

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇOK TIPLI DEVİNİMLİ STOK İÇEREN HAVAYOLLARI BAKIM ONARIM  
SERVİSLERİNDE ENTEGRE ÜRETİM ÇİZELGELEME VE KAPASİTE  
PLANLAMA: SABİTLE VE OPTİMİZE ET SEZGİSEL YAKLAŞIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Fatma Sedanur ÖZTÜRK**

**Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Kadir ERTOĞRAL**

**ARALIK 2018**



Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....  
**Prof. Dr. Osman EROĞUL**  
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığımı onaylarım.

.....  
**Prof. Dr. Tahir HANALIOĞLU**  
Anabilim Dalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 151311036 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Fatma Sedanur ÖZTÜRK**'ün ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**ÇOK TIPLI DEVİNİMLİ STOK İÇEREN HAVAYOLLARI BAKIM ONARIM SERVİSLERİNDE ENTEGRE ÜRETİM ÇİZELGELEME VE KAPASİTE PLANLAMA: SABİTLE VE OPTİMİZE ET SEZGİSEL YAKLAŞIMI**" başlıklı tezi **14 Aralık 2018** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Kadir ERTOĞRAL** .....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

**Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN (Başkan)** .....  
Gazi Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi Salih TEKİN** .....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi



## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Fatma Sedanur Öztürk



## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### ÇOK TIPLİ DEVİNİMLİ STOK İÇEREN HAVAYOLLARI BAKIM ONARIM SERVİSLERİNDE ENTEGRE ÜRETİM ÇİZELGELEME VE KAPASİTE PLANLAMA: SABİTLE VE OPTİMİZE ET SEZGİSEL YAKLAŞIMI

Fatma Sedanur Öztürk

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Kadir Ertoğral

Tarih: Aralık 2018

Havayolu sektörü için bakım onarım (BO) faaliyetleri uçuşların güvenliğini ve sürekliliğini sağlamak için genel düzenlemelere tabidir. Uçak üzerindeki kritik ekipmanlar, kullanım izninin sürmesi için düzenli aralıklarla bakım onarımdan geçmelidir. Katı son teslim tarihleri revizyon (overhaul) aktivitelerinin planlanmasında önemli kısıtlardan biridir. BO sistemlerini klasik üretim sistemlerinden ayıran önemli bir faktör pahalı modüllerin devinimli (rotatable) envanter şeklinde kullanılmasıdır. Bu pahalı devinimli modüller BO şirketleri tarafından revizyon edilir ve tekrar kullanılır. BO şirketleri genellikle pahalı devinimli modüller için ilgili müşteri havayolları ile takas programları gerçekleştirir. Bir uçak, devinimli modülü için bir BO servisine geldiğinde, BO şirketinin envanterinden kullanıma hazır bir modül, uçaktan çıkarılan devinimli modül ile değiştirilir ve böylece uçak için BO hizmet süresi en aza indirilir. Çıkarılan modül, sınırlı işgücü kapasitesi ile revizyon sürecinden geçirilip gelecekteki talepler için envantere eklenir. Bu çalışmada, BO şirketlerinin revizyon ve takas planlaması

sorunu işgücü kapasitesi planlaması da ele alınarak, hızlandırılmış ve normal revizyon opsiyonlarıyla birlikte çözülmektedir. Bu bağlamda, sonlu planlama ufkunda, çok tipli devinimli envanter içeren havayolu BO firması için envanterde tutma ve işgücü ile ilgili maliyetlerin toplamını en küçükleyen karma tamsayı programlama modeli geliştirilmiştir. Modelin göze çarpan bir özelliği de maliyet açısından mantıklı olduğu taktirde belirli bir erken teslim edebilme limitine kadar, takasların teslim tarihinden önce gerçekleştirilmesine izin vermesidir. Model, BO çizelgeleme ve işgücü planlaması için küçük (gün) ve büyük (çeyrek yıl) olmak üzere iki tip zaman kümesi kullanmaktadır. Literatürde yeni olan problem ve modelinin NP-Zor olduğu gösterilmiştir. Kapsamlı sayısal testler rastgele oluşturulmuş problemler setleri üzerinde gerçekleştirilmiştir ve elde edilen sonuçlara göre bazı yönetimsel analizler yapılmıştır. Problemin çözümü için literatürdeki sabitle ve optimize et sezgisel metodu uyarlanarak kullanılmıştır. Sezgisel metodun matematiksel modele göre performansı rassal olarak üretilen problem setleri üzerinde farklı parametrelerle değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Üretim çizelgeleme, Devinimli envanter, Havayolları bakım onarım, İşgücü kapasite planlama, Sabitle ve optimize et sezgiseli.



## **ABSTRACT**

Master of Science

**AN INTEGRATED PRODUCTION SCHEDULING AND CAPACITY  
PLANNING FOR THE MAINTENANCE AND REPAIR OPERATIONS IN  
AIRLINE INDUSTRY WITH MULTIPLE TYPES ROTABLE INVENTORY: A  
FIX AND OPTIMIZE HEURISTIC**

Fatma Sedanur Öztürk

TOBB University of Economics and Technology  
Institute of Natural and Applied Sciences  
Industrial Engineering Science Programme

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Kadir Ertoğral

Date: December 2018

Maintenance, repair, and overhaul (MRO) activities for the airline sector are generally subject to some regulations to ensure the safety and the continuity of flights. The critical equipment on aircraft must go through MRO at regulated intervals for the continuing permission of use. Thus, the strict deadlines constraint overhaul activities. Several systems on aircrafts are of so-called rotatable module type. These expensive rotatable modules are overhauled by MRO companies and used