  $p_c$  olasılığı ile belirlenmelidir. Bu olasılık genellikle 0,50-0,95 arasında uygulanmaktadır. Çaprazlama oranı, çaprazlama operatörünün kullanım sıklığını kontrol eder. Yüksek çaprazlama oranı, popülasyon değişikliğini hızlı bir şekilde gerçekleştirir. Düşük çaprazlama oranı aramanın çok yavaş gerçekleşmesine sebep olur.

Çaprazlamada bir diğer önemli unsur ise ne tür çaprazlama yapılacağıdır [44]. Çaprazlama yöntemi problemin performansını artıracak şekilde seçilmelidir. Çaprazlama için tek noktalı çaprazlama, çok noktalı çaprazlama, pozisyona dayalı çaprazlama, sıraya dayalı çaprazlama ve kısmi eşleşmeli çaprazlama gibi yöntemler mevcuttur.

#### Tek noktalı çaprazlama

Bu operatörde bir ebeveyni bölmek için rassal bir nokta belirlenir.  $L$  boyutundaki bir birey için  $k$  kesme noktası  $1 \leq k \leq L - 1$  aralığından belirlenir. Kesme noktasının bir tarafındaki işler yavruya kopyalanır. Kopyalanmayan diğer işler ikinci ebeveynden sırasıyla yavruya aktarılır. Ebeveynlerin rollerini değiştirdikten sonra, ikinci yavruları üretmek için aynı prosedür uygulanır [68].

Şekil 4.9’da tek noktalı çaprazlamanın uygulanışı betimlenmiştir.

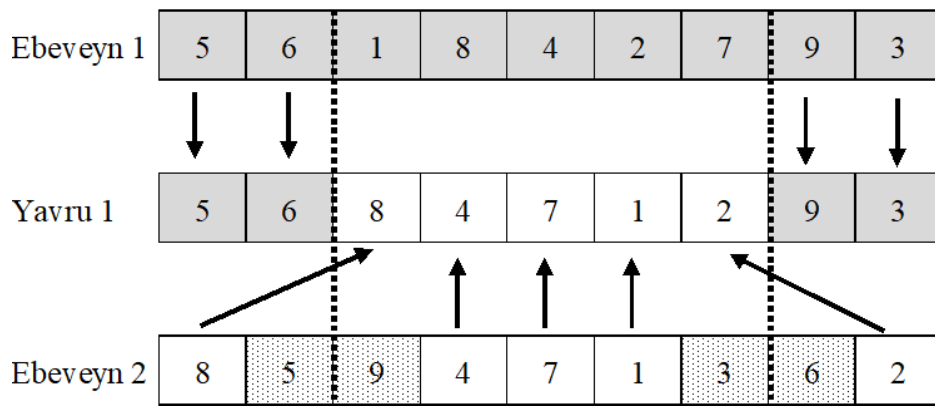


Şekil 4.9. Tek noktalı çaprazlama örneği

### İki noktalı çaprazlama

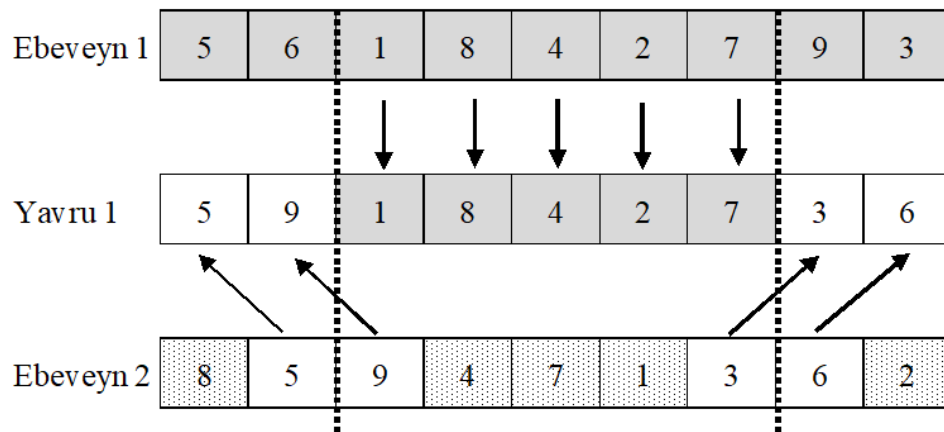
İki noktalı çaprazlama operatörü iki farklı şekilde uygulanabilir. İki çaprazlama noktası rassal olarak seçilir. İlk versiyonda, çaprazlama noktalarının dışında kalan işler ilk ebeveynden yavruya aktarılır. Kalan kopyalanmamış işler ikinci ebeveynden sırasıyla kopyalanır.

İki noktalı çaprazlamanın ilk versiyonu Şekil 4.10'da örneklenmiştir.



Şekil 4.10. Çok noktalı çaprazlama örneği (İlk versiyon)

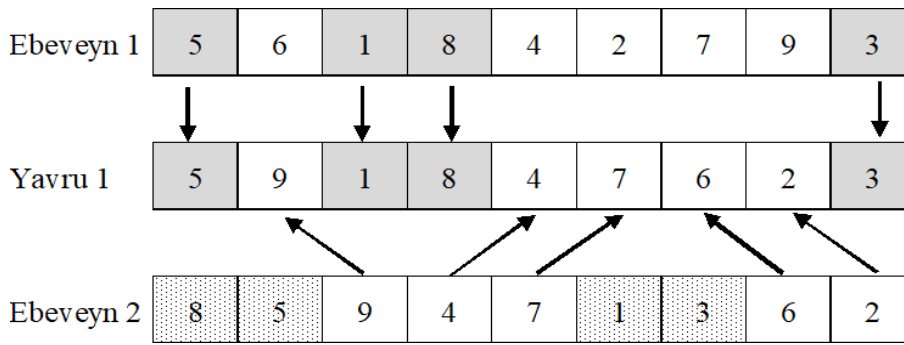
İkinci versiyonda ise, rassal olarak seçilen iki nokta arasındaki işler ilk ebeveynden yavruya kopyalanır. Kalan kopyalanmamış işler ikinci ebeveynden sırasıyla yavruya kopyalanır. İki noktalı çaprazlamanın ikinci versiyonu Şekil 4.11'de örneklenmiştir. Her iki versiyonda da ebeveynlerin rollerini değiştirdikten sonra, ikinci yavruları üretmek için aynı prosedür uygulanır [68].



Şekil 4.11. Çok noktalı çaprazlama örneği (İkinci versiyon)

### Pozisyona dayalı çaprazlama (PBX)

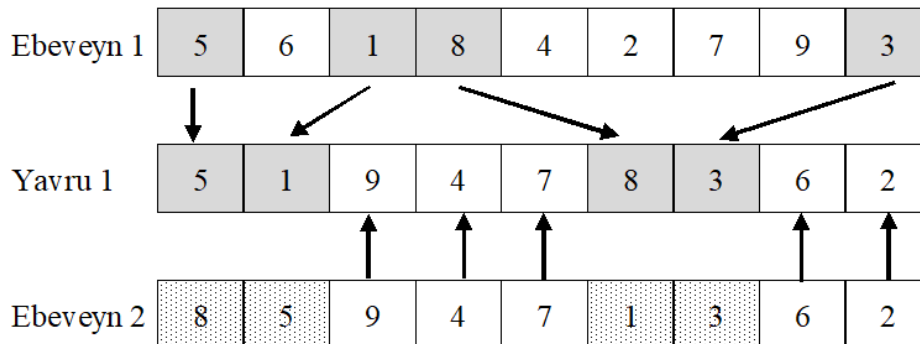
Bu çaprazlama operatöründe bir ebeveynden rastgele bir dizi pozisyon, her biri bağımsız olarak 0,5 olasılıkla seçilir. Bu pozisyonlardaki genler oluşturulacak yavru bireyde aynı pozisyona kopyalanır. İlk ebeveynden kopyalanan genler ikinci ebeveynden silinir. Kalan genler yavru bireyde boş kalan pozisyonlara soldan sağa doğru yerleştirilir. Ebeveynlerin rollerini değiştirdikten sonra, ikinci yavruları üretmek için aynı prosedür uygulanır [68]. Pozisyona dayalı çaprazlama Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Pozisyona dayalı çaprazlama örneği

### Sıraya dayalı çaprazlama (OBX)

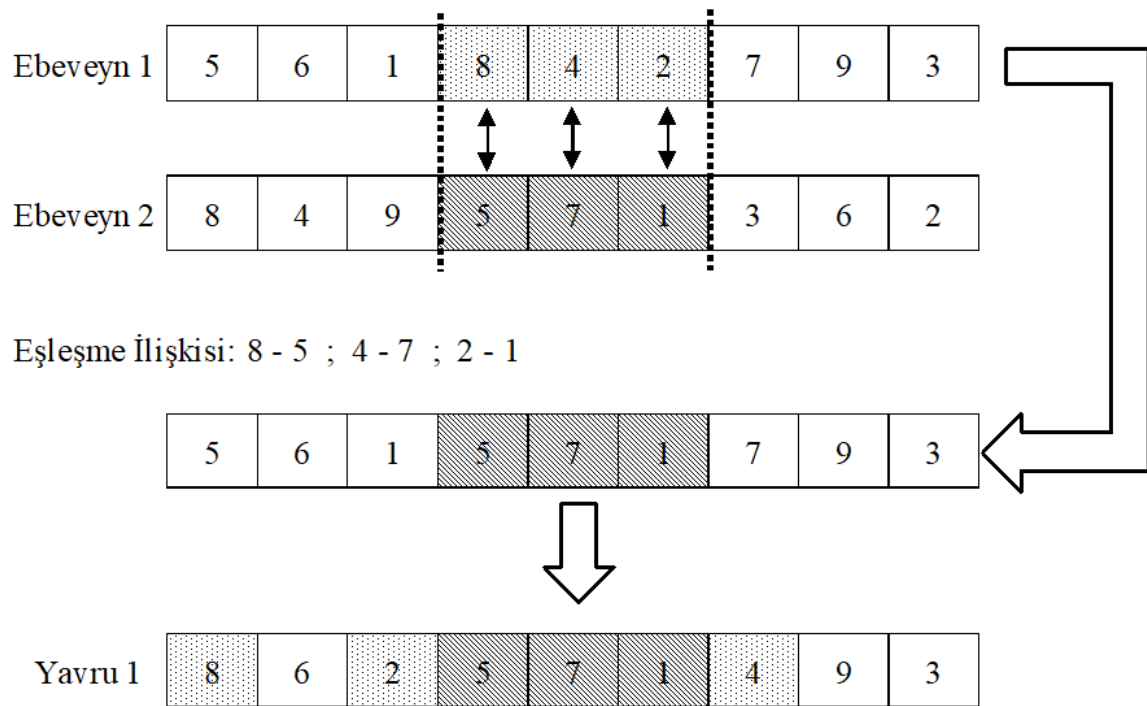
Bu çaprazlama operatörü pozisyona dayalı çaprazlama operatörünün az farklılaştırılmış bir varyasyonudur. İlk olarak birinci ebeveynde her pozisyon bağımsız olarak 0,5 olasılığı ile işaretlenir. İşaretlenmemiş pozisyonlardaki işler, ikinci ebeveynde göründükleri pozisyondaki gibi yavru bireye aktarılır. Son olarak, ilk ebeveyne ait işaretlenmiş işler sırayla yavrunun boş pozisyonlarına kopyalanır [68]. Sıraya dayalı çaprazlama operatörü Şekil 4.13’de betimlenmiştir.



Şekil 4.13. Sıraya dayalı çaprazlama örneği

### Kısmi eşleşmeli çaprazlama (PMX)

Bu operatörde iki çaprazlama noktası rassal olarak seçilir. Bu iki çaprazlama noktası arasında kalan diziye eşleşme bölümleri denir. İlk yavruyu oluşturmak için ikinci ebeveynin eşleşme bölgesindeki dizi yavrunun aynı pozisyonlarına aktarılır. Diğer pozisyonlar eşleşme ilişkisine uygun şekilde ilk ebeveynden aktarılır. İkinci yavruyu üretmek için ebeveynlerin rollerini değiştirdikten sonra aynı prosedür uygulanır [68]. Kısmi eşleşmeli çaprazlama Şekil 4.14'te betimlenmiştir.



Şekil 4.14. Kısmi eşleşmeli çaprazlama örneği

### 4.2.4. Mutasyon

Genetik algorithmada arama süreci belli bir nesil sayısına geldikten sonra kromozomlar birbirlerine gitgide benzemektedir. Bu da aranan çözüm uzayının daralmasına neden olmaktadır. Kromozomlara ne kadar çaprazlama operatörü uygulansa da ilerleyen nesillerde kromozom çeşitliliği sağlanamamaktadır. Bu durum yakınsama olarak bilinir. Bu nedenle kromozomlara mutasyon operatörü uygulanır. Böylelikle kromozom çeşitliliğinin devamı sağlanmış olur. Mutasyon operatörünün uygulanma oranı doğru belirlenmelidir. Mutasyon oranının yüksek olması çözüm uzayını çok genişleterek çözüm yanlış yerlerde aranmasına neden olur. Mutasyon işlemi,  $p_m$  olasılığı ile belirlenen genin veya kromozomun belirli bir

bölümünün rasgele değişimidir [66]. Mutasyon operatörünün uygulanması probleme göre değişiklik gösterebilir. Komşu iki geni değiştirme, keyfi iki geni değiştirme ve ters mutasyon yöntemleri literatürde sık kullanılan mutasyon operatörlerindendir.

#### Komşu iki geni değiştirme

Komşu iki geni değiştirme işleminde, rassal olarak seçilen iki komşu iş yer değiştirir. Komşu iki geni değiştirme operatörüne Şekil 4.15’de örnek verilmiştir. Birey içerisinde rassal olarak seçilen 4. ve 5. pozisyonda bulunan komşu genler yer değiştirilerek birey mutasyona uğratılmıştır [63].

|                   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|-------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Mutasyondan önce  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Mutasyondan sonra | 1 | 2 | 3 | 5 | 4 | 6 | 7 | 8 | 9 |

Şekil 4.15. Komşu iki geni değiştirme örneği

#### Keyfi iki geni değiştirme

Keyfi iki geni değiştirme işleminde, rassal olarak seçilen iki gen yer değiştirir. Keyfi iki geni değiştirme operatörü Şekil 4.16’da örneklenmiştir. Birey içerisinde rassal olarak seçilen 3 ve 7. Pozisyonda bulunan genler yer değiştirilerek birey mutasyona uğratılmıştır [63].

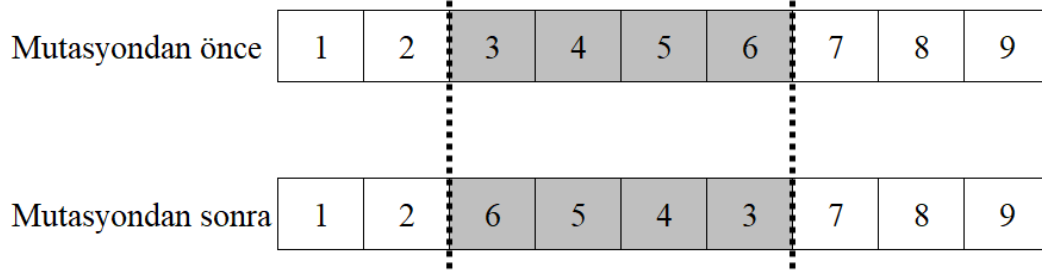
|                   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|-------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Mutasyondan önce  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Mutasyondan sonra | 1 | 2 | 7 | 4 | 5 | 6 | 3 | 8 | 9 |

Şekil 4.16. Keyfi iki geni değiştirme örneği

#### Ters mutasyon

Ters mutasyon işleminde, bireyde rassal olarak iki pozisyon seçilir ve bu iki pozisyon arasındaki bölüm ters çevrilir. Ters mutasyon operatörünün uygulanmasına Şekil 4.17’de

örnek gösterilmiştir. Rassal olarak 2 ve 6 noktaları seçilmiş, bu noktalar arasındaki genler ters çevrilerek yeni birey oluşturulmuştur [63].



Şekil 4.17. Ters mutasyon örneği

### 4.3. Genetik Algoritma Parametrelerinin Belirlenmesi

Genetik algoritma parametrelerin belirlenmesi problemin performansı açısından önemli olup parametre değerleri problemin türüne göre değişiklik göstermektedir. Parametre değerleri algoritmanın performansı gözlemlenerek belirlenmelidir. Genetik algoritmaların geleneksel parametreleri (1) popülasyon boyutu, (2) çaprazlama olasılığı, (3) mutasyon olasılığı şeklindedir.

**Popülasyon Boyutu ( $N$ ):** Toplumdaki kromozom (birey) sayısını belirtir. Eğer popülasyonda çok az birey varsa, genetik algoritmanın çaprazlama yapacağı birey alternatifleri azalacaktır ve çoğunlukla arama uzayının çok küçük bir kısmı araştırılacaktır. Eğer çok fazla birey varsa, genetik algoritma yavaşlayacaktır. Araştırmalar bazı sınırlardan sonra çok büyük toplumların kullanılmasının yararlı olmadığını göstermiş olup bu problemin daha hızlı bir şekilde çözülmesine yardımcı olmamaktadır [67].

**Çaprazlama Olasılığı ( $p_c$ ):** Genetik algoritmada çözüm yığını incelenirken belirli noktalardan sonra nesil çeşitliliği olmadığı için çözüme gidilememektedir. Çaprazlama olasılığı ise nesil çeşitliliğinin kontrol edilmesi açısından önemlidir. Çaprazlama olasılığı, çaprazlama operatörünün kullanım sıklığını kontrol eder. Her yeni popülasyonda  $p_c \times N$  adet bireye çaprazlama uygulanır [69]. Probleme göre değişiklik gösterebilmekle birlikte 0,50 – 0,95 aralığında seçilebilir.

**Mutasyon Olasılığı ( $p_m$ ):** Çözüm uzayını genişletmek, birbirine benzeyen dizilerden kurtulmak için bireye  $p_m$  olasılığı ile mutasyon uygulanmaktadır. Ancak mutasyon

operatörünün uygulama olasılığı doğru belirlenmelidir. Mutasyon olasılığının yüksek olması çözüm uzayını çok genişleterek sistem çözümünün yanlış yerlerde aranmasına neden olur. Bu nedenle çalışmalarda mutasyon operatörünün uygulanma olasılığı problemden probleme farklılık göstermekle birlikte düşük bir olasılıkta seçilmelidir.

## 5. TAVLAMA BENZETİMİ

Tavlama kelimesi fiziksel anlamda ısı banyosundaki bir katının yüksek enerji durumlarından başlayarak daha düşük enerji durumlarının elde edilme sürecini temsil etmektedir [59]. Atom yapısı düzensiz olan metaller tavlama işleminde önce çok yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılıp daha sonra yavaş bir şekilde soğumaya bırakılmaktadırlar. Bu işlemler sırasında düzensiz yapıdaki parçacıklar gruplar halinde düzenlenerek kristal yapıyı oluşturmaktadırlar. Bu işlemlerin sonucunda metalin yapısı daha kararlı bir hal almakta ve sağlamlığı artmaktadır [70].

Tavlama benzetimi fikri Metropolis vd. [71] tarafından metaller için önerilmiştir [72]. Bu prosesin analiz edilerek sezgisel bir yöntemle dönüşmesi ve optimizasyon problemlerinin çözümü üzerindeki ilk uygulamaları 1983 yılında Kirkpatrick [54] ve arkadaşları tarafından yapılmıştır [73].

Tavlama benzetimi algoritması, gerçek hayattakine benzer şekilde katıların belirli bir başlangıç sıcaklığından başlayarak yavaş yavaş soğutulduğu sürecin benzetimi olan stokastik bir arama algoritmasıdır [67]. Sıcaklık yüksek iken algoritmada farklı çözümler arasında serbestçe geçiş yapılabilmektedir. Yeni bulunan çözüm kötü olsa da kabul edilebilmektedir. Sıcaklık azaldıkça kötü çözümlerin kabul edilmesi olasılığı azalmaktadır [72].

Tavlama benzetimi komşu arama yöntemine dayalı algoritmalarından birisidir. Komşu aramanın basit bir şekli olan “İniş (descent) algoritması”, aramaya belirli bir başlangıç çözümü ile başlar. Daha sonra belirlenen komşu üretme mekanizması ile bu çözümün bütün komşuları üretilir ve amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır. Eğer amaç fonksiyonunda iyileşme söz konusuysa, en iyi komşu çözüm yeni mevcut çözüm olarak kabul edilir, aksi halde mevcut çözüm değişmez. Bu süreç mevcut çözümün hiçbir komşusu amaç fonksiyonunda iyileşme sağlamayana kadar devam eder ve böylece iniş algoritması yerel bir minimumda durmuş olur [74].

Tavlama benzetimi, iniş algoritmasının yerel bir minimuma ulaştıktan sonra global minimum için daha fazla arama yapamamasından kaynaklanan eksikliğini gidermeyi

amaçlamaktadır. Tavlama benzetimi, bir istisna dışında yerel arama yöntemiyle aynı temel adımları kullanır [75]. Tavlama benzetimi algoritması amaç fonksiyonunda kötüleşmeye yol açan komşu hareketlerini de bazen kabul ederek, yerel optimum noktalardan kurtulmaya çalışır. Amaç fonksiyonunda kötüleşmeye yol açan bir hareketin kabul edilip edilmemesi, kontrollü bir olasılığa göre rassal olarak belirlenmektedir. İniş algoritması ve tavlama benzetimi algoritması sırasıyla Çizelge 5.1 ve 5.2’de gösterilmiştir [74].

Çizelge 5.1. İniş algoritması

| Adım   | İşlem                                                                                                        |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Adım 1 | Bir başlangıç durumu seç: $i \in S$                                                                          |
| Adım 2 | $i$ ’nin en iyi komşusu olan $j$ durumunu üret<br>$\Delta = f(j) - f(i)$<br>Eğer $\Delta \leq 0$ ise $i = j$ |
| Adım3  | $i$ ’nin komşuları olan tüm $j$ ’ler için $f(j) \geq f(i)$ ise Dur, aksi halde Adım2 ‘ye git.                |

Çizelge 5.2. Tavlama benzetimi algoritması

| Adım   | İşlem                                                                                                                                                                     |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Adım 1 | Bir başlangıç durumu seç: $i \in S$<br>Bir başlangıç sıcaklığı seç: $T > 0$<br>Sıcaklık değişim sayacını sıfırla : $t = 0$                                                |
| Adım 2 | Durdurma koşulu sağlanmışsa Dur, değilse tekrar sayacını sıfırla : $n = 0$ ve devam et.                                                                                   |
| Adım 3 | $i$ ’nin bir komşusu olan $j$ durumunu rassal olarak üret.<br>$\Delta = f(j) - f(i)$<br>Eğer $\Delta < 0$ ise $i = j$ , değilse ve $U[0,1) < e^{-\Delta/T}$ ise $i = j$ . |
| Adım 4 | $n = n + 1$ Eğer $n < M$ ise Adım 3’e git, değilse $t = t + 1$ , $T = T(t)$ ve Adım 2’ye git.                                                                             |

Kötü çözümlerin kabulü Metropolis kabul kriterine göre yapılmaktadır. İlk çözüm ile komşuluk fonksiyonuna göre üretilmiş komşu çözüm karşılaştırılırken uygunluk değerlerine bakılır. Eğer komşu çözümün uygunluk değeri eski çözüme oranla daha iyi ise, komşu çözüm kabul edilir. Eğer komşu çözümün uygunluk değeri ilk çözüme oranla  $\Delta$  kadar bir yükselmeye yol açmışsa, komşu çözümün  $e^{-\Delta/T}$  olasılığına bağlıdır. Bu formülasyonda  $T$ , o andaki sıcaklık değeridir. Tavlama benzetimi algoritması “Markov zincirleri” teorisi

kullanılarak modellenebilmektedir. Bir markov zinciri, denemelerin bir sırasıdır. Bu sırada, verilen bir denemenin sonucunun olasılığı, sadece bir önceki denemenin sonucuna bağlıdır [76]. Tavlama benzetimi algoritmasında  $M$  sembolüyle gösterilen ve her sıcaklık seviyesinde üretilen komşu çözüm sayısını ifade eden tekrar sayısına “Markov Zinciri Uzunluğu” adı verilir.

### 5.1. Tavlama Benzetiminin İşleyişi

Tavlama benzetimi algoritması başlangıç çözümü, başlangıç çözümüne ait uygunluk değeri ve probleme göre değişiklik gösterebilen yeterli bir sıcaklık değeriyle başlar. Her iterasyonda komşu üretme fonksiyonu kullanılarak, markov zinciri uzunluğunca komşu çözüm üretilir. Komşu çözüm mevcut çözümden iyi ise kabul edilir, kötü ise metropolis kriterine göre kabul ya da reddedilir. Komşu çözüm kabul edildi ise mevcut çözümün yerini alır, reddedildi ise mevcut çözüm değişmez. Algoritma durdurma kriterini sağlayana kadar, diğer bir ifadeyle mevcut sıcaklık son sıcaklık değerinden büyük olduğu müddetçe işlemlere devam eder.

### 5.2. Tavlama Benzetimi Kavramları

Problem, mümkün çözümlerin kümesi tanımlanacak şekilde formüle edilmelidir. Çözümlerin gerekli bilgileri taşıyacak şekilde kodlanması, başlangıç çözümünün nasıl belirleneceği, komşu çözümlerin nasıl oluşturulacağı ve amaç fonksiyonlarının nasıl hesaplanacağını belirlemek gerekmektedir [74].

#### 5.2.1. Başlangıç çözümü

Çözümlerin nasıl ifade edileceği konusu algoritmanın oluşturulmasında ele alınması gereken ilk konudur. Belirli bir çözüm temsili oluşturulmalıdır ve çözümler standart biçimde ifade edilmelidir. Çözüm gösterimi problemin tipine göre farklılık gösterebilmektedir. Tavlama benzetiminde aday çözümlerin gösterimi, bir önceki bölümde anlatılmış olan genetik algoritmadaki gösterimden farklı değildir [73]. Başlangıç çözümü kurucu bir sezgisel kullanılarak oluşturulabileceği gibi rassal olarak da üretilebilir.

### 5.2.2. Uygunluk fonksiyonu

Çözümlerin birbiri ile karşılaştırılabilmesi ancak uygunluk fonksiyonu ile mümkündür. Uygunluk fonksiyonu, tavlama benzetimi kapsamında yer alan çözüm gösterimlerini girdi olarak alıp gerçek problem için amaç fonksiyonu değerini hesaplar. Üretilen komşu çözümün uygunluk değerinin, mevcut çözümün uygunluk değerinden kötü olması durumunda olasılığa bağlı olarak kabul edilecektir.

### 5.2.3. Komşuluk yapısı

Başlangıç çözümü oluşturulduktan ve uygunluk fonksiyonu hesaplandıktan sonraki aşama bir sonraki komşu çözümün elde edilmesidir. Bu aşamada komşu çözümün nasıl üretileceği seçilmelidir. Komşu üretme fonksiyonu veya mekanizması her adımda kullanıldığı için algoritmanın verimliliğini önemli ölçüde etkilemektedir.

Komşuluk fonksiyonu olarak çiftli yer değiştirme (swap) ya da yerleştirme (insert) mekanizmaları kullanılabilirken, problemin özelliğine göre farklı komşu üretme fonksiyonları da kullanılabilir.

#### Çiftli yer değiştirme (swap) mekanizması

Bu mekanizmada, mevcut sıralamadan rassal seçilen iş çifti yer değiştirirken diğer işlerin pozisyonlarında bir değişiklik yapılmaz. Permütasyon tipi çözüm gösterimi için mekanizmanın çalışmasına ilişkin bir örnek Şekil 5.1’de verilmiştir [75]. Rassal olarak seçilen 3 ve 7. pozisyonlar birbiri ile yer değiştirdikten sonra oluşan çözüm, komşu çözümü oluşturmaktadır.

|                                           |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|-------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Mevcut çözüm                              | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| <i>Rassal seçilen pozisyonlar: 3 ve 7</i> |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| Komşu çözüm                               | 1 | 2 | 7 | 4 | 5 | 6 | 3 | 8 | 9 |

Şekil 5.1. Çiftli yer değiştirme (swap) mekanizması

### Yerleştirme (insert) mekanizması

Bu mekanizmada rassal seçilen bir iş, rassal seçilen bir pozisyona yerleştirilir. Bu mekanizma ile seçilen pozisyona yeni bir iş yerleştirileceğinden, seçilen işin mevcut ve yeni pozisyonları arasındaki işlerin pozisyonları da değişmiş olur. Çözümün diğer parçalarında değişim gerçekleşmez. Permütasyon tipi çözüm gösterimi için mekanizmanın çalışmasına ilişkin bir örnek Şekil 5.2’de verilmiştir [75].

|              |                                                           |   |   |   |   |   |   |   |   |
|--------------|-----------------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Mevcut çözüm | 1                                                         | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|              | <i>Rassal seçilen pozisyon: 7, yeni rassal pozisyon 3</i> |   |   |   |   |   |   |   |   |
| Komşu çözüm  | 1                                                         | 2 | 7 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 9 |

Şekil 5.2. Yerleştirme (insert) mekanizması

### **5.3. Tavlama Benzetimi Parametrelerinin Belirlenmesi**

Tavlama benzetiminde probleme özgü kararlar verildikten sonra algoritmanın performansını belirleyecek olan parametreler belirlenmelidir. Soğutma planında; başlangıç sıcaklığı, sıcaklık azaltma oranı, her sıcaklık değerinde üretilecek komşu sayısı ve durdurma koşulları belirlenir. Soğutma planının seçimi, algoritmanın performansı üzerinde çok önemli bir etkiye sahiptir.  $M$  her sıcaklık değerinde üretilecek komşu sayısına ve  $T(t)$  sıcaklığın aldığı  $t$ . değere karşılık gelmektedir. Tavlama benzetimi algoritmasının global optimum çözümlere yakınsama hızını  $M$  ve  $T(t)$ ,  $t = 0,1,2, \dots$  parametreleri çok etkilemektedir [74].

Başlangıç sıcaklığı, sıcaklık yüksekken kötü çözümlerin çoğunu kabul edebilecek kadar büyük olmalıdır. Başlangıç aşamasında çözümlerin kabul olasılığı bire yakın olmalıdır, böylece algoritmanın ilk zamanlarında geniş bir arama sağlanır. Sonlara doğru ise algoritmanın kötü çözümleri kabul olasılığı sıfıra yakınsar, böylece çoğunlukla iyileşme sağlayan komşu çözümlerin kabul edilmesi sağlanır.

Sıcaklık, bir önceki çözümden daha kötü olan bir çözümün, kabul edilme olasılığının hesaplanmasında kullanılmaktadır. Tavlama benzetiminde soğutma işlemi yavaş yavaş yapılmalıdır. Bunun için bir sıcaklık azaltma fonksiyonundan yararlanılır. Literatürde

önerilen çok sayıda sıcaklık azaltma fonksiyonu vardır. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir. Sıklıkla tercih edilen geometrik fonksiyonda  $\alpha$  (soğutma oranı) sabit bir sayıdır ve 1'den küçük ancak 1'e çok yakın bir değerdir [77]. Diğer fonksiyonlarda ise  $C_{te}$  sembolü ile gösterilen soğuma sabiti kullanılmaktadır.

Aritmetik fonksiyon  $T_t = T_{t-1} - C_{te}$  ;

Geometrik fonksiyon  $T_t = T_{t-1} * \alpha$  ;

Ters fonksiyon  $T_t = C_{te} / (1 + t)$  ;

Logaritmik fonksiyon  $T_t = C_{te} / (\text{Log}(1 + t))$  ;

Durdurma koşulu olarak problemin özelliğine göre farklı kriterler seçilebilir. Bunlar verilen maksimum iterasyon sayısına ulaşılması ya da önceden belirlenen bir son sıcaklık değerine ulaşılması olabilir [77].

## 6. PROBLEM TANIMI VE KARMAŞIKLIĞI

### 6.1. Problem Tanımı

Bu çalışmada yalnızca randevulu hastalar göz önünde bulundurularak, çok odalı ameliyathane çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Intra-operatif aşama incelenmiş olup açık çizelgeleme sistemi kullanılmıştır. Önceden belirlenmiş bir ameliyat gününde, randevulu hastaların operasyonların çizelgelenmesi yapılacak olup, operasyonun hangi oda ve doktor tarafından gerçekleştirileceği, başlama ve bitiş süreleri belirlenecektir. Tamamlanan bir operasyonun ardından yeni bir operasyonun başlayabilmesi için, önceki operasyonda kullanılan malzemelerin sayımı ve kaydı, kirli setlerin dezenfeksiyonu, oda temizliği, yeni operasyon için gerekli ekipman ve malzemelerin tamamlanması ve steril ameliyat masasının hazırlanması gibi odada yapılması gereken bazı hazırlıklar vardır. Bu hazırlıklar art arda gerçekleştirilecek operasyonların türüne bağlı olarak değişiklik gösterebilmekte ve farklı süreler gerektirmektedir. Bu nedenle de oda hazırlık zamanları sıra bağımlıdır. Günün ilk sırasında gerçekleştirilecek operasyonun da belirli bir hazırlık süresine ihtiyacı olup, operasyonun türüne göre değişiklik göstermektedir. Art arda operasyon gerçekleştirecek cerrahların da operasyonları arasında biten operasyona ait ameliyat notlarının alınması, hastanın durumuna göre işlem kararını vermesi, operasyonların zorluğuna bağlı olarak gereken miktarda dinlenmesi ve yeni operasyona steril olarak hazırlanması için gerekli hazırlık süreleri mevcuttur. Bu süreler de birbiri ardına başlayacak operasyonların türüne bağlı olup sıra bağımlıdır. Operasyon süreleri ve tüm hazırlık zamanları deterministik olarak bilinmektedir.

Çizelgelenmesi istenen  $\Omega = \{1, 2, \dots, n\}$  kümesine ait ameliyatların her birisi  $\rho = \{1, 2, \dots, o\}$  setindeki ameliyat odalarından birisinde gerçekleştirilecektir. Aynı  $r$  ameliyat odasında herhangi bir zaman noktasında tek bir ameliyat yapılabilir. Başlanan bir ameliyat yarım bırakılamaz ve bölünemez. Ameliyat  $p$ 'nin gerektirdiği süre  $t_p$  olup, yapılacağı ameliyathaneden ve gerçekleştiren doktordan bağımsızdır. Ameliyat odası  $r$ 'de ardı ardına yapılan  $p$  ve  $q$  ameliyatları için  $StO_{pq}$  süresini gerektiren oda hazırlık işlemi söz konusudur. Benzer şekilde, ardı ardına  $p$  ve  $q$  operasyonlarını gerçekleştirecek  $d$  doktoruna ait  $StD_{pq}$  süresini gerektiren doktor hazırlık zamanı mevcuttur. Ameliyat  $p$ 'yi gerçekleştirebilecek doktorların seti  $Gd_p$  olup, tüm doktorların seti  $\delta = \{1, 2, \dots, h\}$  dir. Bir  $d$  doktoru eşzamanlı

olarak tek bir ameliyatı gerçekleştirebilir. Amaç tüm operasyonların tamamlanma süresini (makespan) minimize etmektir. Çizelgeleme periyodu boyunca, tüm ameliyathanelere tüm operasyonlar atanabilir. Ameliyat odaları özdeştir. Gün başlangıcı olan  $t = 0$  anında tüm doktorların hizmet vermeye, tüm hastaların ise işlem görmeye hazır olduğu varsayılmıştır.

## 6.2. Problemin Karmaşıklığı

Ele alınan problemin  $n$  adet operasyon, tek bir doktor ve tek bir odanın bulunduğu en basit yapısında  $p$  ve  $q$  operasyonları arasındaki hazırlık zamanı, bu operasyonlar arası doktor ve oda için hazırlık zamanlarının büyüğü şeklinde alınabilir. Bu şekilde elde edilen problemde maksimum tamamlanma zamanının en küçüklenmesi için operasyon süreleri sabit olduğundan hazırlık süreleri toplamının en küçüklenmesi gerekir. Hazırlık süreleri toplamı ise iyi bilinen gezgin satıcı problemi şeklinde ifade edilebilir (diğer bir deyişle gezgin satıcı problemine doğrudan indirgenir). Gezgin satıcı problemi iyi bilinen NP-zor bir problem olduğu için [78], birden fazla operasyon ve hazırlık zamanları içeren ele alınan problem de her durumda NP-zordur.

NP-zor yapıda olan problemler ancak; küçük boyutlu olmaları halinde analitik yöntemler kullanılarak sonlu zamanda çözülebilirler. Öyle ki bu problemlerde en iyi çözümü bulmak için gerekli olan zaman, problem boyutuna bağlı olarak üstel artış gösterir. Büyük boyutlu NP-zor yapıdaki problemlerin çözümleri için genellikle meta-sezgisel yöntemler kullanılmaktadır [79].

## 7. PROBLEMİN MATEMATİKSEL FORMÜLASYONU

Problemin çözümü için önerilen karışık tam sayılı programlama yapısında düzenlenen matematiksel formülasyon aşağıda sunulmuştur. Problemin matematiksel formülasyonunun geliştirilmesinde Akyol ve Saraç [80] 'ın çalışmasındaki matematiksel modelden faydalanılmıştır.

Kümeler:

|                              |                                                          |
|------------------------------|----------------------------------------------------------|
| $\Omega = \{1,2, \dots, n\}$ | Operasyon kümesi                                         |
| $\rho = \{1,2, \dots, o\}$   | Ameliyat odası kümesi                                    |
| $\delta = \{1,2, \dots, h\}$ | Doktor kümesi                                            |
| $GD_p$                       | Operasyon $p$ 'yi gerçekleştirebilen doktorlar kümesi    |
| $GP_d$                       | Doktor $d$ 'nin gerçekleştirebildiği operasyonlar kümesi |

İndisler:

|                              |                         |
|------------------------------|-------------------------|
| $p \text{ ve } q \in \Omega$ | Operasyon indisleri     |
| $r \in \rho$                 | Ameliyat odası indisi   |
| $k \in \Omega$               | Operasyon sırası indisi |
| $d \in \delta$               | Doktor indisi           |

Parametreler:

|            |                                                                                         |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| $n$        | Operasyon sayısı                                                                        |
| $o$        | Ameliyat odası sayısı                                                                   |
| $h$        | Doktor sayısı                                                                           |
| $M$        | Yeterince büyük pozitif sayı                                                            |
| $t_p$      | Operasyon $p$ 'nin işlem süresi                                                         |
| $First_p$  | Operasyon $p$ , odaya ilk sırada atanır ise oda hazırlık zamanı                         |
| $StO_{pq}$ | Aynı odada operasyon $p$ 'den hemen sonra operasyon $q$ başlıyorsa, oda hazırlık zamanı |

$StD_{pq}$  Aynı doktor operasyon  $p$ 'den hemen sonra operasyon  $q$ 'yu gerçekleştiriyorsa, doktor hazırlık zamanı

Karar Değişkenleri:

$C_{max}$  Maksimum tamamlanma zamanı, makespan  
 $S_p$  Operasyon  $p$ 'nin başlama zamanı  
 $X_{pkr}$  Eğer  $p$  operasyonu,  $k$ . sırada,  $r$  odasına atanmışsa 1, değilse 0  
 $Y_{pkd}$  Eğer  $p$  operasyonu,  $k$ . sırada,  $d$  doktoruna atanırsa 1, değilse 0

Amaç Fonksiyonu:

$$\min C_{max} \quad (1)$$

Kısıtlar:

Atama kısıtları:

$$\sum_k \sum_r X_{pkr} = 1; \quad \forall p \quad (2)$$

$$\sum_k \sum_{d \in GD_p} Y_{pkd} = 1; \quad \forall p \quad (3)$$

$$\sum_p X_{pkr} \leq 1; \quad \forall k, r \quad (4)$$

$$\sum_p Y_{pkd} \leq 1; \quad \forall k, d; \quad \forall d \in GD_p \quad (5)$$

Ardıl operasyon başlama zamanı ayarlama kısıtları:

$$S_q \geq S_p + t_p + StO_{pq} - M(1 - X_{pkr}) - M(1 - X_{q(k+1)r}) \\ \forall p, q, k, r; k < n; p \neq q \quad (6)$$

$$S_q \geq S_p + t_p + StD_{pq} - M(1 - Y_{pkd}) - M(1 - Y_{q(k+1)d}) \\ \forall p, q, k, d; d \in GD_p; k < n; p \neq q \quad (7)$$

İlk operasyon başlama zamanı ayarlama kısıtları:

$$S_p \geq First_p - M(1 - X_{p1r}); \quad \forall p, r \quad (8)$$

Ardışıklık kısıtları:

$$\sum_p X_{pkr} \geq \sum_p X_{p(k+1)r}; \quad \forall r, k; k < n \quad (9)$$

$$\sum_{p \wedge p \in GP_d} Y_{pkd} \geq \sum_{p \wedge p \in GP_d} Y_{p(k+1)d}; \quad \forall d, k; k < n \quad (10)$$

Maksimum tamamlanma zamanı (makespan) hesaplama kısıtı:

$$C_{max} \geq S_p + t_p; \quad \forall p \quad (11)$$

İşaret kısıtları:

$$X_{pkr} \in \{0,1\}; \quad \forall p, k, r \quad (12)$$

$$Y_{pkd} \in \{0,1\}; \quad \forall p, k, d; d \in GD_p \quad (13)$$

$$S_p \geq 0; \quad \forall p \quad (14)$$

Eşitlik (1) ile verilen amaç fonksiyonu, tüm operasyonların tamamlanması için gereken zamanı minimize etmektedir. Kısıt (2) her operasyonun bir oda ve sıraya atanmasını sağlar. Benzer şekilde kısıt (3), her operasyonun kendi operasyonunu gerçekleştirebilecek doktorlar kümesinden bir doktora ve sıraya atanmasını sağlar. Kısıt (4) bir odanın bir sırasına en fazla bir operasyon atanmasını sağlamak için tanımlanmıştır. Benzer şekilde Kısıt (5) ise bir doktorun bir sırasına en fazla bir operasyon atanmasını garantiler. Kısıt (6) ve (7) ardıl operasyonların başlama zamanlarını ayarlar. Kısıt (8), kendinden önce operasyon atanmamış, yani odanın ilk sırasına atanan operasyonların başlama zamanını ayarlamak için kullanılır. Kısıt (9) ve (10) ardışıklık kısıtlarıdır. Hem oda hem de doktor için,  $(k + 1)$ 'inci sırada gerçekleştirilen operasyonun yalnızca  $k$ 'nci sırada gerçekleştirilen operasyon çizelgelendiğinde planlanabileceğini garanti eder. Bu kısıtlar sıra bağımlı hazırlık zamanlarının aktif olmasını sağlamaktadır. Kısıt (11) maksimum tamamlanma zamanını hesaplar. İşaret kısıtları olan (12) ve (13)  $X_{pkr}$  ve  $Y_{pkd}$  'nin ikili karar değişkenleri, kısıt (14) ise  $S_p$  'nin pozitif karar değişkeni olduğunu ifade eder.



## 8. ÖNERİLEN SEZGİSEL YÖNTEMLER

Çalışmada incelenen sıra bağımlı hazırlık zamanlarının bulunduğu ameliyathane çizelgeleme problemi NP-zor yapıda olduğundan dolayı problemin çözümü için meta-sezgisel yöntemlere başvurulmuştur. Tek çözüm tabanlı tavlama benzetimi algoritması ile popülasyon tabanlı genetik algoritma önerilmiş olup, problem üzerindeki performanslarını karşılaştırmak amaçlanmıştır.

### 8.1. Önerilen Genetik Algoritma

Problemin çözümü için önerilen genetik algoritma yaklaşımında başlangıç popülasyonu rassal olarak oluşturulmuş ve bireylerin uygunluk değerleri hesaplanmıştır. İkili turnuva seçim yöntemi kullanılmıştır. Seçim mekanizmasına ek olarak elitizm yöntemi uygulanmış, en iyi bireyi kaybetmemek amaçlanmıştır. Diğer bir ifadeyle, mevcut popülasyonun en iyi bireyinin bir kopyası sonraki popülasyona hiçbir değişiklik yapılmadan aktarılmaktadır. Kısmi eşleşmeli çaprazlama ile ebeveyn bireyler çaprazlanmış, bu ebeveyn bireylerin genlerini taşıyan iki çocuk birey oluşturulmuştur. Bireylere  $p_m$  mutasyon olasılığı dahilinde mutasyon uygulanmıştır. Yeni popülasyon değerlendirilerek, durdurma koşulu sağlanana kadar bu işlemlere devam edilmiştir. Durdurma koşulu sağlandığında en iyi birey yazdırılmıştır.

#### 8.1.1. Kodlama

Geliştirilen genetik algoritmada her çözüm sırasıyla operasyonları, odaları ve doktorları içeren,  $I = (\Omega, \rho, \delta)$  şeklinde gösterilen bağımsız üç dizi ile temsil edilir. Gen ise bu üç dizinin aynı indekste bulunan parçalarından oluşmaktadır. Herhangi bir gen, temsil ettiği operasyonun hangi oda ve hangi doktora atandığı bilgisini içermektedir. Aynı zamanda atamalar soldan sağa doğru sıralama ile yapıldığı için operasyonların oda ve doktorlara atanacağı sıra bilgisini de içermektedir. Benzer yaklaşımlar Vali-Siar vd. [9] ile Roland vd. [8]'in çalışmalarında da kullanılmıştır. Çizelgeleme problemlerine daha uygun olduğu için, operasyonların gösterimini sağlayan kromozom parçasının kodlanmasında permütasyon tipi temsil kullanılmıştır. Çözüm gösterimi Şekil 8.1'de betimlenmiştir. Bu gösterimde 3 numaralı operasyon birinci odada 1 numaralı doktor tarafından gerçekleştirilmektedir. Aynı

şekilde 6 numaralı operasyon ikinci odada 3 numaralı doktor tarafından gerçekleştirilmektedir.

$$I = \begin{pmatrix} \Omega \\ \rho \\ \delta \end{pmatrix} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline 4 & 2 & 5 & 3 & 1 & 7 & 6 & 9 & 8 \\ \hline 1 & 4 & 2 & 3 & 2 & 1 & 3 & 4 & 4 \\ \hline 1 & 5 & 3 & 2 & 4 & 5 & 1 & 3 & 2 \\ \hline \end{array}$$

Şekil 8.1. Kromozom gösterimi

Başlangıç popülasyonunda probleme özgü sezgisel yöntemlerle oluşturulmuş kaliteli çözümlerin kullanılması daha kısa sürede daha kaliteli çözümlere ulaşmasını sağlayabileceği gibi, algoritmanın erken yakınsamasına da sebep olabilmektedir [81]. Bu nedenle başlangıç popülasyonunda, popülasyon büyüklüğü sayısınca, rassal olarak üretilmiş kromozomlar kullanılmıştır. Operasyon sıraları rassal olarak oluşturulmuş, bu operasyona rassal bir oda ve bu operasyonu gerçekleştirebilen doktorlar arasından bir doktor rassal olarak atanmıştır.

### 8.1.2. Amaç fonksiyonu ve uygunluk fonksiyonu

Her kromozom probleme ait bir çözümü kodlarken, kromozomun uygunluk değeri de amaç fonksiyonuyla bağlantılı şekilde hesaplanmaktadır. Problem en küçükleme problemi olduğundan, genetik algoritma uygunluk fonksiyonu değeri amaç fonksiyonu değerine eşit olacak şekilde alınmıştır.

Problemin amaç fonksiyonunun hesaplanmasını açıklamak amacıyla Şekil 8.1’de verilen örnek kromozom yani çözüm gösterimine ilişkin veriler aşağıda verilmiş olup, kromozoma ait çözüm Gant diyagramı ile Şekil 8.2’de gösterilmiştir. Operasyonlara ait işlem süreleri ve herhangi bir odanın ilk sırasına atanan operasyonlar için gerekli hazırlık süreleri Çizelge 8.1’de verilmiştir. Çizelge 8.2’de ise operasyonları gerçekleştirebilecek doktorlar kümesi gösterilmiştir. Aynı odada gerçekleşecek  $p$  operasyonunun ardından  $q$  operasyonunun çizelgelenmesi durumunda gerekli oda hazırlık süreleri Çizelge 8.3’te verilmiş olup, aynı doktor tarafından  $p$  operasyonunun ardından  $q$  operasyonunun gerçekleştirilmesi durumunda gerekli doktor hazırlık süreleri Çizelge 8.4’te verilmiştir.

Şekil 8.2’de verilen ve çözümü ifade eden Gant diyagramının ilk bölümü operasyonların oda atamalarını ifade ederken ikinci bölümü ise doktor atamasına karşılık gelmektedir.

Çizelge 8.1. Operasyon işlem süreleri ve ilk operasyon hazırlık süreleri (dk)

| Operasyon Numarası                | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  |
|-----------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| İlk Hazırlık Süresi ( $First_p$ ) | 20 | 5  | 10 | 10 | 5  | 15 | 20 | 15 | 15 |
| İşlem Süresi ( $t_p$ )            | 75 | 40 | 40 | 45 | 25 | 60 | 60 | 30 | 40 |

Çizelge 8.2. Operasyonları gerçekleştirebilen doktorlar kümesi

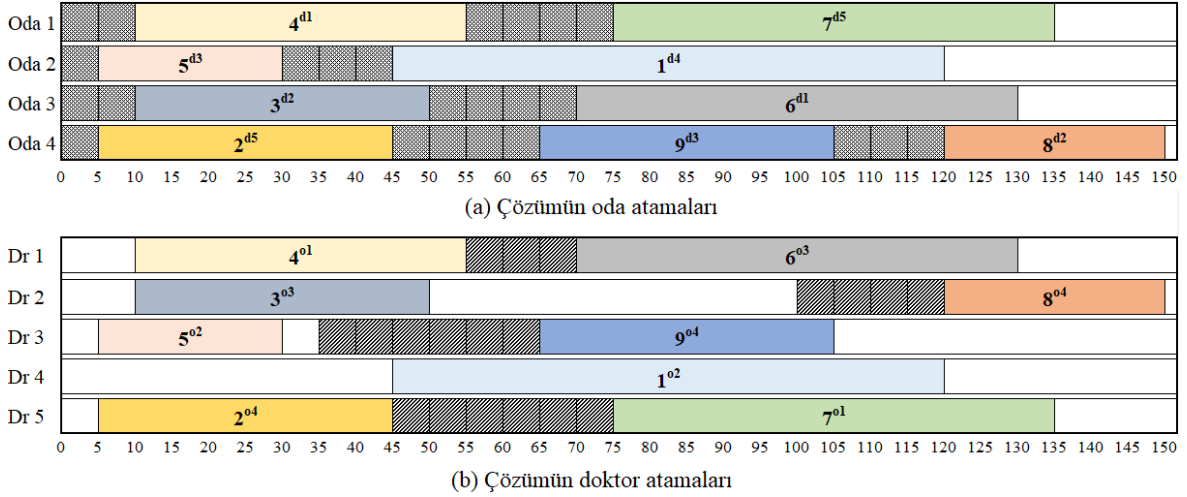
| $GD_p$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|--------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1      |   |   |   | 1 |   | 1 |   |   | 1 |
| 2      |   |   | 1 |   |   |   |   | 1 |   |
| 3      |   |   |   | 1 | 1 | 1 |   |   | 1 |
| 4      | 1 | 1 |   |   |   |   | 1 |   |   |
| 5      |   | 1 |   |   |   |   | 1 |   |   |

Çizelge 8.3. Oda hazırlık süreleri (dk)

| $StO_{pq}$ | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  |
|------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1          | -  | 20 | 25 | 30 | 25 | 35 | 20 | 25 | 30 |
| 2          | 30 | -  | 25 | 30 | 25 | 35 | 20 | 25 | 20 |
| 3          | 25 | 20 | -  | 25 | 30 | 20 | 20 | 25 | 20 |
| 4          | 20 | 20 | 25 | -  | 25 | 20 | 20 | 25 | 30 |
| 5          | 15 | 35 | 20 | 25 | -  | 25 | 20 | 20 | 25 |
| 6          | 20 | 35 | 20 | 25 | 25 | -  | 25 | 30 | 20 |
| 7          | 30 | 20 | 20 | 25 | 30 | 25 | -  | 25 | 30 |
| 8          | 25 | 30 | 25 | 35 | 20 | 25 | 20 | -  | 20 |
| 9          | 20 | 25 | 30 | 25 | 35 | 20 | 25 | 15 | -  |

Çizelge 8.4. Doktor hazırlık süreleri (dk)

| $StD_{pq}$ | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  |
|------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1          | -  | 30 | 40 | 35 | 30 | 40 | 35 | 50 | 45 |
| 2          | 30 | -  | 30 | 40 | 35 | 30 | 30 | 30 | 40 |
| 3          | 50 | 30 | -  | 40 | 35 | 40 | 35 | 20 | 45 |
| 4          | 30 | 40 | 35 | -  | 35 | 15 | 40 | 35 | 20 |
| 5          | 20 | 35 | 25 | 35 | -  | 25 | 35 | 25 | 30 |
| 6          | 35 | 35 | 25 | 25 | 35 | -  | 35 | 30 | 30 |
| 7          | 35 | 30 | 40 | 35 | 40 | 35 | -  | 35 | 45 |
| 8          | 40 | 35 | 25 | 40 | 35 | 40 | 35 | -  | 40 |
| 9          | 35 | 25 | 35 | 25 | 35 | 25 | 40 | 35 | -  |



Şekil 8.2. Örnek kromozomun karşılık geldiği çözüme ait Gant şeması

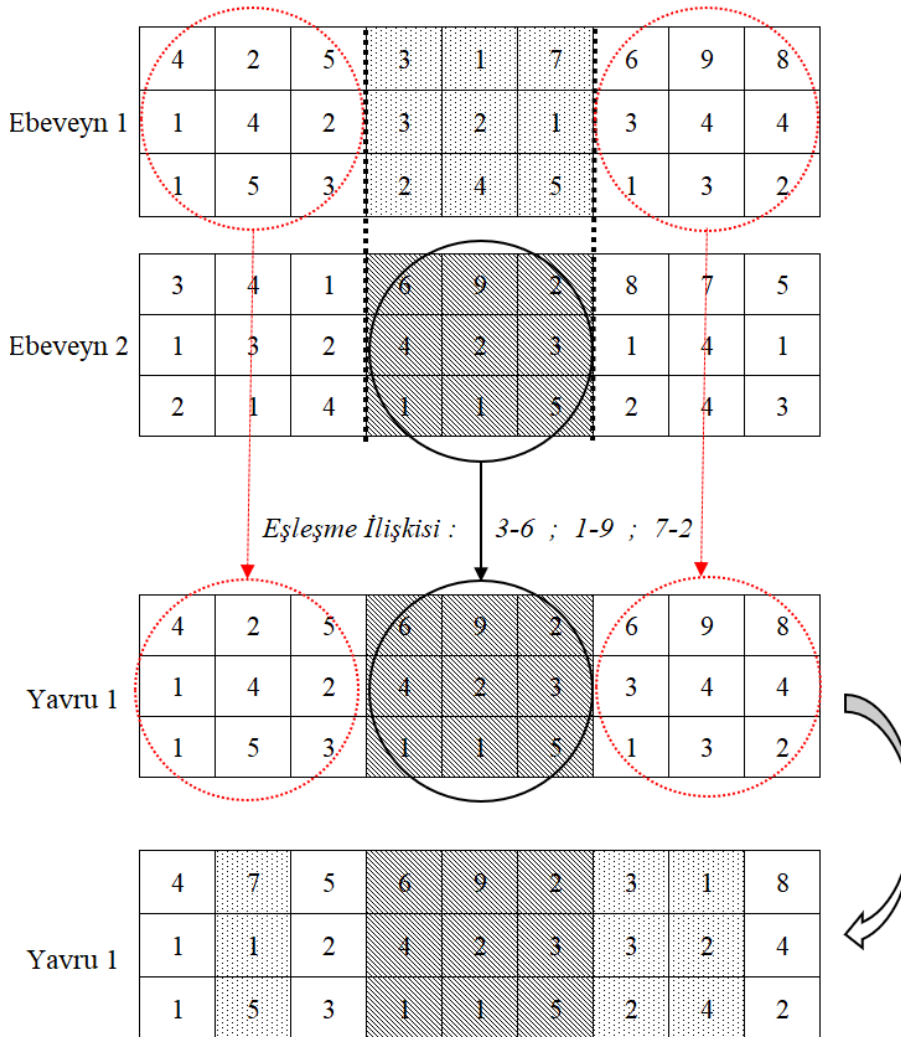
Kromozomdan çözüm oluşturma işleminde (decoding) operasyonların atanması soldan sağa doğru yapılmaktadır. Kromozomda ilk sırada yani gende bulunan operasyon olan 4 numaralı operasyon, ilgili gen bilgisine göre 1 numaralı oda ve doktora atanmaktadır. İkinci sırada bulunan operasyon 2 ise 4 numaralı oda ve 5 numaralı doktora atanır. Bu operasyon yine atandığı doktor ve odada ilk operasyondur. Benzer şekilde 5 ve 3 numaralı operasyonlar da atandığı oda ve doktorlarda ilk operasyon olur. Tüm bu operasyonlar odalarında ilk operasyon olduğundan oda hazırlık zamanından sonra başlamaktadır. Sonraki sırada yer alan gene göre operasyon 1 ise oda 2 ve doktor 4'e atanacaktır. Bu operasyon oda ikide operasyon 5 tamamlandıktan ve ilgili hazırlık işlemi gerçekleştirildikten sonra başlayacaktır. Gant diyagramı olarak gösterilen ilgili ameliyathane çizelgeleme problem çözümü işlemlere bu şekilde devam edilerek oluşturulmuştur. Gant diyagramının elde edilmesinden sonra çözümün amaç fonksiyonu ve buna eşit olarak alınan uygunluk fonksiyonu değeri 150 olarak belirlenir.

### 8.1.3. Seçim

Seçim mekanizması olarak ikili turnuva yöntemi kullanılmıştır. Yani başlangıç popülasyonundan rassal olarak seçilen iki kromozomdan uygunluk değeri yüksek olan kromozom seçilmiştir. Bu işlem popülasyon boyutuna ulaşana kadar tekrarlanmıştır. Seçim mekanizmasına ek olarak elitizm uygulanmıştır. Bu strateji ile en iyi bireyin kopyası herhangi bir değişikliğe uğramadan bir sonraki popülasyona aktarılmıştır. Bu yöntemin avantajı, bulunan en iyi bireyin seçim mekanizmasında veya genetik operatörler kullanılırken kaybolmasını önlemesidir.

#### 8.1.4. Çaprazlama

Çaprazlama operatörü sayesinde turnuva seçimi ile seçilen ebeveyn kromozomlar arasında gen değişimi gerçekleşmektedir. Bu çalışmada kısmi eşleşmeli çaprazlama (PMX) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde değişim bölgelerini belirlemek için iki rassal sayı seçilir. Bu aralık içerisindeki genler yer değiştirilir. Yer değiştirme sonunda kromozomun ilk dizisinde aralığın dışında kalan ve tekrar eden genler değiştirilen değerler ile tamamlanır. Oda ve doktorlara ait diziler ilk diziye bağlı şekilde hareket eder. Çaprazlama  $p_c$  çaprazlama oranına bağlı olarak gerçekleştirilir. Yani çaprazlama yapılacak ebeveynler seçildikten sonra bir rassal sayı üretilir. Eğer rassal sayı çaprazlama oranından küçükse çaprazlama gerçekleştirilir, değilse seçilen ebeveynler değişiklik yapılmaksızın yeni popülasyona kaydedilir. Örneğin değişim bölgeleri için belirlenen rassal sayılar 3 ve 7 olması durumunda ilk çocuk için çaprazlama Şekil 8.3’deki gibi gerçekleşecektir.



Şekil 8.3. Önerilen genetik algoritma için çaprazlama işlemi

### 8.1.5. Mutasyon

Mutasyon, tek birey üzerinde normal olmayan kalıtsal değişikliklerin oluşturulmasıdır. Mutasyon  $p_m$  mutasyon oranına bağlı olarak gerçekleştirilir. Yeni popülasyondaki ilk birey haricindeki her bireye mutasyon koşulu sağlanıyorsa (yani üretilen rassal sayı mutasyon oranından küçükse) mutasyon operatörü uygulanır. Mutasyon koşulu sağlanmıyor ise birey herhangi bir değişikliğe uğratılmaz. Önerilen mutasyon operatöründe, mutasyon seçim işlemi aralıklarını oluşturmak için 0 ile 1 aralığında bulunan  $p_{a1}$  ve  $p_{a2}$  olmak üzere iki nokta belirlenmiştir. Gerçekleştirilecek mutasyon işlemi seçmek için bir rassal sayı üretilmektedir. Rassal sayının bulunduğu aralığa göre mutasyon işlemi uygulanmaktadır. Eğer rassal sayı ilk aralıkta ise keyfi iki genin değişimi yöntemi kullanılır. Rassal olarak belirlenen iki gen atanmış olduğu oda ve doktoru ile beraber yer değiştirir. Eğer rassal sayı ikinci aralıkta ise rassal olarak belirlenen bir pozisyondaki operasyona yeni bir rassal oda ataması gerçekleştirilir. Rassal sayı üçüncü aralıkta ise, rassal olarak belirlenen bir pozisyondaki operasyona, bu operasyonu gerçekleştirebilecek doktorlar kümesinden yeni bir rassal doktor ataması gerçekleştirilir.

Önerilen mutasyon operatörü seçilecek işleme göre sırasıyla Şekil 8.4, Şekil 8.5 ve Şekil 8.6 'te örneklendirilmiştir. Şekil 8.4 üretilen rassal sayının ilk aralıkta kalması sonucu yer değiştirme işlemi betimlemektedir. Bu şekilde üretilen rassal pozisyonlar 3 ve 7 olup bu pozisyonlardaki genler yer değiştirmektedir. Şekilden de görüleceği gibi operasyonlar gen şeklinde, diğer bir ifadeyle oda ve doktorlarıyla birlikte yer değiştirmektedir.

|                   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|-------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Mutasyondan önce  | 4 | 2 | 5 | 3 | 1 | 7 | 6 | 9 | 8 |
|                   | 1 | 4 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 4 | 4 |
|                   | 1 | 5 | 3 | 2 | 4 | 5 | 1 | 3 | 2 |
| Mutasyondan sonra | 4 | 2 | 6 | 3 | 1 | 7 | 5 | 9 | 8 |
|                   | 1 | 4 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2 | 4 | 4 |
|                   | 1 | 5 | 1 | 2 | 4 | 5 | 3 | 3 | 2 |

Şekil 8.4. Önerilen Mutasyon Operatörü (Rassal sayı ilk aralıkta ise)

Üretilen rassal sayının ikinci aralıkta kalması durumunda uygulanan mutasyon işlemi Şekil 8.5'te örneklendirilmiştir. Bu şekilde üretilen rassal pozisyon 6 olup, bu pozisyonadaki operasyon atandığı oda haricinde başka bir odaya atanmıştır.

|                   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|-------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Mutasyondan önce  | 4 | 2 | 5 | 3 | 1 | 7 | 6 | 9 | 8 |
|                   | 1 | 4 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 4 | 4 |
|                   | 1 | 5 | 3 | 2 | 4 | 5 | 1 | 3 | 2 |
| Mutasyondan sonra | 4 | 2 | 5 | 3 | 1 | 7 | 6 | 9 | 8 |
|                   | 1 | 4 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 |
|                   | 1 | 5 | 3 | 2 | 4 | 5 | 1 | 3 | 2 |

Şekil 8.5. Önerilen Mutasyon Operatörü (Rassal sayı ikinci aralıkta ise)

Üretilen rassal sayının üçüncü aralıkta kalması durumunda uygulanan mutasyon işlemi Şekil 8.6'da örneklendirilmiştir. Bu şekilde üretilen rassal pozisyon 6 olup, bu pozisyonadaki operasyon, atandığı doktor haricinde operasyonu gerçekleştirebilecek başka bir doktora atanmıştır.

|                   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|-------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Mutasyondan önce  | 4 | 2 | 5 | 3 | 1 | 7 | 6 | 9 | 8 |
|                   | 1 | 4 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 4 | 4 |
|                   | 1 | 5 | 3 | 2 | 4 | 5 | 1 | 3 | 2 |
| Mutasyondan sonra | 4 | 2 | 5 | 3 | 1 | 7 | 6 | 9 | 8 |
|                   | 1 | 4 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 4 | 4 |
|                   | 1 | 5 | 3 | 2 | 4 | 4 | 1 | 3 | 2 |

Şekil 8.6. Önerilen Mutasyon Operatörü (Rassal sayı üçüncü aralıkta ise)

### 8.1.6. Durdurma kriteri

Önerilen genetik algortmada durdurma kriteri olarak süre belirlenmiştir. Algoritma istenen süreye ulaştığında duracaktır ve bu süre içerisinde bulunan en iyi çözüm kaydedilecektir.

### 8.2. Önerilen Tavlama Benzetimi

Tavlama benzetimi tek çözüm tabanlı komşu arama algoritmasıdır. Önerilen tavlama benzetimi algoritmasında da önerilen genetik algortmada kullanılan kodlama yapısı kullanılmaktadır. Yine genetik algortmada olduğu gibi başlangıç çözümü rassal olarak oluşturulmaktadır. Operasyon sıraları rassal olarak belirlendikten sonra operasyonlara rassal bir oda ataması ve operasyonu gerçekleştirebilecek doktorlar arasından rassal bir doktor ataması yapılmıştır. Belirlenen başlangıç sıcaklığında, markov zinciri uzunluğuna ulaşana kadar komşu çözüm üretme fonksiyonunu kullanarak komşu çözüm üretilir.

Komşu çözüm üretme fonksiyonu olarak genetik algortmada kullanılan mutasyon operatörü kullanılmıştır. Komşu çözüm üretme fonksiyonunda uygulanacak hareketin seçim işlemi aralıklarını oluşturmak için 0 ile 1 aralığında bulunan  $p_{a1}$  ve  $p_{a2}$  olmak üzere iki nokta belirlenmiştir. Gerçekleştirilecek hareketi seçmek için bir rassal sayı üretilmektedir. Rassal sayının bulunduğu aralığa göre mevcut çözüm komşu üretme hareketini gerçekleştirerek komşu çözümü oluşturmaktadır. Eğer rassal sayı ilk aralıkta ise keyfi olarak seçilen iki nokta yer değiştirmektedir. Rassal olarak belirlenen iki operasyon atanmış olduğu oda ve doktoru ile beraber yer değiştirir. Eğer rassal sayı ikinci aralıkta ise rassal olarak belirlenen bir pozisyondaki operasyona yeni bir rassal oda ataması gerçekleştirilir. Rassal sayı üçüncü aralıkta ise, rassal olarak belirlenen bir pozisyondaki operasyona, bu operasyonu gerçekleştirebilecek doktorlar kümesinden yeni bir rassal doktor ataması gerçekleştirilir.

Tavlama benzetimi algoritmasında kullanılan parametrelerin ve değerlerinin belirlenmesi tavlama veya soğutma planı olarak tanımlanmaktadır. Tavlama planı ile aşağıdaki parametreler probleme ait çözümün performansını artıracak şekilde belirlenmelidir [74].

1.  $T$  sıcaklık parametresinin başlangıç değeri
2. Sıcaklığın hangi yöntemle azaltılacağını belirlemek için kullanılan  $T(t)$  sıcaklık fonksiyonu

3. Her sıcaklıkta gerçekleştirilmesi gereken  $M$  tekrar sayısı (markov zinciri uzunluğu)
4. Algoritmayı durdurmak için  $T$  sıcaklık parametresinin son değeri

Önerilen tavlama benzetimi algoritmasında komşuların kabulü Metropolis kriterine göre yapılmaktadır. Eğer üretilen komşu çözümün uygunluk değeri mevcut çözüme göre daha iyiye kabul edilir. Uygunluk değerinde  $\Delta$  kadar kötüleşmeye yol açan komşu çözümün kabul edilme olasılığı kabul fonksiyonu olarak adlandırılır ve  $e^{-\Delta/T}$  fonksiyonuna göre değerlendirilir. Bu eşitlikte  $T$ , fiziksel tavlama sıcaklığı karşılık gelen bir kontrol parametresidir. Kabul fonksiyonuna göre, uygunluk değerinde meydana gelen küçük artışların kabul edilme olasılığı, büyük artışların kabul edilme olasılığından daha fazladır. Ayrıca,  $T$  yüksek olduğunda hareketlerin çoğu kabul edilecektir.  $T$  sıfıra yaklaştıkça uygunluk değerinde kötüleşmeye neden olan hareketlerin çoğu reddedilecektir. Bu nedenle tavlama benzetimi algoritmasında, yerel optimum tuzaklarına düşülmesini engellemek için göreceli olarak yüksek bir  $T$  değeri ile aramaya başlanır. Tavlama benzetimi algoritması sıcaklığı yavaş yavaş azaltırken her sıcaklık değerinde belli sayıda hareket deneyerek arama işlemini sürdürür. Yani aynı sıcaklık değerinde markov zinciri sayısı ( $M$ ) kadar komşu üretilir [74]. Uygunluk değerinde kötüleşmeye yol açan çözümün değerlendirilmesi için 0-1 aralığında rassal bir sayı üretilir. Eğer rassal sayı kabul fonksiyonunun değerinden küçükse komşu çözüm kabul edilir, büyükse kabul edilmez ve mevcut çözüm ile aramaya devam edilir. Sıcaklık yüksekken daha fazla sayıda kötü çözüm kabul edilirken, sıcaklık düştükçe kötü çözümlerin kabulü zorlaşır, algoritmanın sonlarına doğru yalnızca uygunluk değerinde iyileşme sağlayan çözümlerin kabul edilmesi amaçlanır.

Aynı sıcaklık değerinde markov zinciri sayısı kadar komşu üretildiğinde, soğutma fonksiyonuna uygun şekilde sıcaklık düşürülür. Bu çalışmada soğutma fonksiyonu olarak geometrik fonksiyon kullanılmıştır. Yani belirlenen  $\alpha$  değeri kullanılarak  $T_k = T_{k-1} * \alpha$  fonksiyonuna uygun şekilde soğutma gerçekleştirilir. Her sıcaklık değerinde aynı işlemler durdurma koşulu sağlanana kadar tekrarlanır. Durdurma koşulu olarak komşu sayısı seçilmiştir. Yani algoritma başlangıcında belirtilen komşu sayısına ulaştığında algoritma duracaktır.



## 9. KARŞILAŞTIRMA ÇALIŞMASI

### 9.1. Test Problemleri

Önerilen modelin performansını değerlendirmek için rassal olarak üretilmiş test problem örnekleri kullanılmıştır. Test problemlerine ilişkin detaylı bilgiler Çizelge 10.1’de gösterilmiştir. Operasyon sayısı için  $(5,8,10,12,15,20,25,30,35,40,50,60,75,90,120)$  değerlerinden, oda sayısı için 18 farklı değerden ve doktor sayısı için de 23 farklı değerden faydalanılarak toplamda farklı boyutlarda 276 problem örneği üretilmiştir. Test problemlerinin dağılışı Çizelge 9.1.’de verilmiştir. Hazırlık zamanlarının çözüme etkisini daha iyi analiz edebilmek amacıyla farklı önem faktörleri kullanılmıştır. Önem faktörünün test problemi üretiminde kullanılmasında Lee ve Pinedo [82] ile aynı yöntem kullanılmış olup sıra bağımlı hazırlık zamanlarını belirlemek için hazırlık zamanı önem faktörü( $\eta$ ),  $\eta = \bar{s}/\bar{p}$  formülasyonu kullanılmıştır. Bu formülasyonda  $\bar{s}$  ortalama hazırlık zamanını,  $\bar{p}$  ise ortalama operasyon süresini göstermektedir. Hazırlık zamanları  $[0,2\bar{s}]$  aralığında uniform dağılım kullanılarak oluşturulmuştur. Önem faktörü ( $\eta$ ), 0,1 ve 0,25 olarak iki farklı değer kullanılmıştır. Cerrahi işlem operasyon sürelerini oluşturmak için, Jebali,Alouane ve Ladet [31] ‘in önerisine uygun şekilde ortalaması 180 dakika, standart sapması 60 dakika olan log-normal dağılım kullanılmıştır.

Çizelge 9.1. Test problemleri

| $n$ | $h$        | $o$        | Önem faktörü | Problem Sayısı | Problem Boyutu |
|-----|------------|------------|--------------|----------------|----------------|
| 5   | {1,2,3}    | {1,2}      | 0,1 ve 0,25  | 1-96           | Küçük          |
| 8   | {2,3,4}    | {1,3,4}    | 0,1 ve 0,25  |                |                |
| 10  | {2,3,4}    | {1,2,3}    | 0,1 ve 0,25  |                |                |
| 12  | {2,3,5}    | {2,3,4}    | 0,1 ve 0,25  |                |                |
| 15  | {3,4,6}    | {2,3,5}    | 0,1 ve 0,25  |                |                |
| 20  | {3,5,7}    | {2,4,6}    | 0,1 ve 0,25  | 97-204         | Orta           |
| 25  | {4,7,9}    | {3,5,8}    | 0,1 ve 0,25  |                |                |
| 30  | {5,8,11}   | {3,6,9}    | 0,1 ve 0,25  |                |                |
| 35  | {6,9,13}   | {4,7,11}   | 0,1 ve 0,25  |                |                |
| 40  | {6,10,14}  | {4,8,12}   | 0,1 ve 0,25  |                |                |
| 50  | {8,13,18}  | {5,10,15}  | 0,1 ve 0,25  | 205-276        | Büyük          |
| 60  | {9,15,21}  | {6,12,18}  | 0,1 ve 0,25  |                |                |
| 75  | {12,19,27} | {8,15,23}  | 0,1 ve 0,25  |                |                |
| 90  | {14,23,32} | {9,18,27}  | 0,1 ve 0,25  |                |                |
| 120 | {18,30,42} | {12,24,36} | 0,1 ve 0,25  |                |                |

## 9.2. Parametre Optimizasyonu

Sezgisel yöntemlerin performansı, algoritmanın parametrelerine bağlıdır. Parametre değerleri problemin özelliğine göre değişiklik gösterdiğinden tüm problemler için kullanılabilecek optimal parametreler bulunamamıştır. Bu nedenle algoritma parametreleri özenle seçilmeli, ön çalışmalar yapılarak belirlenmelidir. Algoritma parametreleri için farklı değerler denenerek algoritmanın performansını iyileştiren değer kombinasyonları üzerinde durulmalıdır. Belirlenmesi gereken parametreler kullanılan sezgisel yöntemle göre farklılık göstermektedir. Genetik algoritma için parametreler popülasyon büyüklüğü, çaprazlama ve mutasyon olasılığı iken, tavlama benzetimi için başlangıç ve bitiş sıcaklığı, sıcaklık düşürme oranı ve markov zinciri uzunluğudur. Bu çalışmada parametrelerin belirlenmesi için farklı değerler ile ön denemeler yapılmış ve değer kombinasyonları içinden algoritmanın performansını iyileştiren değerler seçilmiştir. Genetik algoritma ve tavlama benzetimi parametrelerinin belirlenmesi için kullanılan değerler ve seçilen değerler sırasıyla Çizelge 9.2 ve Çizelge 9.3’de verilmiştir.

Çizelge 9.2. Genetik algoritma için parametre optimizasyonunda kullanılan değerler

| Parametre            | Test Edilen Değerler                      | Seçilen Değer |
|----------------------|-------------------------------------------|---------------|
| Popülasyon Büyüklüğü | 10 ; 50 ; 100 ; 200                       | 200           |
| Çaprazlama Olasılığı | 0,6 ; 0,8 ; 0,9 ; 0,95                    | 0,8           |
| Mutasyon Olasılığı   | 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,4 ; 0,5 ; 0,75 | 0,5           |

Çizelge 9.3. Tavlama benzetimi için parametre optimizasyonunda kullanılan değerler

| Parametre                  | Test Edilen Değerler | Seçilen Değer |
|----------------------------|----------------------|---------------|
| Başlangıç Sıcaklığı        | 500 ; 1000 ; 2000    | 1000          |
| Bitiş Sıcaklığı            | 0,001 ; 0,1 ; 1      | 0,001         |
| Soğutma Oranı ( $\alpha$ ) | 0,99 ; 0,995 ; 0,999 | 0,995         |
| Markov Zinciri             | 50 ; 100 ; 200       | 100           |

### 9.3. Bulgular

Sıra bağımlı hazırlık zamanları bulunan ameliyathane çizelgeleme problemine ait karışık tam sayılı doğrusal programlama formunda matematiksel model (MM) geliştirilmiştir. Küçük, orta ve büyük boyutlu problem örneklerindeki performansını test etmek amacıyla matematiksel model, 8 GB RAM ve Intel I5 CPU bulunan kişisel bilgisayarda kurulu GAMS 24.1 yazılımında (Cplex çözücüsü) her bir örnek için 3600 saniye çalıştırılmıştır. Matematiksel modele ait sonuçlar Çizelge 9.4 ve Çizelge 9.5'te özetlenmiştir.

Çizelge 9.4. Matematiksel model sonuçları (önem faktörü=0,1 değeri için)

| $n$ | $h$        | $o$       | Problem Sayısı | Optimal | Tam Sayılı | Çözüm Bulunamadı | Ortalama CPU | Ortalama Gap % |
|-----|------------|-----------|----------------|---------|------------|------------------|--------------|----------------|
| 5   | {1,2,3}    | {1,2}     | 12             | 12      |            |                  | 0,47         | 0,00           |
| 8   | {2,3,4}    | {1,3,4}   | 9              | 9       |            |                  | 123,31       | 0,00           |
| 10  | {2,3,4}    | {1,2,3}   | 9              |         | 9          |                  | 3600,05      | 38,00          |
| 12  | {2,3,5}    | {2,3,4}   | 9              |         | 9          |                  | 3600,07      | 38,26          |
| 15  | {3,4,6}    | {2,3,5}   | 9              |         | 9          |                  | 3600,09      | 60,28          |
| 20  | {3,5,7}    | {2,4,6}   | 9              |         | 9          |                  | 3600,14      | 69,38          |
| 25  | {4,7,9}    | {3,5,8}   | 9              |         | 9          |                  | 3600,33      | 68,09          |
| 30  | {5,8,11}   | {3,6,9}   | 9              |         | 9          |                  | 3601,98      | 67,83          |
| 35  | {6,9,13}   | {4,7,11}  | 9              |         | 9          |                  | 3601,17      | 67,36          |
| 40  | {6,10,14}  | {4,8,12}  | 9              |         | 9          |                  | 3601,88      | 71,48          |
| 50  | {8,13,18}  | {5,10,15} | 9              |         | 9          |                  | 3604,51      | 73,90          |
| 60  | {9,15,21}  | {6,12,18} | 9              |         | 9          |                  | 3609,12      | 73,35          |
| 75  | {12,19,27} | {8,15,23} | 9              |         | 6          | 3                | 3612,91      | 80,50          |
| 90  | {14,23,32} | {9,18,27} | 9              |         | 3          | 6                | 3612,65      | 85,55          |
| 120 | 18         | 12        | 3              |         |            | 3                | -            | -              |

Çizelge 9.4 ve 9.5'den görüldüğü üzere, karışık tam sayılı programlama formunda oluşturulan matematiksel model, küçük boyutlu problemlerden operasyon sayısı 5 ve 8 olanların tümünde optimal çözümlere çok kısa sürelerde ulaşmıştır. Operasyon sayısı 10 ve daha büyük olan problemlerde ise optimal çözümlerin bulunamadığı ancak tam sayılı çözümlere ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Açıklık değeri çok küçülen problem örnekleri olmakla birlikte, ortalama açıklık %47 oranındadır. Orta boyutlu problemlerde ise matematiksel model tüm örnekler için tam sayılı çözümlere ulaşmıştır. Alt sınırlar ile ulaşılan tam sayılı çözümler arasındaki ortalama açıklık %71'dir. Matematiksel model ile büyük boyutlu problemlerin bir kısmı için tam sayılı çözümler bulunurken, diğerlerinde izin verilen zaman içerisinde tam sayılı çözüm bulunamamıştır. Büyük boyutlu problemlerde alt sınır ile bulunan tam sayılı çözüm değerleri arasındaki ortalama açıklık %80 oranındadır.

Önem faktörü 0,1'den 0,25'e çıktığında optimali bulunan problem örnekleri için çözüm süresi ortalamaları azalmıştır ancak önemli bir fark oluşturmadığı gözlemlenmiştir.

Çizelge 9.5. Matematiksel model sonuçları (önem faktörü=0,25 değeri için)

| $n$ | $h$        | $o$       | Problem Sayısı | Optimal | Tam Sayılı | Çözüm Bulunamadı | Ortalama CPU | Ortalama Gap % |
|-----|------------|-----------|----------------|---------|------------|------------------|--------------|----------------|
| 5   | {1,2,3}    | {1,2}     | 12             | 12      |            |                  | 0,37         | 0,00           |
| 8   | {2,3,4}    | {1,3,4}   | 9              | 9       |            |                  | 147,18       | 0,00           |
| 10  | {2,3,4}    | {1,2,3}   | 9              |         | 9          |                  | 3600,05      | 37,62          |
| 12  | {2,3,5}    | {2,3,4}   | 9              |         | 9          |                  | 3600,06      | 49,99          |
| 15  | {3,4,6}    | {2,3,5}   | 9              |         | 9          |                  | 3600,08      | 60,54          |
| 20  | {3,5,7}    | {2,4,6}   | 9              |         | 9          |                  | 3600,15      | 70,74          |
| 25  | {4,7,9}    | {3,5,8}   | 9              |         | 9          |                  | 3600,33      | 70,40          |
| 30  | {5,8,11}   | {3,6,9}   | 9              |         | 9          |                  | 3600,64      | 72,12          |
| 35  | {6,9,13}   | {4,7,11}  | 9              |         | 9          |                  | 3601,15      | 72,44          |
| 40  | {6,10,14}  | {4,8,12}  | 9              |         | 9          |                  | 3601,80      | 74,39          |
| 50  | {8,13,18}  | {5,10,15} | 9              |         | 9          |                  | 3604,87      | 77,09          |
| 60  | {9,15,21}  | {6,12,18} | 9              |         | 9          |                  | 3609,57      | 78,28          |
| 75  | {12,19,27} | {8,15,23} | 9              |         | 6          | 3                | 3614,89      | 81,62          |
| 90  | {14,23,32} | {9,18,27} | 9              |         | 3          | 6                | 3612,36      | 86,65          |
| 120 | 18         | 12        | 3              |         |            | 3                | -            | -              |

Matematiksel modelin problemlerin çoğunda optimal sonucu bulamaması ve 3600 saniye sürede alt sınırlar ile ulaşılan tam sayılı çözümler arasındaki açıklık değerlerinin yüksek olması nedeniyle problemin çözümü için genetik algoritma ve tavlama benzetimi algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritmalar için parametre optimizasyonu yapılmıştır. Sezgisel yöntemler Visual Studio 2017 programı ile C# dilinde kodlanarak, küçük, orta ve büyük boyuttaki test problemleri için çalıştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak matematiksel modelin ve sezgisel algoritmaların performansları analiz edilmiştir. Yöntemlerin test problemleri üzerindeki etkinliğinin anlaşılması için Çizelge 9.6 oluşturulmuştur. Çizelge incelendiği zaman küçük boyutlu problemlerde üç yöntemin de iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Genetik algoritma daha fazla sayıdaki küçük boyutlu problemlerde diğer yöntemlerden iyi sonuçlar bulmuştur. Toplam 96 adet küçük boyutlu problemin 72 adetinde genetik algoritma, 58 adetinde matematiksel model, 50 adetinde tavlama benzetimi iyi çözüm bulmuştur. Dolayısıyla genetik algoritmanın küçük boyutlu problemlerde daha başarılı olduğu görülmüştür. Orta boyutlu problemlerde ise matematiksel

modelin başarısı azalmış olup, iyi sonuçlara ulaşma oranı düşmüştür. Orta boyutlu problemlerde genetik algoritma ve tavlama benzetimi yaklaşımlarının iyi sonuçlara ulaştığı görülmektedir. Tavlama benzetimi yönteminin orta boyutlu problemlerde iyi sonuçlara ulaşma oranı genetik algoritmaya kıyasla daha yüksektir. 108 adet orta boyutlu problemin 80 adetinde tavlama benzetimi, 27 adetinde genetik algoritma, 1 adetinde matematiksel model iyi çözüm bulmuştur. Büyük boyutlu problemlerde ise iyi sonuçların tamamına tavlama benzetimi yöntemi ile ulaşılmıştır.

Çizelge 9.6. Test problemlerinde en iyi sonucu bulan yöntemler

| $n$ | $h$        | $o$        | Önem Faktörü | Matematiksel Model | Genetik Algoritma | Tavlama Benzetimi |
|-----|------------|------------|--------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| 5   | {1,2,3}    | {1,2}      | 0,1 ve 0,25  | 24                 | 24                | 24                |
| 8   | {2,3,4}    | {1,3,4}    | 0,1 ve 0,25  | 18                 | 16                | 13                |
| 10  | {2,3,4}    | {1,2,3}    | 0,1 ve 0,25  | 8                  | 10                | 7                 |
| 12  | {2,3,5}    | {2,3,4}    | 0,1 ve 0,25  | 7                  | 9                 | 3                 |
| 15  | {3,4,6}    | {2,3,5}    | 0,1 ve 0,25  | 2                  | 12                | 4                 |
| 20  | {3,5,7}    | {2,4,6}    | 0,1 ve 0,25  | 1                  | 11                | 6                 |
| 25  | {4,7,9}    | {3,5,8}    | 0,1 ve 0,25  | 0                  | 9                 | 9                 |
| 30  | {5,8,11}   | {3,6,9}    | 0,1 ve 0,25  | 0                  | 1                 | 17                |
| 35  | {6,9,13}   | {4,7,11}   | 0,1 ve 0,25  | 0                  | 3                 | 15                |
| 40  | {6,10,14}  | {4,8,12}   | 0,1 ve 0,25  | 0                  | 2                 | 16                |
| 50  | {8,13,18}  | {5,10,15}  | 0,1 ve 0,25  | 0                  | 1                 | 17                |
| 60  | {9,15,21}  | {6,12,18}  | 0,1 ve 0,25  | 0                  | 0                 | 18                |
| 75  | {12,19,27} | {8,15,23}  | 0,1 ve 0,25  | 0                  | 0                 | 18                |
| 90  | {14,23,32} | {9,18,27}  | 0,1 ve 0,25  | 0                  | 0                 | 18                |
| 120 | {18,30,42} | {12,24,36} | 0,1 ve 0,25  | 0                  | 0                 | 18                |

Çizelge 9.7’de problemler için her yöntem ile bulunan sonuçların elde edilen en iyi sonuçlardan ortalama sapmaları görülmektedir. Bu çizelgeye göre küçük boyutlu problemlerde ortalama sapmalar birbirine yakın olmakla birlikte, matematiksel modelin çözümü ile elde edilen sonuçların en iyi çözümden sapması daha düşüktür. Küçük boyutlu problemler için matematiksel modelin en iyi sonuçlardan sapması 1,15 oranında iken, genetik algoritmanın en iyi sonuçlardan ortalama sapması 1,40 oranında , tavlama benzetiminin ise 1,56 oranındadır. Problem boyutu büyüdükçe matematiksel modelin etkinliği azalmıştır. Orta boyutlu problemlerde genetik algoritma ve tavlama benzetimi yönteminin birbirine yakın sonuçlar verdiği ancak tavlama benzetiminin en iyi sonuçtan

sapma ortalamalarının daha düşük olduğu görülmüştür. Orta boyutlu problemlerde tavlama benzetimi yönteminin en iyi sonuçlardan ortalama sapması 1,65 oranında iken genetik algoritmanın sapması 3,43 oranındadır. Büyük boyutlu problemlerde tavlama benzetimi yönteminin diğer yöntemlerden daha etkin olduğu görülmektedir. Önem değeri 0,1'den 0,25'e çıktığı zaman yöntemlerin göreceli performans sıralaması değişmemesine rağmen en iyi sonuçtan sapma ortalamalarının arttığı gözlenmiştir.

Çizelge 9.7. Yöntemlerin bulunan en iyi sonuçlardan ortalama sapması

| $n$   | Önem Faktörü | Matematiksel Model | Genetik Algoritma | Tavlama Benzetimi |
|-------|--------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| 5     | 0,1          | 0                  | 0                 | 0                 |
|       | 0,25         | 0                  | 0                 | 0                 |
| 8     | 0,1          | 0                  | 0,58              | 0,66              |
|       | 0,25         | 0                  | 1,34              | 0,76              |
| 10    | 0,1          | 0,42               | 1,174             | 1,5               |
|       | 0,25         | 3,293              | 1,8               | 2,272             |
| 12    | 0,1          | 1,416              | 1,97              | 2,084             |
|       | 0,25         | 1,925              | 3,547             | 4,058             |
| 15    | 0,1          | 1,413              | 1,543             | 2,026             |
|       | 0,25         | 3,767              | 3,002             | 3,256             |
| 20    | 0,1          | 4,733              | 2,066             | 2,195             |
|       | 0,25         | 5,587              | 2,729             | 2,488             |
| 25    | 0,1          | 5,119              | 1,949             | 1,453             |
|       | 0,25         | 8,047              | 3,055             | 2,102             |
| 30    | 0,1          | 7,435              | 2,372             | 1,319             |
|       | 0,25         | 10,63              | 4,321             | 2,191             |
| 35    | 0,1          | 12,33              | 2,544             | 1,138             |
|       | 0,25         | 14,57              | 4,176             | 1,624             |
| 40    | 0,1          | 17,76              | 3,071             | 1,158             |
|       | 0,25         | 19,61              | 5,884             | 1,834             |
| 50    | 0,1          | 21,65              | 3,126             | 0,875             |
|       | 0,25         | 29,59              | 5,844             | 1,466             |
| 60    | 0,1          | 23,12              | 3,571             | 0,846             |
|       | 0,25         | 28,6               | 6,491             | 1,192             |
| 75    | 0,1          | 23,77              | 4,492             | 0,966             |
|       | 0,25         | 29,73              | 6,632             | 1,473             |
| 90    | 0,1          | 23,24              | 4,672             | 1,146             |
|       | 0,25         | 20,96              | 7,12              | 1,06              |
| 120   | 0,1          | -                  | 5,473             | 1,047             |
|       | 0,25         | -                  | 7,732             | 1,26              |
| Genel |              | 10,17              | 3,31              | 1,461             |

Ortalama sapmalardan da görüleceği gibi sezgisel yöntemler küçük boyutlu problemlerin çoğunda matematiksel modelin bulduğu en iyi sonuca yaklaşmışlardır. Dolayısıyla, önerilen sezgisel yöntemlerin problemin çözümü için makul metotlar olduğu söylenebilir. Bu sezgiseller orta ve büyük boyutlu problemlerde ise matematiksel modelin sonuçlarından daha iyi sonuçlar vermiştir. Üstelik bu sonuçları matematiksel modelin çalışma süresine kıyasla çok daha kısa sürelerde vermişlerdir. Bu nedenle sezgisel yöntemlerin orta ve büyük boyutlu problemlerde matematiksel modele kıyasla daha etkin yöntemler oldukları söylenebilir. Çizelge 9.8’de yöntemlerin ortalama çalışma süreleri (CPU) saniye cinsinden verilmiştir. Küçük boyutlu problemlerin çözümünde ortalama çalışma süresi matematiksel model için 2051,42 saniye iken sezgisel algoritmalarda 2,66 saniyedir. Orta ve büyük boyutlu problemlerde matematiksel model izin verilen 3600 saniyede çalışırken, sezgisel yöntemler matematiksel modelin elde ettiği sonuçlardan daha iyi sonuçlara ortalama 22 saniyede ulaşmıştır.

Çizelge 9.8. Ortalama çözüm süreleri (CPU)

| Problem Boyutu | Matematiksel Model (sn.) | GA & TB (sn.) |
|----------------|--------------------------|---------------|
| Küçük Boyutlu  | 2051,42                  | 2,662         |
| Orta Boyutlu   | 3601,58                  | 10,429        |
| Büyük Boyutlu  | 3603,75                  | 33,58         |



## 10. SONUÇ VE ÖNERİLER

Her sektörde olduğu gibi sağlık sektöründe de yoğun bir rekabet yaşanmaktadır. Bu rekabet tıbbi kuruluşların teknolojik gelişmeleri daha güncel takip etmelerini gerektirmektedir. Çoğu hizmet sektörünün aksine hastaneler hizmet satış fiyatını seçemezler. Bu nedenle maliyeti düşürmek yönetici tarafından kullanılabilir tek parametredir. Kalite standardını sağlayan sağlık hizmetini düşük maliyetlerle sunması gereken hastaneler böylece hem finansal varlıklarını iyileştirmeyi hem de hasta ve personel memnuniyetini sağlamayı amaçlar.

Hastanelerde ameliyathaneler için gerekli kaynaklar, diğer birimler için gereken kaynaklardan daha değerlidir. Aynı zamanda hastanenin darboğazını oluşturan ameliyathanelerde kaynakların verimli kullanılması kaynak maliyetini düşüreceği gibi hizmet gören hasta sayısında da artışı getirecektir.

Bu tez çalışmasında hastaneler için yönetimi en zor birimlerden olan ameliyathanelerin kaynaklarının çizelgelenmesi, gerçek hayatta karşılaşılan problemler göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Biten bir operasyonun ardından yeni bir operasyonun başlayabilmesi için gerekli hazırlık sürelerinin kendisinden önceki operasyona bağımlı olması, çizelgeleme kararları vermenin zorlaşmasına ve operasyonel işlemlerde karışıklığa neden olmaktadır. Hazırlık zamanlarının olması gerekenden az olarak çizelgelenmesi sonraki operasyonların başlangıç sürelerinin sapmasına yani operasyon iptallerine ya da fazla mesailere neden olmaktadır. Hazırlık zamanlarının olması gerekenden fazla şekilde çizelgelenmesi ise ameliyat odalarının boş beklemesine yani hizmet gören hasta sayısının düşmesine ve hastane için gelir kaybına sebebiyet vermektedir.

Bu zorluk ve karmaşayı gidermek amacıyla, bu tez kapsamında bilindiği kadarıyla daha önce literatürde çalışılmamış, hem operasyonların hem de doktorların hazırlık zamanlarının sıra bağımlı olarak göz önünde bulundurulduğu bir problem incelenmiştir. Randevulu hastalar dikkate alınarak, açık çizelgeleme yöntemi ile birden fazla bölümün operasyonları çizelgelenmiştir. Operasyonların oda ve doktorlara ataması yapılmış, sıra bağımlı hazırlık zamanları göz önünde bulundurularak operasyonların başlangıç zamanları bulunmuştur. Problem için geliştirilen matematiksel formülasyon karışık tam sayılı programlama yapısında oluşturularak test problemleri çözülmüştür. Problemin NP-zor yapısından dolayı

matematiksel model küçük boyutlu problemlerde başarılı olmuş ancak orta ve büyük boyutlu problemlerde verdiği sonuçların tatmin edici olmadığı görülmüştür. Bu nedenle orta ve büyük boyutlu problem örneklerinin çözümü için genetik algoritma ve tavlama benzetimi sezgiselleri önerilmiştir. Önerilen sezgisel yöntemler ile elde edilen sonuçlar matematiksel modelin sonuçları ile beraber analiz edilmiştir. Matematiksel modelin optimal sonuçları verdiği küçük boyutlu problemlerde sezgisel yöntemlerin de optimal sonuçları bulması sezgisellerin makul yöntemler olduğunu göstermiş, matematiksel modelin yetersiz kaldığı test problemlerinde genetik algoritma ve tavlama benzetimi yönteminin başarılı sonuçlar elde ettiği görülmüştür. Sezgisel yöntemlerin performansları karşılaştırılmış, küçük boyutlu problemlerde genetik algoritma yönteminin başarılı olduğu ancak test problemlerinin boyutu arttığında tavlama benzetimi yönteminin genetik algoritmaya oranla daha başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Sezgisel yöntemlerin gerçek hayattakine benzer şekilde üretilmiş orta ve büyük boyutlu test problemlerine matematiksel modele kıyasla çok kısa sürelerde uygun çizelgeler oluşturması, problemin gerçek hayatta uygulanabilir olduğunu düşündürmektedir.

Hasta ve personel memnuniyetini ön planda tutması gereken hastanelerin ameliyathane operasyon çizelgelerini oluştururken yaşamakta olduğu sorunlara çözüm yöntemi geliştirmek amacıyla güden bu tez çalışması sonuçlarının hastane yöneticilerine etkin çizelgeler oluşturması, ameliyat gecikme ve iptallerinin önüne geçilmesi böylece hasta ve personel memnuniyetinin artırılması açısından katkı sağlaması amaçlanmıştır. Gelecek çalışmalarda süreçleri, kaynakları ve belirsizliği fazla olan kompleks sisteme sahip hastanelerin gerçek hayattaki problem özelliklerinden daha fazlası dikkate alınarak çözüm yöntemleri geliştirilebilir. Örneğin, problemde göz ardı edilen acil hastaların ve stokastik sürelerin göz önünde bulundurulması ameliyathane çizelgeleme problemlerinin çözülmesine daha geniş kapsamda katkı sağlayacaktır.

## KAYNAKLAR

1. Kılınç, M. (2015). *Sıra bağımlı hazırlık zamanlı paralel makinelerde çizelgeleme: Bir işletme uygulaması*, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri,4.
2. Kaya Yılmaz, B. (2018). *Ekip çizelgeleme probleminde insani faktör etkilerinin incelenmesi ve bir karar destek sistemi önerisi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 12-16.
3. İşler, M.C. (2010). *İmalat sistemlerinde öğrenme etkili akış tipi tam zamanında çizelgeleme probleminin teorik ve uygulamalı incelenmesi*, Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, 3-4.
4. Altındaş, M. (2011). *Üretim çizelgeleme ve bir uygulama*, Yüksek Lisans Tezi, Bozok Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yozgat,11-12.
5. Eren, T. (2004). *Çok ölçütlü akış tipi çizelgeleme problemleri için çözüm yaklaşımları*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-4.
6. Lahijanian, B., Zarandi, M.H.F. and Farahani, F.V. (2016). *Proposing a model for operating room scheduling based on fuzzy surgical duration*. Annual Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society, IEEE, 1-5.
7. Roland, B., Di Martinelly, C. and Riane, F. (2006, October). *Operating theatre optimization: A resource-constrained based solving approach*, International conference on service systems and service management , IEEE, 1, 443-448.
8. Roland, B., Di Martinelly, C., Riane, F. and Pochet, Y. (2010). Scheduling an operating theatre under human resource constraints. *Computers and Industrial Engineering*, 58(2), 212-220.
9. Vali-Siar, M. M., Gholami, S. and Ramezani, R. (2018). Multi-period and multi-resource operating room scheduling under uncertainty: A case study. *Computers and Industrial Engineering*, 126, 549-568.
10. Chaabane, S., Meskens, N., Guinet, A. and Laurent, M. (2008). Comparison of two methods of operating theatre planning: application in Belgian hospital. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 17(2), 171-186.
11. Cardoen, B., Demeulemeester, E. and Beliën, J. (2010). Operating room planning and scheduling: A literature review. *European journal of operational research*, 201(3), 921-932.
12. Liang, F., Guo, Y. and Fung, R. Y. (2015). Simulation-based optimization for surgery scheduling in operation theatre management using response surface method. *Journal of Medical Systems*, 39(11), 159.
13. Erdem, E., Qu, X. and Shi, J. (2012). Rescheduling of elective patients upon the arrival of emergency patients. *Decision Support Systems*, 54(1), 551-563.

14. Dios, M., Molina-Pariente, J. M., Fernandez-Viagas, V., Andrade-Pineda, J. L. and Framinan, J. M. (2015). A decision support system for operating room scheduling. *Computers and Industrial Engineering*, 88, 430-443.
15. Zhao, Z. and Li, X. (2014). Scheduling elective surgeries with sequence-dependent setup times to multiple operating rooms using constraint programming. *Operations Research for Health Care*, 3(3), 160-167.
16. Hooshmand, F., MirHassani, S. A. and Akhavein, A. (2018). Adapting GA to solve a novel model for operating room scheduling problem with endogenous uncertainty. *Operations Research for Health Care*, 19, 26-43.
17. Augusto, V., Xie, X. and Perdomo, V. (2010). Operating theatre scheduling with patient recovery in both operating rooms and recovery beds. *Computers and Industrial Engineering*, 58(2), 231-238.
18. Mateus, C., Marques, I. and Captivo, M. E. (2018). Local search heuristics for a surgical case assignment problem. *Operations Research for Health Care*, 17, 71-81.
19. Lamiri, M. and Xie, X. (2007). Operating room planning with uncertain operating times. *Working paper, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne, France*, 521-526.
20. Lamiri, M., Xie, X., Dolgui, A. and Grimaud, F. (2008). A stochastic model for operating room planning with elective and emergency demand for surgery. *European Journal of Operational Research*, 185(3), 1026-1037.
21. Tànfanì, E. and Testi, A. (2010). A pre-assignment heuristic algorithm for the master surgical schedule problem (MSSP). *Annals of Operations Research*, 178(1), 105-119.
22. Van Essen, J. T., Hans, E. W., Hurink, J. L. and Oversberg, A. (2012). Minimizing the waiting time for emergency surgery. *Operations Research for Health Care*, 1(2-3), 34-44.
23. Arnaout, J. P. (2010). Heuristics for the maximization of operating rooms utilization using simulation. *Simulation*, 86(8-9), 573-583.
24. Testi, A., Tanfani, E. and Torre, G. (2007). A three-phase approach for operating theatre schedules. *Health Care Management Science*, 10(2), 163-172.
25. Santibáñez, P., Begen, M. and Atkins, D. (2007). Surgical block scheduling in a system of hospitals: an application to resource and wait list management in a British Columbia health authority. *Health Care Management Science*, 10(3), 269-282.
26. Kharraja, S., Albert, P. and Chaabane, S. (2006). *Block scheduling: Toward a master surgical schedule*. International Conference on Service Systems and Service Management, 1, 429-435.
27. Fei, H., Meskens, N. and Chu, C. (2006). *An operating theatre planning and scheduling problem in the case of a "block scheduling" strategy*. International Conference on Service Systems and Service Management, 1, 422-428.

28. Yıldırım, E. (2013). *Ameliyathane sistemlerinde sıra bağımlı hazırlık süreli çizelgeleme yaklaşımı*, Doktora Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kütahya, 55-63.
29. Ogulata, S. N. and Erol, R. (2003). A hierarchical multiple criteria mathematical programming approach for scheduling general surgery operations in large hospitals. *Journal of Medical Systems*, 27(3), 259-270.
30. Hanset, A., Meskens, N. and Duvivier, D. (2010). Using constraint programming to schedule an operating theatre. In *2010 IEEE Workshop On Health Care Management*, 1-6.
31. Jebali, A., Alouane, A. B. H. and Ladet, P. (2006). Operating rooms scheduling. *International Journal of Production Economics*, 99(1-2), 52-62.
32. Arnaout, J. P. M. and Kulbashian, S. (2008). *Maximizing the utilization of operating rooms with stochastic times using simulation*. In *Proceedings Of The 40th Conference On Winter simulation Conference*, 1617-1623.
33. Hamid, M., Hamid, M., Musavi, M. and Azadeh, A. (2018). Scheduling elective patients based on sequence-dependent setup times in an open-heart surgical department using an optimization and simulation approach, *Simulation*, 00(0), 1-24.
34. Holmgren, J. and Persson, M. (2016). An optimization model for sequence dependent parallel operating room scheduling. In *Health Care Systems Engineering for Scientists and Practitioners*, Springer, Cham, 41-51.
35. Çekiç, B. (2015). Ameliyathanelerin çizelgelenmesi, bir karışık tamsayılı programlama yaklaşımı. *Verimlilik Dergisi*, 2, 7-28.
36. Pham, D. N. and Klinkert, A. (2008). Surgical case scheduling as a generalized job shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 185(3), 1011-1025.
37. Dexter, F., Traub, R. D. and Macario, A. (2003). How to release allocated operating room time to increase efficiency: predicting which surgical service will have the most underutilized operating room time. *Anesthesia and Analgesia*, 96(2), 507-512.
38. Fei, H., Meskens, N. and Chu, C. (2010). A planning and scheduling problem for an operating theatre using an open scheduling strategy. *Computers and Industrial Engineering*, 58(2), 221-230.
39. Patterson, P. (1996). What makes a well-oiled scheduling system?. *OR manager*, 12(9), 19-23.
40. May, J. H., Spangler, W. E., Strum, D. P. and Vargas, L. G. (2011). The surgical scheduling problem: Current research and future opportunities. *Production and Operations Management*, 20(3), 392-405.
41. Belkhamza, M., Jarboui, B. and Masmoudi, M. (2018). Two metaheuristics for solving no-wait operating room surgery scheduling problem under various resource constraints. *Computers and Industrial Engineering*, 126, 494-506.

42. Dexter, F. and Traub, R. D. (2002). How to schedule elective surgical cases into specific operating rooms to maximize the efficiency of use of operating room time. *Anesthesia and Analgesia*, 94(4), 933-942.
43. Strum, D. P., May, J. H. and Vargas, L. G. (2000). Modeling the uncertainty of surgical procedure times comparison of log-normal and normal models. *Anesthesiology: The Journal of the American Society of Anesthesiologists*, 92(4), 1160-1167.
44. Sel, Ç. (2010). *Bir servisli paralel makinelerde çizelgeleme probleminin genetik algoritma ile çözümü*, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, 12, 31-32.
45. Gür, Ş. (2018). *Hedef programlama ve kısıt programlama ile ameliyathane çizelgeleme problemlerinin çözülmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, 23-50.
46. Marcon, E. and Dexter, F. (2006). Impact of surgical sequencing on post anesthesia care unit staffing. *Health Care Management Science*, 9(1), 87-98.
47. Akgerman, N. (2010). *Binek otomobillerde co2 emisyon miktarının azaltılmasına yönelik stratejilerin analitik ağ süreci bazlı hedef programlama modeli ile değerlendirilmesi*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 37,51.
48. Uludağ, N. (2010). *Bulanık optimizasyon ve doğrusal hedef programlama yaklaşımları ile otobüs hatlarının modellenmesi*, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 45.
49. Alağaç, H., Yüzükırmızı, M. ve Türker, A. (2013). Stokastik montaj hatlarının kısıt programlama ve kapalı kuyruk ağları ile dengelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(2), 231-240.
50. Fei, H., Chu, C., Meskens, N. and Artiba, A. (2008). Solving surgical cases assignment problem by a branch-and-price approach. *International Journal of Production Economics*, 112(1), 96-108.
51. Güden, H. ve Meral, S. (2013). Düzeltmeli tavlama benzetimi ile birinci tipte basit montaj hattı dengeleme: Bir gerçek hayat uygulaması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(4), 897-908.
52. Aladağ, A. (2010). *Tekrar işlemeli esnek atölye tipi çizelgeleme problemi için yapay bağışıklık sistemi ile bir çözüm yaklaşımı*, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 20.
53. Geyik, F. (2000). *Atölye tipi çizelgeleme için uzman tabu arama modeli*, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 54.
54. Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. and Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598), 671-680.

55. Çerçioğlu, H., Özcan, U., Gökçen, H. ve Toklu, B. (2009). Paralel montaj hattı dengeleme problemleri için bir tavlama benzetimi yaklaşımı. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24(2), 331-341.
56. Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. (First edition). Ann Arbor: University of Michigan Press, 1 ,975.
57. Çivril, H. (2009). *Hemşire çizelgeleme problemlerinin genetik algoritma ile çözümü*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 24-36.
58. Başar, A.C. (2019). *Dünyada ve Türkiye'de benzetim kullanım analizi: Türkiye için bir değerlendirme*, Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 4.
59. Güden, H., Vakvak, B., Özkan, B. E., Altıparmak, F. ve Dengiz, B. (2005). Genel amaçlı arama algoritmaları ile benzetim eniyilemesi: En iyi kanban sayısının bulunması. *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 16(1), 2-15.
60. Goldberg, D. E. (1987). Computer-aided gas pipeline operation using genetic algorithms and rule learning, Part I: Genetic algorithms in pipeline optimization. *Engineering with Computers*, 3(1), 35-45.
61. Goldberg, D. E., and Holland, J. H. (1988). Genetic algorithms and machine learning. *Machine learning*, 3(2), 95-99.
62. Körez, M.T. (2005). *Sıralı akış tipi çizelgeleme problemlerinde genetik algoritma uygulaması*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 17-44.
63. Küçük, A. (2016). *Hemşire çizelgeleme problemlerinin genetik algoritmalarla optimizasyonu ve bir uygulama*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir, 32,46.
64. Özsağlam, M. Y. ve Çunkaş, M. (2008). Optimizasyon problemlerinin çözümü için parçaçık sürü optimizasyonu algoritması. *Politeknik Dergisi*, 11(4), 299-305.
65. Kahraman, A. M. ve Özdağlar, D. (2004). Su dağıtım sistemlerinin genetik algoritma ile optimizasyonu. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6(3), 1-18.
66. Biroğul, S. (2008). *GSM şebekelerinde frekans planlamasının veri füzyonu ile gerçekleştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 72-94.
67. Şeker, Ş. (2007). *Araç rotalama problemleri ve zaman pencereli stokastik araç rotalama problemine genetik algoritma yaklaşımı*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 78-95.
68. Kellegöz, T., Toklu, B. and Wilson, J. (2008). Comparing efficiencies of genetic crossover operators for one machine total weighted tardiness problem. *Applied Mathematics and Computation*, 199(2), 590-598.

69. Altıparmak, F. (1996). *Genetik algoritma ile haberleşme şebekelerinin topolojik optimizasyonu*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü , Ankara , 42-54.
70. Taş, O. (2007). *Havayolu şirketlerinde uçuşların atanması probleminin tavlama benzetimi ile çözülmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana , 47-49.
71. Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., Teller, A. H. and Teller, E. (1953). Equation of state calculations by fast computing machines. *The journal of chemical physics*, 21(6), 1087-1092.
72. Akkaş, S. (2016). *Karesel atama probleminin tavlama benzetimi ve paralel programlama teknikleri kullanarak çözümü*, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 11.
73. Öncüer, T. (2012). *Çevrimsel iş gücü çizelgeleme problemlerinin genetik algoritma ve tavlama benzetimi yöntemleriyle çözülmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Havacılık Harp Okulu Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü, Ankara, 29.
74. Çakır, B. (2006). *Stokastik işlem zamanlı montaj hattı dengeleme için tavlama benzetimi algoritması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 21-23.
75. Güner, E. ve Altıparmak, F. (2003). iki ölçütlü tek makinalı çizelgeleme problemi için sezgisel bir yaklaşım. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 18(3), 27-42.
76. Yıldırım, Ş. (2006). *Üretim – dağıtım (lojistik) problemi için bir tavlama benzetimi algoritması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 63.
77. Şahin, R. (2004). *Çok kriterli dinamik tesis düzenleme probleminin tavlama benzetimi ile çözülmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 61.
78. Jünger, M., Reinelt, G. and Rinaldi, G. (1995). The traveling salesman problem. *Handbooks in operations research and management science*, 7, 225-330.
79. Kır, S. (2011). *Sıra bağımlı hazırlık zamanlı tek makineli çizelgeleme problemleri: gıda sektöründe bir uygulama*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 3.
80. Akyol, E. ve Saraç, T. (2017). Paralel makina çizelgeleme problemi için bir karma tamsayı programlama modeli: Ortak kaynak kullanımı. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5(3), 109-126.
81. Kellegöz, T. (2006). *Toplam geç bitirme zamanının en küçüklenmesi performans ölçütlü permütasyon akış tipi çizelgeleme problemlerinin çözümünde genetik algoritma yaklaşımı*, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, 41.

82. Lee, Y. H. and Pinedo, M. (1997). Scheduling jobs on parallel machines with sequence-dependent setup times. *European Journal of Operational Research*, 100(3), 464-474.



## **EKLER**

## EK-1. Test problemlerine ait sonuçlar (Önem faktörü=0,1)

| Problem Karakteristikleri |          |          |           |       | MILP      |       |         | Genetik Algoritma |        |         | Tavlama Benzetimi |        |         | CPU     |         |
|---------------------------|----------|----------|-----------|-------|-----------|-------|---------|-------------------|--------|---------|-------------------|--------|---------|---------|---------|
| <i>n</i>                  | <i>h</i> | <i>o</i> | <i>cv</i> | index | Amaç Fonk | %Gap  | % Sapma | En iyi            | Ort.   | % Sapma | En iyi            | Ort.   | % Sapma | MM      | GA & TB |
| 5                         | 1        | 1        | 0,1       | I1    | 916       | 0,00  | 0,00    | 916               | 916    | 0,00    | 916               | 916    | 0,00    | 0,58    | 1,34    |
| 5                         | 1        | 1        | 0,1       | I2    | 875       | 0,00  | 0,00    | 875               | 875    | 0,00    | 875               | 875    | 0,00    | 0,27    | 1,34    |
| 5                         | 1        | 1        | 0,1       | I3    | 929       | 0,00  | 0,00    | 929               | 929    | 0,00    | 929               | 929    | 0,00    | 0,38    | 1,35    |
| 5                         | 2        | 1        | 0,1       | I1    | 675       | 0,00  | 0,00    | 675               | 675    | 0,00    | 675               | 675    | 0,00    | 0,39    | 1,33    |
| 5                         | 2        | 1        | 0,1       | I2    | 904       | 0,00  | 0,00    | 904               | 904    | 0,00    | 904               | 904    | 0,00    | 0,74    | 1,33    |
| 5                         | 2        | 1        | 0,1       | I3    | 834       | 0,00  | 0,00    | 834               | 834    | 0,00    | 834               | 834    | 0,00    | 0,45    | 1,33    |
| 5                         | 2        | 2        | 0,1       | I1    | 433       | 0,00  | 0,00    | 433               | 433    | 0,00    | 433               | 433    | 0,00    | 0,36    | 1,35    |
| 5                         | 2        | 2        | 0,1       | I2    | 448       | 0,00  | 0,00    | 448               | 448    | 0,00    | 448               | 448    | 0,00    | 0,36    | 1,35    |
| 5                         | 2        | 2        | 0,1       | I3    | 505       | 0,00  | 0,00    | 505               | 505    | 0,00    | 505               | 505    | 0,00    | 0,75    | 1,34    |
| 5                         | 3        | 2        | 0,1       | I1    | 443       | 0,00  | 0,00    | 443               | 443    | 0,00    | 443               | 443    | 0,00    | 0,61    | 1,35    |
| 5                         | 3        | 2        | 0,1       | I2    | 511       | 0,00  | 0,00    | 511               | 511    | 0,00    | 511               | 511    | 0,00    | 0,42    | 1,35    |
| 5                         | 3        | 2        | 0,1       | I3    | 425       | 0,00  | 0,00    | 425               | 425    | 0,00    | 425               | 425    | 0,00    | 0,31    | 1,35    |
| 8                         | 2        | 1        | 0,1       | I1    | 1270      | 0,00  | 0,00    | 1270              | 1274,6 | 0,36    | 1270              | 1271   | 0,08    | 374,47  | 2,18    |
| 8                         | 2        | 1        | 0,1       | I2    | 1720      | 0,00  | 0,00    | 1720              | 1726,8 | 0,39    | 1720              | 1721,6 | 0,09    | 35,05   | 2,24    |
| 8                         | 2        | 1        | 0,1       | I3    | 1362      | 0,00  | 0,00    | 1362              | 1364,2 | 0,16    | 1362              | 1362   | 0,00    | 435,81  | 2,19    |
| 8                         | 3        | 3        | 0,1       | I1    | 450       | 0,00  | 0,00    | 450               | 450,6  | 0,13    | 451               | 451,8  | 0,40    | 16,19   | 2,11    |
| 8                         | 3        | 3        | 0,1       | I2    | 422       | 0,00  | 0,00    | 422               | 431,2  | 2,13    | 426               | 430,4  | 1,95    | 15,66   | 2,10    |
| 8                         | 3        | 3        | 0,1       | I3    | 513       | 0,00  | 0,00    | 513               | 513    | 0,00    | 513               | 514,2  | 0,23    | 132,83  | 2,11    |
| 8                         | 4        | 4        | 0,1       | I1    | 391       | 0,00  | 0,00    | 391               | 399    | 2,01    | 397               | 404    | 3,22    | 27,5    | 2,09    |
| 8                         | 4        | 4        | 0,1       | I2    | 388       | 0,00  | 0,00    | 388               | 388    | 0,00    | 388               | 388    | 0,00    | 66,97   | 2,08    |
| 8                         | 4        | 4        | 0,1       | I3    | 401       | 0,00  | 0,00    | 401               | 401    | 0,00    | 401               | 401    | 0,00    | 5,33    | 2,09    |
| 10                        | 2        | 1        | 0,1       | I1    | 1727      | 22,06 | 0,29    | 1722              | 1732   | 0,58    | 1725              | 1731,8 | 0,57    | 3600,05 | 2,86    |
| 10                        | 2        | 1        | 0,1       | I2    | 2008      | 60,96 | 0,50    | 1998              | 2011,4 | 0,67    | 1998              | 2004,4 | 0,32    | 3600,03 | 2,83    |
| 10                        | 2        | 1        | 0,1       | I3    | 1420      | 80,56 | 1,06    | 1405              | 1412,4 | 0,52    | 1405              | 1409   | 0,28    | 3600,03 | 2,85    |
| 10                        | 3        | 2        | 0,1       | I1    | 1008      | 38,69 | 0,00    | 1008              | 1014,6 | 0,65    | 1020              | 1024   | 1,56    | 3600,06 | 2,84    |
| 10                        | 3        | 2        | 0,1       | I2    | 929       | 10,33 | 0,00    | 943               | 947,6  | 1,96    | 932               | 945,4  | 1,73    | 3600,05 | 2,73    |
| 10                        | 3        | 2        | 0,1       | I3    | 863       | 0,35  | 0,00    | 875               | 878,2  | 1,73    | 877               | 881    | 2,04    | 3600,05 | 2,74    |
| 10                        | 4        | 3        | 0,1       | I1    | 576       | 45,83 | 1,74    | 566               | 574,6  | 1,50    | 576               | 582    | 2,75    | 3600,09 | 2,67    |
| 10                        | 4        | 3        | 0,1       | I2    | 607       | 33,28 | 0,00    | 607               | 613,2  | 1,01    | 613               | 619,8  | 2,07    | 3600,06 | 2,67    |
| 10                        | 4        | 3        | 0,1       | I3    | 505       | 49,90 | 0,20    | 504               | 514    | 1,95    | 513               | 515,2  | 2,17    | 3600,06 | 2,66    |
| 12                        | 2        | 2        | 0,1       | I1    | 1155      | 34,98 | 2,25    | 1129              | 1150,2 | 1,84    | 1139              | 1156,4 | 2,37    | 3600,05 | 3,48    |
| 12                        | 2        | 2        | 0,1       | I2    | 1518      | 34,52 | 6,65    | 1417              | 1430,8 | 0,96    | 1442              | 1452,2 | 2,42    | 3600,05 | 3,50    |
| 12                        | 2        | 2        | 0,1       | I3    | 1159      | 57,20 | 1,21    | 1158              | 1162,4 | 1,50    | 1145              | 1154,2 | 0,80    | 3600,05 | 3,47    |
| 12                        | 3        | 3        | 0,1       | I1    | 644       | 34,63 | 0,00    | 645               | 652,6  | 1,32    | 654               | 663,8  | 2,98    | 3600,06 | 3,26    |
| 12                        | 3        | 3        | 0,1       | I2    | 855       | 45,15 | 0,00    | 865               | 877    | 2,51    | 860               | 876,2  | 2,42    | 3600,05 | 3,30    |
| 12                        | 3        | 3        | 0,1       | I3    | 781       | 66,84 | 2,43    | 762               | 778,4  | 2,11    | 762               | 769,8  | 1,01    | 3600,05 | 3,31    |
| 12                        | 5        | 4        | 0,1       | I1    | 555       | 16,94 | 0,00    | 570               | 574,8  | 3,44    | 566               | 567,6  | 2,22    | 3600,19 | 3,24    |
| 12                        | 5        | 4        | 0,1       | I2    | 577       | 13,69 | 0,00    | 584               | 589,8  | 2,17    | 583               | 592    | 2,53    | 3600,05 | 3,21    |
| 12                        | 5        | 4        | 0,1       | I3    | 512       | 40,43 | 0,20    | 511               | 520,8  | 1,88    | 516               | 521,4  | 1,99    | 3600,06 | 3,21    |
| 15                        | 3        | 2        | 0,1       | I1    | 1155      | 76,36 | 4,16    | 1107              | 1110,4 | 0,31    | 1113              | 1121,6 | 1,30    | 3600,05 | 4,44    |
| 15                        | 3        | 2        | 0,1       | I2    | 1530      | 77,58 | 1,83    | 1502              | 1513,6 | 0,77    | 1504              | 1523,4 | 1,40    | 3600,05 | 4,43    |
| 15                        | 3        | 2        | 0,1       | I3    | 1312      | 81,02 | 3,05    | 1272              | 1279   | 0,55    | 1281              | 1290   | 1,40    | 3600,05 | 4,36    |
| 15                        | 4        | 3        | 0,1       | I1    | 919       | 69,42 | 0,65    | 913               | 919,8  | 0,74    | 927               | 932,6  | 2,10    | 3600,09 | 4,16    |
| 15                        | 4        | 3        | 0,1       | I2    | 932       | 57,94 | 1,50    | 922               | 929,6  | 1,25    | 918               | 931    | 1,40    | 3600,08 | 4,15    |
| 15                        | 4        | 3        | 0,1       | I3    | 906       | 65,78 | 0,55    | 901               | 910    | 0,99    | 910               | 913,6  | 1,38    | 3600,11 | 4,16    |
| 15                        | 6        | 5        | 0,1       | I1    | 556       | 49,82 | 0,00    | 566               | 578,4  | 3,87    | 567               | 574,4  | 3,20    | 3600,11 | 4,02    |
| 15                        | 6        | 5        | 0,1       | I2    | 553       | 39,06 | 0,00    | 563               | 570,8  | 3,12    | 571               | 575,2  | 3,86    | 3600,19 | 4,01    |
| 15                        | 6        | 5        | 0,1       | I3    | 514       | 25,49 | 0,97    | 514               | 521    | 2,30    | 509               | 520,4  | 2,19    | 3600,09 | 4,01    |
| 20                        | 3        | 2        | 0,1       | I1    | 1819      | 83,78 | 5,22    | 1724              | 1749   | 1,43    | 1730              | 1744,6 | 1,18    | 3600,08 | 6,24    |
| 20                        | 3        | 2        | 0,1       | I2    | 2016      | 83,63 | 17,81   | 1657              | 1672   | 0,90    | 1667              | 1686,8 | 1,77    | 3600,08 | 6,24    |
| 20                        | 3        | 2        | 0,1       | I3    | 1803      | 86,47 | 1,55    | 1775              | 1788,2 | 0,74    | 1789              | 1800,4 | 1,41    | 3600,11 | 6,24    |
| 20                        | 5        | 4        | 0,1       | I1    | 877       | 71,61 | 1,71    | 863               | 869,4  | 0,85    | 862               | 867,8  | 0,67    | 3600,16 | 5,76    |
| 20                        | 5        | 4        | 0,1       | I2    | 890       | 74,61 | 3,48    | 869               | 880,2  | 2,41    | 859               | 884,4  | 2,87    | 3600,14 | 5,74    |
| 20                        | 5        | 4        | 0,1       | I3    | 869       | 62,60 | 1,73    | 854               | 873,8  | 2,27    | 867               | 881,8  | 3,15    | 3600,14 | 5,75    |
| 20                        | 7        | 6        | 0,1       | I1    | 678       | 62,68 | 7,23    | 629               | 646    | 2,63    | 648               | 652    | 3,53    | 3600,17 | 5,58    |
| 20                        | 7        | 6        | 0,1       | I2    | 621       | 47,67 | 3,86    | 597               | 614,4  | 2,83    | 610               | 616,2  | 3,12    | 3600,17 | 5,59    |
| 20                        | 7        | 6        | 0,1       | I3    | 551       | 51,36 | 0,00    | 559               | 577,2  | 4,54    | 556               | 562,6  | 2,06    | 3600,19 | 5,59    |
| 25                        | 4        | 3        | 0,1       | I1    | 1708      | 84,31 | 6,32    | 1610              | 1618,4 | 1,14    | 1600              | 1624,8 | 1,53    | 3600,19 | 7,84    |
| 25                        | 4        | 3        | 0,1       | I2    | 1628      | 75,25 | 5,34    | 1554              | 1574,4 | 2,12    | 1541              | 1568,6 | 1,76    | 3600,19 | 7,85    |
| 25                        | 4        | 3        | 0,1       | I3    | 1534      | 77,57 | 6,45    | 1435              | 1461,2 | 1,79    | 1461              | 1470,2 | 2,39    | 3600,2  | 7,87    |
| 25                        | 7        | 5        | 0,1       | I1    | 949       | 71,34 | 5,69    | 901               | 910,4  | 1,69    | 895               | 904    | 1,00    | 3600,34 | 7,33    |
| 25                        | 7        | 5        | 0,1       | I2    | 977       | 69,60 | 3,28    | 945               | 964,2  | 1,99    | 947               | 958,2  | 1,38    | 3600,28 | 7,34    |
| 25                        | 7        | 5        | 0,1       | I3    | 818       | 73,11 | 5,26    | 775               | 782,2  | 0,92    | 780               | 787,4  | 1,57    | 3600,3  | 7,34    |
| 25                        | 9        | 8        | 0,1       | I1    | 667       | 40,18 | 9,00    | 613               | 621,6  | 2,35    | 607               | 609,2  | 0,36    | 3600,48 | 7,11    |
| 25                        | 9        | 8        | 0,1       | I2    | 650       | 62,62 | 2,15    | 636               | 651,4  | 2,36    | 644               | 649    | 2,00    | 3600,45 | 7,09    |

## EK-1. (devam) Test problemlerine ait sonuçlar (Önem faktörü=0,1)

| Problem Karakteristikleri |          |          |           |       | MILP      |       |         | Genetik Algoritma |        |         | Tavlama Benzetimi |        |         | CPU     |         |
|---------------------------|----------|----------|-----------|-------|-----------|-------|---------|-------------------|--------|---------|-------------------|--------|---------|---------|---------|
| <i>n</i>                  | <i>h</i> | <i>o</i> | <i>cv</i> | index | Amaç Fonk | %Gap  | % Sapma | En iyi            | Ort.   | % Sapma | En iyi            | Ort.   | % Sapma | MM      | GA & TB |
| 25                        | 9        | 8        | 0,1       | I3    | 620       | 58,87 | 2,58    | 604               | 623,8  | 3,17    | 606               | 610,6  | 1,08    | 3600,53 | 7,13    |
| 30                        | 5        | 3        | 0,1       | I1    | 2027      | 85,45 | 14,21   | 1749              | 1762   | 1,31    | 1739              | 1752,8 | 0,79    | 3612,72 | 9,59    |
| 30                        | 5        | 3        | 0,1       | I2    | 2048      | 81,54 | 3,56    | 1987              | 1990,8 | 0,79    | 1975              | 1993,2 | 0,91    | 3600,33 | 9,57    |
| 30                        | 5        | 3        | 0,1       | I3    | 1820      | 83,63 | 3,79    | 1757              | 1783,4 | 1,82    | 1751              | 1761,8 | 0,61    | 3600,36 | 9,59    |
| 30                        | 8        | 6        | 0,1       | I1    | 990       | 72,42 | 3,94    | 957               | 966    | 1,55    | 951               | 964,4  | 1,39    | 3600,66 | 8,88    |
| 30                        | 8        | 6        | 0,1       | I2    | 968       | 66,63 | 5,99    | 910               | 921,6  | 1,26    | 927               | 934,8  | 2,65    | 3600,63 | 8,89    |
| 30                        | 8        | 6        | 0,1       | I3    | 934       | 58,67 | 7,82    | 874               | 883,8  | 2,58    | 861               | 870,6  | 1,10    | 3600,66 | 8,88    |
| 30                        | 11       | 9        | 0,1       | I1    | 665       | 46,77 | 8,87    | 623               | 630,6  | 3,90    | 606               | 614    | 1,30    | 3600,8  | 8,65    |
| 30                        | 11       | 9        | 0,1       | I2    | 640       | 57,34 | 8,75    | 604               | 614,2  | 4,92    | 584               | 596,2  | 2,05    | 3600,81 | 8,65    |
| 30                        | 11       | 9        | 0,1       | I3    | 621       | 57,97 | 9,98    | 560               | 577,6  | 3,22    | 559               | 565    | 1,06    | 3600,86 | 8,64    |
| 35                        | 6        | 4        | 0,1       | I1    | 1770      | 82,71 | 7,85    | 1659              | 1671,2 | 2,41    | 1631              | 1649   | 1,09    | 3600,72 | 11,37   |
| 35                        | 6        | 4        | 0,1       | I2    | 1718      | 82,31 | 3,26    | 1662              | 1677,2 | 0,91    | 1668              | 1678,8 | 1,00    | 3600,72 | 11,37   |
| 35                        | 6        | 4        | 0,1       | I3    | 1785      | 76,53 | 8,91    | 1637              | 1655,2 | 1,76    | 1626              | 1641   | 0,91    | 3600,7  | 11,37   |
| 35                        | 9        | 7        | 0,1       | I1    | 1011      | 67,26 | 8,41    | 939               | 946,4  | 2,16    | 926               | 932,2  | 0,67    | 3601,06 | 10,69   |
| 35                        | 9        | 7        | 0,1       | I2    | 1053      | 72,27 | 7,41    | 987               | 992,8  | 1,79    | 975               | 991    | 1,61    | 3601,08 | 10,70   |
| 35                        | 9        | 7        | 0,1       | I3    | 1058      | 65,69 | 16,35   | 887               | 904    | 2,10    | 885               | 899,4  | 1,60    | 3601,08 | 10,68   |
| 35                        | 13       | 11       | 0,1       | I1    | 737       | 45,45 | 15,88   | 620               | 640    | 3,13    | 626               | 628,2  | 1,31    | 3601,78 | 10,55   |
| 35                        | 13       | 11       | 0,1       | I2    | 795       | 56,35 | 17,48   | 672               | 688    | 4,65    | 656               | 662,4  | 0,97    | 3601,59 | 10,54   |
| 35                        | 13       | 11       | 0,1       | I3    | 858       | 57,69 | 25,41   | 650               | 666,6  | 3,99    | 640               | 647    | 1,08    | 3601,77 | 10,53   |
| 40                        | 6        | 4        | 0,1       | I1    | 1731      | 83,88 | 5,72    | 1645              | 1656,4 | 1,47    | 1632              | 1649,2 | 1,04    | 3601,02 | 13,63   |
| 40                        | 6        | 4        | 0,1       | I2    | 2024      | 81,87 | 9,88    | 1845              | 1859,8 | 1,92    | 1824              | 1844   | 1,08    | 3601,03 | 13,64   |
| 40                        | 6        | 4        | 0,1       | I3    | 1896      | 84,18 | 8,91    | 1753              | 1763   | 2,04    | 1727              | 1737,4 | 0,60    | 3601,08 | 13,60   |
| 40                        | 10       | 8        | 0,1       | I1    | 1143      | 71,04 | 22,57   | 885               | 914,4  | 3,22    | 896               | 905,2  | 2,23    | 3602,02 | 12,59   |
| 40                        | 10       | 8        | 0,1       | I2    | 1126      | 58,08 | 14,12   | 967               | 992,8  | 2,60    | 975               | 983    | 1,63    | 3602,24 | 12,67   |
| 40                        | 10       | 8        | 0,1       | I3    | 1215      | 70,86 | 23,29   | 935               | 955,2  | 2,43    | 932               | 937,8  | 0,62    | 3601,84 | 12,66   |
| 40                        | 14       | 12       | 0,1       | I1    | 844       | 70,85 | 27,96   | 632               | 642,4  | 5,35    | 608               | 613,6  | 0,91    | 3602,63 | 12,66   |
| 40                        | 14       | 12       | 0,1       | I2    | 919       | 61,37 | 26,88   | 688               | 697,6  | 3,67    | 672               | 677,2  | 0,77    | 3602,41 | 12,65   |
| 40                        | 14       | 12       | 0,1       | I3    | 791       | 61,19 | 20,48   | 642               | 661,6  | 4,93    | 629               | 638,8  | 1,53    | 3602,63 | 12,63   |
| 50                        | 8        | 5        | 0,1       | I1    | 2144      | 84,47 | 17,02   | 1797              | 1814,4 | 1,95    | 1779              | 1780,8 | 0,10    | 3602,55 | 17,50   |
| 50                        | 8        | 5        | 0,1       | I2    | 2242      | 83,81 | 22,26   | 1743              | 1764,4 | 1,21    | 1748              | 1751,4 | 0,48    | 3602,73 | 17,48   |
| 50                        | 8        | 5        | 0,1       | I3    | 2051      | 85,47 | 9,17    | 1866              | 1902   | 2,05    | 1863              | 1873,2 | 0,54    | 3602,44 | 17,49   |
| 50                        | 13       | 10       | 0,1       | I1    | 1202      | 72,46 | 26,62   | 905               | 910,2  | 3,10    | 882               | 892,6  | 1,19    | 3604,63 | 16,48   |
| 50                        | 13       | 10       | 0,1       | I2    | 1248      | 74,04 | 26,04   | 944               | 954,4  | 3,29    | 923               | 933    | 1,07    | 3604,5  | 16,49   |
| 50                        | 13       | 10       | 0,1       | I3    | 1200      | 73,25 | 29,08   | 856               | 880,8  | 3,38    | 851               | 860,8  | 1,14    | 3604,08 | 16,51   |
| 50                        | 18       | 15       | 0,1       | I1    | 772       | 69,43 | 24,35   | 593               | 598,6  | 2,44    | 584               | 587,8  | 0,65    | 3606    | 16,58   |
| 50                        | 18       | 15       | 0,1       | I2    | 811       | 57,58 | 18,50   | 685               | 706    | 6,37    | 661               | 667,8  | 1,02    | 3607,59 | 16,59   |
| 50                        | 18       | 15       | 0,1       | I3    | 865       | 64,62 | 21,85   | 702               | 706,6  | 4,33    | 676               | 687,6  | 1,69    | 3606,09 | 16,57   |
| 60                        | 9        | 6        | 0,1       | I1    | 2511      | 86,34 | 26,84   | 1864              | 1870,2 | 1,78    | 1837              | 1853,6 | 0,90    | 3604,91 | 22,09   |
| 60                        | 9        | 6        | 0,1       | I2    | 2222      | 85,06 | 18,41   | 1825              | 1853,6 | 2,19    | 1813              | 1818,6 | 0,31    | 3605,05 | 22,11   |
| 60                        | 9        | 6        | 0,1       | I3    | 2019      | 81,43 | 2,13    | 2014              | 2022,8 | 2,31    | 1976              | 1984,6 | 0,43    | 3604,94 | 22,10   |
| 60                        | 15       | 12       | 0,1       | I1    | 1184      | 69,68 | 19,76   | 981               | 986,4  | 3,69    | 950               | 961,8  | 1,23    | 3612,24 | 21,34   |
| 60                        | 15       | 12       | 0,1       | I2    | 1272      | 75,31 | 25,94   | 968               | 980,2  | 3,90    | 942               | 955    | 1,36    | 3610,42 | 21,35   |
| 60                        | 15       | 12       | 0,1       | I3    | 1272      | 74,84 | 24,29   | 980               | 993,8  | 3,10    | 963               | 970,4  | 0,76    | 3613,89 | 21,34   |
| 60                        | 21       | 18       | 0,1       | I1    | 937       | 59,34 | 26,15   | 714               | 721,4  | 4,08    | 692               | 695    | 0,43    | 3609,91 | 21,10   |
| 60                        | 21       | 18       | 0,1       | I2    | 905       | 56,91 | 26,74   | 697               | 702    | 5,56    | 663               | 670    | 1,04    | 3606,03 | 21,07   |
| 60                        | 21       | 18       | 0,1       | I3    | 1080      | 71,20 | 37,78   | 695               | 711,4  | 5,54    | 672               | 679,8  | 1,15    | 3614,66 | 21,15   |
| 75                        | 12       | 8        | 0,1       | I1    | 2157      | 86,28 | 19,84   | 1752              | 1770,8 | 2,36    | 1729              | 1737,4 | 0,48    | 3611    | 29,77   |
| 75                        | 12       | 8        | 0,1       | I2    | 2265      | 84,81 | 21,99   | 1823              | 1840,8 | 4,01    | 1767              | 1788,8 | 1,22    | 3608,58 | 29,78   |
| 75                        | 12       | 8        | 0,1       | I3    | 2208      | 82,16 | 19,34   | 1826              | 1841,2 | 3,27    | 1781              | 1801   | 1,11    | 3608,78 | 29,78   |
| 75                        | 19       | 15       | 0,1       | I1    | 1338      | 78,55 | 28,77   | 989               | 1002,8 | 4,97    | 953               | 962,4  | 0,98    | 3614,45 | 29,11   |
| 75                        | 19       | 15       | 0,1       | I2    | 1316      | 73,25 | 24,24   | 1026              | 1053,6 | 5,37    | 997               | 1003,2 | 0,62    | 3619,97 | 29,26   |
| 75                        | 19       | 15       | 0,1       | I3    | 1321      | 77,97 | 28,46   | 977               | 990    | 4,55    | 945               | 954,6  | 1,01    | 3614,66 | 29,12   |
| 75                        | 27       | 23       | 0,1       | I1    |           |       |         | 663               | 672    | 5,21    | 637               | 640,6  | 0,56    |         | 28,22   |
| 75                        | 27       | 23       | 0,1       | I2    |           |       |         | 639               | 654,4  | 5,87    | 616               | 625,8  | 1,57    |         | 28,27   |
| 75                        | 27       | 23       | 0,1       | I3    |           |       |         | 632               | 646,2  | 4,83    | 615               | 622,2  | 1,16    |         | 28,29   |
| 90                        | 14       | 9        | 0,1       | I1    | 2379      | 86,30 | 19,97   | 1955              | 1966,8 | 3,19    | 1904              | 1916,6 | 0,66    | 3613,61 | 36,46   |
| 90                        | 14       | 9        | 0,1       | I2    | 2183      | 83,74 | 24,37   | 1673              | 1691,8 | 2,41    | 1651              | 1665,4 | 0,86    | 3606,66 | 36,46   |
| 90                        | 14       | 9        | 0,1       | I3    | 2309      | 86,62 | 25,38   | 1755              | 1765,2 | 2,39    | 1723              | 1739,8 | 0,97    | 3617,67 | 36,43   |
| 90                        | 23       | 18       | 0,1       | I1    |           |       |         | 971               | 983,8  | 4,55    | 939               | 951,2  | 1,28    |         | 35,24   |
| 90                        | 23       | 18       | 0,1       | I2    |           |       |         | 948               | 950,8  | 4,29    | 910               | 919,4  | 1,02    |         | 35,23   |
| 90                        | 23       | 18       | 0,1       | I3    |           |       |         | 993               | 1011,8 | 4,33    | 968               | 977,6  | 0,98    |         | 35,26   |
| 90                        | 32       | 27       | 0,1       | I1    |           |       |         | 681               | 715,8  | 6,40    | 670               | 679,4  | 1,38    |         | 34,02   |
| 90                        | 32       | 27       | 0,1       | I2    |           |       |         | 712               | 723,4  | 6,55    | 676               | 683    | 1,02    |         | 34,02   |
| 90                        | 32       | 27       | 0,1       | I3    |           |       |         | 665               | 698,4  | 7,93    | 643               | 657    | 2,13    |         | 34,02   |

## EK-1. (devam) Test problemlerine ait sonuçlar (Önem faktörü=0,1)

| Problem Karakteristikleri |     |     |      |       | MILP      |      |         | Genetik Algoritma |        |         | Tavlama Benzetimi |        |         | CPU |         |
|---------------------------|-----|-----|------|-------|-----------|------|---------|-------------------|--------|---------|-------------------|--------|---------|-----|---------|
| $n$                       | $h$ | $o$ | $cv$ | index | Amaç Fonk | %Gap | % Sapma | En iyi            | Ort.   | % Sapma | En iyi            | Ort.   | % Sapma | MM  | GA & TB |
| 120                       | 18  | 12  | 0,1  | I1    |           |      |         | 1888              | 1908,8 | 3,29    | 1846              | 1859,2 | 0,71    |     | 53,14   |
| 120                       | 18  | 12  | 0,1  | I2    |           |      |         | 1897              | 1928,8 | 4,40    | 1844              | 1861,6 | 0,95    |     | 53,06   |
| 120                       | 18  | 12  | 0,1  | I3    |           |      |         | 1975              | 1991,2 | 3,12    | 1929              | 1947,8 | 0,97    |     | 53,09   |
| 120                       | 30  | 24  | 0,1  | I1    |           |      |         | 976               | 999    | 6,61    | 933               | 945,6  | 1,33    |     | 49,65   |
| 120                       | 30  | 24  | 0,1  | I2    |           |      |         | 1012              | 1017,4 | 4,56    | 971               | 976,6  | 0,57    |     | 49,63   |
| 120                       | 30  | 24  | 0,1  | I3    |           |      |         | 1025              | 1030   | 3,79    | 991               | 997,8  | 0,68    |     | 49,68   |
| 120                       | 42  | 36  | 0,1  | I1    |           |      |         | 733               | 751,8  | 7,42    | 696               | 703,8  | 1,11    |     | 47,77   |
| 120                       | 42  | 36  | 0,1  | I2    |           |      |         | 730               | 740,6  | 7,37    | 686               | 697,2  | 1,61    |     | 47,79   |
| 120                       | 42  | 36  | 0,1  | I3    |           |      |         | 704               | 717,4  | 8,70    | 655               | 665    | 1,50    |     | 48,40   |

## EK-2. Test problemlerine ait sonuçlar (Önem faktörü=0,25)

| Problem Karakteristikleri |          |          |           |       | MILP      |       |         | Genetik Algoritma |        |         | Tavlama Benzetimi |        |         | CPU     |         |
|---------------------------|----------|----------|-----------|-------|-----------|-------|---------|-------------------|--------|---------|-------------------|--------|---------|---------|---------|
| <i>n</i>                  | <i>h</i> | <i>o</i> | <i>cv</i> | index | Amaç Fonk | %Gap  | % Sapma | En iyi            | Ort.   | % Sapma | En iyi            | Ort.   | % Sapma | MM      | GA & TB |
| 5                         | 1        | 1        | 0,25      | I1    | 880       | 0,00  | 0,00    | 880               | 880    | 0,00    | 880               | 880    | 0,00    | 0,23    | 1,34    |
| 5                         | 1        | 1        | 0,25      | I2    | 931       | 0,00  | 0,00    | 931               | 931    | 0,00    | 931               | 931    | 0,00    | 0,39    | 1,35    |
| 5                         | 1        | 1        | 0,25      | I3    | 872       | 0,00  | 0,00    | 872               | 872    | 0,00    | 872               | 872    | 0,00    | 0,3     | 1,34    |
| 5                         | 2        | 1        | 0,25      | I1    | 1422      | 0,00  | 0,00    | 1422              | 1422   | 0,00    | 1422              | 1422   | 0,00    | 0,59    | 1,34    |
| 5                         | 2        | 1        | 0,25      | I2    | 1043      | 0,00  | 0,00    | 1043              | 1043   | 0,00    | 1043              | 1043   | 0,00    | 0,48    | 1,33    |
| 5                         | 2        | 1        | 0,25      | I3    | 789       | 0,00  | 0,00    | 789               | 789    | 0,00    | 789               | 789    | 0,00    | 0,19    | 1,33    |
| 5                         | 2        | 2        | 0,25      | I1    | 637       | 0,00  | 0,00    | 637               | 637    | 0,00    | 637               | 637    | 0,00    | 0,67    | 1,35    |
| 5                         | 2        | 2        | 0,25      | I2    | 597       | 0,00  | 0,00    | 597               | 597    | 0,00    | 597               | 597    | 0,00    | 0,25    | 1,34    |
| 5                         | 2        | 2        | 0,25      | I3    | 483       | 0,00  | 0,00    | 483               | 483    | 0,00    | 483               | 483    | 0,00    | 0,34    | 1,35    |
| 5                         | 3        | 2        | 0,25      | I1    | 470       | 0,00  | 0,00    | 470               | 470    | 0,00    | 470               | 470    | 0,00    | 0,42    | 1,36    |
| 5                         | 3        | 2        | 0,25      | I2    | 624       | 0,00  | 0,00    | 624               | 624    | 0,00    | 624               | 624    | 0,00    | 0,27    | 1,35    |
| 5                         | 3        | 2        | 0,25      | I3    | 566       | 0,00  | 0,00    | 566               | 566    | 0,00    | 566               | 566    | 0,00    | 0,28    | 1,34    |
| 8                         | 2        | 1        | 0,25      | I1    | 1174      | 0,00  | 0,00    | 1174              | 1187,2 | 1,11    | 1174              | 1174   | 0,00    | 276,38  | 2,16    |
| 8                         | 2        | 1        | 0,25      | I2    | 1486      | 0,00  | 0,00    | 1486              | 1490   | 0,27    | 1486              | 1486   | 0,00    | 661,45  | 2,19    |
| 8                         | 2        | 1        | 0,25      | I3    | 1472      | 0,00  | 0,00    | 1472              | 1480,8 | 0,59    | 1472              | 1475   | 0,20    | 41,34   | 2,18    |
| 8                         | 3        | 3        | 0,25      | I1    | 686       | 0,00  | 0,00    | 686               | 686    | 0,00    | 686               | 686    | 0,00    | 48,59   | 2,11    |
| 8                         | 3        | 3        | 0,25      | I2    | 667       | 0,00  | 0,00    | 668               | 677,8  | 1,59    | 669               | 677,6  | 1,56    | 11,5    | 2,12    |
| 8                         | 3        | 3        | 0,25      | I3    | 617       | 0,00  | 0,00    | 617               | 617    | 0,00    | 617               | 617    | 0,00    | 14,72   | 2,10    |
| 8                         | 4        | 4        | 0,25      | I1    | 375       | 0,00  | 0,00    | 375               | 381    | 1,57    | 377               | 383,4  | 2,19    | 19,72   | 2,10    |
| 8                         | 4        | 4        | 0,25      | I2    | 570       | 0,00  | 0,00    | 593               | 593    | 3,88    | 570               | 573,4  | 0,59    | 37,3    | 2,09    |
| 8                         | 4        | 4        | 0,25      | I3    | 553       | 0,00  | 0,00    | 553               | 570,2  | 3,02    | 553               | 566,2  | 2,33    | 213,66  | 2,10    |
| 10                        | 2        | 1        | 0,25      | I1    | 2158      | 55,51 | 24,33   | 1633              | 1646,6 | 0,83    | 1633              | 1641   | 0,49    | 3600,08 | 2,82    |
| 10                        | 2        | 1        | 0,25      | I2    | 1901      | 80,85 | 1,95    | 1893              | 1898   | 1,79    | 1864              | 1884,4 | 1,08    | 3600,06 | 2,84    |
| 10                        | 2        | 1        | 0,25      | I3    | 2095      | 25,63 | 0,14    | 2095              | 2112,8 | 0,98    | 2092              | 2104   | 0,57    | 3600,13 | 2,84    |
| 10                        | 3        | 2        | 0,25      | I1    | 952       | 45,59 | 0,42    | 949               | 962    | 1,46    | 948               | 963,2  | 1,58    | 3600,03 | 2,76    |
| 10                        | 3        | 2        | 0,25      | I2    | 991       | 50,25 | 1,61    | 975               | 989    | 1,42    | 983               | 996    | 2,11    | 3600,03 | 2,73    |
| 10                        | 3        | 2        | 0,25      | I3    | 940       | 33,94 | 0,00    | 951               | 961,2  | 2,21    | 941               | 960    | 2,08    | 3600,05 | 2,72    |
| 10                        | 4        | 3        | 0,25      | I1    | 598       | 0,50  | 0,00    | 614               | 619,2  | 3,42    | 619               | 624,2  | 4,20    | 3600,03 | 2,70    |
| 10                        | 4        | 3        | 0,25      | I2    | 766       | 11,75 | 0,00    | 766               | 792,6  | 3,36    | 805               | 814,4  | 5,94    | 3600,05 | 2,65    |
| 10                        | 4        | 3        | 0,25      | I3    | 675       | 34,52 | 1,19    | 667               | 672    | 0,74    | 675               | 683,4  | 2,40    | 3600,03 | 2,67    |
| 12                        | 2        | 2        | 0,25      | I1    | 1296      | 37,50 | 2,55    | 1263              | 1285   | 1,71    | 1280              | 1282,8 | 1,54    | 3600,06 | 3,40    |
| 12                        | 2        | 2        | 0,25      | I2    | 1265      | 70,51 | 1,11    | 1251              | 1288,4 | 2,90    | 1274              | 1300,8 | 3,83    | 3600,06 | 3,49    |
| 12                        | 2        | 2        | 0,25      | I3    | 1246      | 65,33 | 2,89    | 1210              | 1245,6 | 2,86    | 1245              | 1250   | 3,20    | 3600,03 | 3,43    |
| 12                        | 3        | 3        | 0,25      | I1    | 888       | 31,19 | 0,00    | 889               | 915    | 2,95    | 904               | 913,2  | 2,76    | 3600,05 | 3,27    |
| 12                        | 3        | 3        | 0,25      | I2    | 837       | 38,23 | 0,00    | 859               | 877,8  | 4,65    | 879               | 897,4  | 6,73    | 3600,05 | 3,24    |
| 12                        | 3        | 3        | 0,25      | I3    | 777       | 60,88 | 1,42    | 766               | 782,6  | 2,12    | 777               | 798,8  | 4,11    | 3600,06 | 3,28    |
| 12                        | 5        | 4        | 0,25      | I1    | 562       | 47,69 | 0,00    | 582               | 612    | 8,17    | 602               | 619,2  | 9,24    | 3600,06 | 3,23    |
| 12                        | 5        | 4        | 0,25      | I2    | 526       | 50,00 | 5,51    | 498               | 516,8  | 3,83    | 497               | 506    | 1,78    | 3600,05 | 3,11    |
| 12                        | 5        | 4        | 0,25      | I3    | 675       | 48,59 | 3,85    | 649               | 667,2  | 2,73    | 663               | 671,4  | 3,34    | 3600,08 | 3,16    |
| 15                        | 3        | 2        | 0,25      | I1    | 1343      | 81,76 | 3,57    | 1295              | 1337,8 | 3,20    | 1307              | 1330   | 2,63    | 3600,08 | 4,43    |
| 15                        | 3        | 2        | 0,25      | I2    | 1287      | 79,10 | 6,92    | 1198              | 1217   | 1,56    | 1213              | 1225   | 2,20    | 3600,05 | 4,37    |
| 15                        | 3        | 2        | 0,25      | I3    | 1675      | 73,19 | 4,06    | 1607              | 1626,8 | 1,22    | 1620              | 1650,2 | 2,62    | 3600,05 | 4,40    |
| 15                        | 4        | 3        | 0,25      | I1    | 1030      | 44,27 | 4,27    | 986               | 1011   | 2,47    | 1006              | 1023,2 | 3,64    | 3600,08 | 4,19    |
| 15                        | 4        | 3        | 0,25      | I2    | 864       | 74,42 | 0,58    | 859               | 885,6  | 3,00    | 869               | 888,8  | 3,35    | 3600,05 | 4,16    |
| 15                        | 4        | 3        | 0,25      | I3    | 982       | 39,82 | 5,50    | 928               | 949    | 2,21    | 964               | 973,2  | 4,64    | 3600,08 | 4,16    |
| 15                        | 6        | 5        | 0,25      | I1    | 705       | 44,54 | 0,43    | 715               | 736,8  | 4,72    | 702               | 722,4  | 2,82    | 3600,13 | 4,05    |
| 15                        | 6        | 5        | 0,25      | I2    | 676       | 51,78 | 5,92    | 636               | 671,6  | 5,30    | 659               | 675,2  | 5,81    | 3600,11 | 4,03    |
| 15                        | 6        | 5        | 0,25      | I3    | 638       | 55,96 | 2,66    | 624               | 642,4  | 3,33    | 621               | 631    | 1,58    | 3600,11 | 4,03    |
| 20                        | 3        | 2        | 0,25      | I1    | 2095      | 76,66 | 6,49    | 1959              | 1998,8 | 1,99    | 1981              | 1998,8 | 1,99    | 3600,08 | 6,20    |
| 20                        | 3        | 2        | 0,25      | I2    | 1764      | 83,16 | 5,05    | 1687              | 1709,2 | 2,00    | 1675              | 1708,4 | 1,96    | 3600,09 | 6,22    |
| 20                        | 3        | 2        | 0,25      | I3    | 2116      | 86,48 | 6,43    | 1980              | 2002,4 | 1,12    | 2028              | 2034,2 | 2,66    | 3600,09 | 6,21    |
| 20                        | 5        | 4        | 0,25      | I1    | 1034      | 66,25 | 4,06    | 992               | 1004,6 | 1,25    | 1007              | 1026,4 | 3,35    | 3600,14 | 5,76    |
| 20                        | 5        | 4        | 0,25      | I2    | 1076      | 76,12 | 7,43    | 1035              | 1048,8 | 5,03    | 996               | 1033   | 3,58    | 3600,16 | 5,76    |
| 20                        | 5        | 4        | 0,25      | I3    | 988       | 75,91 | 4,55    | 943               | 948,8  | 0,61    | 944               | 962,6  | 2,04    | 3600,14 | 5,73    |
| 20                        | 7        | 6        | 0,25      | I1    | 686       | 58,89 | 4,08    | 664               | 686,4  | 4,14    | 658               | 674,6  | 2,46    | 3600,19 | 5,57    |
| 20                        | 7        | 6        | 0,25      | I2    | 720       | 55,69 | 4,17    | 690               | 716,8  | 3,74    | 692               | 702,2  | 1,74    | 3600,23 | 5,58    |
| 20                        | 7        | 6        | 0,25      | I3    | 736       | 57,47 | 8,02    | 698               | 710,2  | 4,67    | 677               | 695,2  | 2,62    | 3600,19 | 5,57    |
| 25                        | 4        | 3        | 0,25      | I1    | 1552      | 80,22 | 5,80    | 1472              | 1504,4 | 2,82    | 1462              | 1483   | 1,42    | 3600,22 | 7,70    |
| 25                        | 4        | 3        | 0,25      | I2    | 2110      | 79,95 | 8,29    | 1935              | 1982,2 | 2,38    | 1953              | 1975,2 | 2,04    | 3600,2  | 7,59    |
| 25                        | 4        | 3        | 0,25      | I3    | 1867      | 85,59 | 11,62   | 1650              | 1680,2 | 1,80    | 1661              | 1686,2 | 2,15    | 3600,19 | 7,69    |
| 25                        | 7        | 5        | 0,25      | I1    | 981       | 75,84 | 9,48    | 888               | 916,6  | 3,12    | 893               | 917,4  | 3,20    | 3600,33 | 7,15    |
| 25                        | 7        | 5        | 0,25      | I2    | 975       | 77,44 | 5,33    | 930               | 954,4  | 3,29    | 923               | 948,4  | 2,68    | 3600,3  | 7,09    |
| 25                        | 7        | 5        | 0,25      | I3    | 1046      | 68,26 | 9,08    | 951               | 968    | 1,76    | 961               | 969,8  | 1,94    | 3600,31 | 7,12    |
| 25                        | 9        | 8        | 0,25      | I1    | 706       | 50,28 | 7,08    | 660               | 683,2  | 3,98    | 656               | 668,4  | 1,86    | 3600,5  | 6,89    |
| 25                        | 9        | 8        | 0,25      | I2    | 666       | 58,86 | 7,06    | 636               | 655,6  | 5,58    | 619               | 635    | 2,52    | 3600,45 | 6,89    |

## EK-2. (devam) Test problemlerine ait sonuçlar (Önem faktörü=0,25)

| Problem Karakteristikleri |          |          |           |       | MILP      |       |         | Genetik Algoritma |        |         | Tavlama Benzetimi |        |         | CPU     |         |
|---------------------------|----------|----------|-----------|-------|-----------|-------|---------|-------------------|--------|---------|-------------------|--------|---------|---------|---------|
| <i>n</i>                  | <i>h</i> | <i>o</i> | <i>cv</i> | index | Amaç Fonk | %Gap  | % Sapma | En iyi            | Ort.   | % Sapma | En iyi            | Ort.   | % Sapma | MM      | GA & TB |
| 25                        | 9        | 8        | 0,25      | I3    | 807       | 57,13 | 8,67    | 743               | 758    | 2,77    | 737               | 745,4  | 1,13    | 3600,45 | 6,80    |
| 30                        | 5        | 3        | 0,25      | I1    | 2146      | 83,55 | 6,80    | 2023              | 2055,4 | 2,70    | 2000              | 2021,8 | 1,08    | 3600,33 | 9,62    |
| 30                        | 5        | 3        | 0,25      | I2    | 1791      | 84,14 | 8,60    | 1657              | 1678,6 | 2,48    | 1637              | 1666,2 | 1,75    | 3600,33 | 9,59    |
| 30                        | 5        | 3        | 0,25      | I3    | 2045      | 86,99 | 12,57   | 1806              | 1839,8 | 2,82    | 1788              | 1830,4 | 2,32    | 3600,42 | 9,60    |
| 30                        | 8        | 6        | 0,25      | I1    | 1065      | 72,39 | 11,36   | 961               | 991,6  | 4,80    | 944               | 968,8  | 2,56    | 3600,69 | 8,93    |
| 30                        | 8        | 6        | 0,25      | I2    | 1108      | 77,89 | 9,75    | 1029              | 1053,4 | 5,07    | 1000              | 1023,6 | 2,31    | 3600,69 | 8,94    |
| 30                        | 8        | 6        | 0,25      | I3    | 1027      | 74,68 | 12,85   | 928               | 940,6  | 4,85    | 895               | 921,8  | 2,91    | 3600,63 | 8,90    |
| 30                        | 11       | 9        | 0,25      | I1    | 775       | 62,71 | 6,45    | 742               | 752,4  | 3,64    | 725               | 738,2  | 1,79    | 3600,99 | 8,69    |
| 30                        | 11       | 9        | 0,25      | I2    | 769       | 60,08 | 14,17   | 681               | 703,8  | 6,22    | 660               | 678,6  | 2,74    | 3600,8  | 8,68    |
| 30                        | 11       | 9        | 0,25      | I3    | 802       | 46,63 | 13,09   | 710               | 744    | 6,32    | 697               | 713,2  | 2,27    | 3600,84 | 8,68    |
| 35                        | 6        | 4        | 0,25      | I1    | 1970      | 83,20 | 16,45   | 1698              | 1715,4 | 4,05    | 1646              | 1684,8 | 2,30    | 3600,64 | 11,34   |
| 35                        | 6        | 4        | 0,25      | I2    | 1910      | 81,99 | 13,30   | 1687              | 1707,2 | 3,00    | 1656              | 1674,8 | 1,12    | 3600,8  | 11,34   |
| 35                        | 6        | 4        | 0,25      | I3    | 1517      | 79,43 | 7,98    | 1404              | 1430,2 | 2,39    | 1396              | 1411   | 1,06    | 3600,72 | 11,37   |
| 35                        | 9        | 7        | 0,25      | I1    | 1358      | 80,56 | 17,60   | 1161              | 1170,6 | 4,41    | 1119              | 1127,8 | 0,78    | 3601,14 | 10,71   |
| 35                        | 9        | 7        | 0,25      | I2    | 1113      | 68,73 | 11,23   | 989               | 1030,4 | 4,11    | 988               | 1005   | 1,69    | 3601,06 | 10,69   |
| 35                        | 9        | 7        | 0,25      | I3    | 1167      | 68,21 | 13,02   | 1027              | 1057,4 | 4,01    | 1015              | 1028,6 | 1,32    | 3601,05 | 10,71   |
| 35                        | 13       | 11       | 0,25      | I1    | 794       | 62,72 | 15,24   | 673               | 700,4  | 3,91    | 682               | 694,6  | 3,11    | 3601,58 | 10,51   |
| 35                        | 13       | 11       | 0,25      | I2    | 786       | 70,23 | 19,08   | 660               | 668,6  | 4,88    | 636               | 646,2  | 1,58    | 3601,69 | 10,50   |
| 35                        | 13       | 11       | 0,25      | I3    | 738       | 56,91 | 17,21   | 636               | 655,8  | 6,83    | 611               | 621,2  | 1,64    | 3601,69 | 10,52   |
| 40                        | 6        | 4        | 0,25      | I1    | 2230      | 86,68 | 14,39   | 2010              | 2044,8 | 6,64    | 1909              | 1960,8 | 2,64    | 3600,89 | 12,70   |
| 40                        | 6        | 4        | 0,25      | I2    | 2118      | 85,22 | 15,77   | 1854              | 1858,6 | 4,01    | 1784              | 1801   | 0,94    | 3601,03 | 12,97   |
| 40                        | 6        | 4        | 0,25      | I3    | 2232      | 83,60 | 15,41   | 1938              | 1974,4 | 4,38    | 1888              | 1911,2 | 1,21    | 3601,02 | 12,81   |
| 40                        | 10       | 8        | 0,25      | I1    | 1241      | 75,99 | 23,93   | 985               | 996    | 5,22    | 944               | 967    | 2,38    | 3601,91 | 11,61   |
| 40                        | 10       | 8        | 0,25      | I2    | 1217      | 71,24 | 15,69   | 1069              | 1088,2 | 5,72    | 1026              | 1041,4 | 1,48    | 3601,72 | 12,20   |
| 40                        | 10       | 8        | 0,25      | I3    | 1202      | 66,31 | 15,22   | 1058              | 1077,2 | 5,40    | 1019              | 1027,4 | 0,82    | 3601,7  | 12,10   |
| 40                        | 14       | 12       | 0,25      | I1    | 994       | 65,79 | 27,77   | 766               | 787,2  | 8,79    | 718               | 740,4  | 3,03    | 3602,61 | 12,00   |
| 40                        | 14       | 12       | 0,25      | I2    | 966       | 66,67 | 25,05   | 755               | 778,4  | 6,99    | 724               | 742,8  | 2,53    | 3602,66 | 11,97   |
| 40                        | 14       | 12       | 0,25      | I3    | 816       | 68,01 | 23,28   | 639               | 664,6  | 5,81    | 626               | 635,4  | 1,48    | 3602,66 | 11,86   |
| 50                        | 8        | 5        | 0,25      | I1    | 2511      | 87,65 | 21,23   | 2050              | 2094,4 | 5,56    | 1978              | 2023,8 | 2,26    | 3602,36 | 17,54   |
| 50                        | 8        | 5        | 0,25      | I2    | 2524      | 88,43 | 22,31   | 1983              | 2053,6 | 4,51    | 1961              | 1985,2 | 1,22    | 3602,59 | 17,54   |
| 50                        | 8        | 5        | 0,25      | I3    | 2443      | 87,60 | 18,91   | 2029              | 2061,2 | 3,89    | 1981              | 2007   | 1,30    | 3602,38 | 17,53   |
| 50                        | 13       | 10       | 0,25      | I1    | 1572      | 83,14 | 37,28   | 1034              | 1059   | 6,89    | 986               | 996    | 1,00    | 3604,66 | 16,56   |
| 50                        | 13       | 10       | 0,25      | I2    | 1294      | 76,51 | 24,03   | 1041              | 1051,4 | 6,51    | 983               | 1001,6 | 1,86    | 3604,58 | 16,57   |
| 50                        | 13       | 10       | 0,25      | I3    | 1385      | 79,06 | 29,60   | 982               | 1015,4 | 3,98    | 975               | 986,4  | 1,16    | 3604,14 | 16,55   |
| 50                        | 18       | 15       | 0,25      | I1    | 1347      | 67,78 | 46,55   | 748               | 759,6  | 5,21    | 720               | 721,4  | 0,19    | 3607,64 | 16,63   |
| 50                        | 18       | 15       | 0,25      | I2    | 989       | 61,27 | 28,61   | 743               | 775,8  | 9,00    | 706               | 729,8  | 3,26    | 3608,42 | 16,63   |
| 50                        | 18       | 15       | 0,25      | I3    | 1145      | 62,36 | 37,82   | 749               | 766    | 7,05    | 712               | 718,8  | 0,95    | 3607,03 | 16,63   |
| 60                        | 9        | 6        | 0,25      | I1    | 2529      | 88,22 | 23,09   | 2024              | 2059,2 | 5,55    | 1945              | 1958,6 | 0,69    | 3606,08 | 22,13   |
| 60                        | 9        | 6        | 0,25      | I2    | 2545      | 86,68 | 23,06   | 2043              | 2090   | 6,32    | 1958              | 1982,2 | 1,22    | 3605,13 | 22,11   |
| 60                        | 9        | 6        | 0,25      | I3    | 2390      | 88,41 | 23,14   | 1915              | 1945,6 | 5,58    | 1837              | 1858,8 | 1,17    | 3604,72 | 22,09   |
| 60                        | 15       | 12       | 0,25      | I1    | 1534      | 80,12 | 32,40   | 1085              | 1096   | 5,38    | 1037              | 1046,8 | 0,94    | 3612,03 | 21,39   |
| 60                        | 15       | 12       | 0,25      | I2    | 1392      | 78,52 | 28,38   | 1062              | 1078,8 | 7,58    | 997               | 1003,8 | 0,68    | 3611,09 | 21,36   |
| 60                        | 15       | 12       | 0,25      | I3    | 1386      | 77,06 | 23,74   | 1105              | 1126,2 | 6,14    | 1057              | 1066,2 | 0,86    | 3611,89 | 21,39   |
| 60                        | 21       | 18       | 0,25      | I1    | 1093      | 67,80 | 34,40   | 751               | 776,6  | 7,67    | 717               | 725,4  | 1,16    | 3610,97 | 21,04   |
| 60                        | 21       | 18       | 0,25      | I2    | 1142      | 70,67 | 37,04   | 747               | 761,2  | 5,54    | 719               | 732,8  | 1,88    | 3612,3  | 21,06   |
| 60                        | 21       | 18       | 0,25      | I3    | 1021      | 67,09 | 32,13   | 740               | 758,6  | 8,65    | 693               | 708    | 2,12    | 3611,97 | 21,05   |
| 75                        | 12       | 8        | 0,25      | I1    | 2479      | 87,58 | 23,76   | 1969              | 1999,2 | 5,46    | 1890              | 1913,2 | 1,21    | 3611,95 | 26,71   |
| 75                        | 12       | 8        | 0,25      | I2    | 2516      | 84,58 | 26,55   | 1937              | 1970,2 | 6,20    | 1848              | 1875,8 | 1,48    | 3613    | 26,96   |
| 75                        | 12       | 8        | 0,25      | I3    | 2274      | 85,97 | 20,54   | 1912              | 1932   | 6,47    | 1807              | 1839,6 | 1,77    | 3612,8  | 26,87   |
| 75                        | 19       | 15       | 0,25      | I1    | 1401      | 77,16 | 26,91   | 1074              | 1089,6 | 6,02    | 1024              | 1029,6 | 0,54    | 3612,28 | 26,14   |
| 75                        | 19       | 15       | 0,25      | I2    | 1656      | 75,54 | 41,18   | 1014              | 1054,8 | 7,66    | 974               | 992,8  | 1,89    | 3619,8  | 26,09   |
| 75                        | 19       | 15       | 0,25      | I3    | 1739      | 78,90 | 39,45   | 1100              | 1126,2 | 6,50    | 1053              | 1074,8 | 2,03    | 3619,49 | 26,60   |
| 75                        | 27       | 23       | 0,25      | I1    |           |       |         | 726               | 746    | 7,10    | 693               | 705,8  | 1,81    |         | 25,44   |
| 75                        | 27       | 23       | 0,25      | I2    |           |       |         | 739               | 755,8  | 7,12    | 702               | 711,8  | 1,38    |         | 25,21   |
| 75                        | 27       | 23       | 0,25      | I3    |           |       |         | 701               | 713    | 7,15    | 662               | 669,6  | 1,14    |         | 25,43   |
| 90                        | 14       | 9        | 0,25      | I1    | 2390      | 87,28 | 13,56   | 2170              | 2205,2 | 6,31    | 2066              | 2084,4 | 0,88    | 3610,3  | 36,51   |
| 90                        | 14       | 9        | 0,25      | I2    | 2353      | 86,02 | 19,04   | 1999              | 2020   | 5,69    | 1905              | 1925,4 | 1,06    | 3611,89 | 36,52   |
| 90                        | 14       | 9        | 0,25      | I3    | 2748      | 86,64 | 30,28   | 2016              | 2048,2 | 6,45    | 1916              | 1943   | 1,39    | 3614,89 | 36,50   |
| 90                        | 23       | 18       | 0,25      | I1    |           |       |         | 1055              | 1106,6 | 7,28    | 1026              | 1040,6 | 1,40    |         | 35,34   |
| 90                        | 23       | 18       | 0,25      | I2    |           |       |         | 1118              | 1149   | 6,70    | 1072              | 1074   | 0,19    |         | 35,37   |
| 90                        | 23       | 18       | 0,25      | I3    |           |       |         | 1044              | 1074   | 8,01    | 988               | 998,6  | 1,06    |         | 35,32   |
| 90                        | 32       | 27       | 0,25      | I1    |           |       |         | 758               | 767,2  | 7,59    | 709               | 723,8  | 2,04    |         | 34,08   |
| 90                        | 32       | 27       | 0,25      | I2    |           |       |         | 730               | 754,2  | 7,72    | 696               | 697,2  | 0,17    |         | 34,06   |
| 90                        | 32       | 27       | 0,25      | I3    |           |       |         | 834               | 853    | 8,32    | 782               | 792,6  | 1,34    |         | 34,09   |

## EK-2. (devam) Test problemlerine ait sonuçlar (Önem faktörü=0,25)

| Problem Karakteristikleri |          |          |           |       | MILP      |      |         | Genetik Algoritma |        |         | Tavlama Benzetimi |        |         | CPU |         |
|---------------------------|----------|----------|-----------|-------|-----------|------|---------|-------------------|--------|---------|-------------------|--------|---------|-----|---------|
| <i>n</i>                  | <i>h</i> | <i>o</i> | <i>cv</i> | index | Amaç Fonk | %Gap | % Sapma | En iyi            | Ort.   | % Sapma | En iyi            | Ort.   | % Sapma | MM  | GA & TB |
| 120                       | 18       | 12       | 0,25      | I1    |           |      |         | 2028              | 2068,6 | 7,38    | 1916              | 1944,8 | 1,48    |     | 53,16   |
| 120                       | 18       | 12       | 0,25      | I2    |           |      |         | 2122              | 2152,2 | 7,35    | 1994              | 2025   | 1,53    |     | 53,15   |
| 120                       | 18       | 12       | 0,25      | I3    |           |      |         | 2156              | 2168,8 | 6,08    | 2037              | 2050,6 | 0,66    |     | 53,15   |
| 120                       | 30       | 24       | 0,25      | I1    |           |      |         | 1200              | 1233,2 | 8,69    | 1126              | 1151,2 | 2,19    |     | 49,76   |
| 120                       | 30       | 24       | 0,25      | I2    |           |      |         | 1153              | 1164,8 | 7,71    | 1075              | 1091,8 | 1,54    |     | 49,71   |
| 120                       | 30       | 24       | 0,25      | I3    |           |      |         | 1152              | 1174,4 | 7,53    | 1086              | 1096,8 | 0,98    |     | 49,74   |
| 120                       | 42       | 36       | 0,25      | I1    |           |      |         | 863               | 880,4  | 7,88    | 811               | 818,4  | 0,90    |     | 46,06   |
| 120                       | 42       | 36       | 0,25      | I2    |           |      |         | 828               | 838,4  | 9,11    | 762               | 773,2  | 1,45    |     | 46,01   |
| 120                       | 42       | 36       | 0,25      | I3    |           |      |         | 779               | 789    | 7,86    | 727               | 731,4  | 0,60    |     | 46,24   |

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : AKPINAR Melike  
 Uyruğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 30.07.1991, Ankara  
 Medeni hali : Evli  
 Telefon : 0 (555) 870 92 54  
 e-mail : acikgozmelike@gmail.com



### Eğitim

| Derece        | Eğitim Birimi                                | Mezuniyet Tarihi |
|---------------|----------------------------------------------|------------------|
| Yüksek lisans | Gazi Üniversitesi / Endüstri Mühendisliği    | Devam Ediyor     |
| Lisans        | Karabük Üniversitesi / Endüstri Mühendisliği | 2014             |
| Lise          | Esenevler Anadolu Lisesi                     | 2009             |

### İş Deneyimi

| Yıl       | Yer                | Görev               |
|-----------|--------------------|---------------------|
| 2015-2019 | Lmz Elektromekanik | Satınalma Mühendisi |

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

Akpınar, M. ve Kellegöz, T. (2019). *Sıra Bağımlı Hazırlık Zamanlı Ameliyathane Çizelgeleme için Bir Model Önerisi*. Proceedings of 3rd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies, Ankara, 4 (1), 354-359.

### Hobiler

Fotoğraf,yüzme



*GAZİ GELECEKTİR...*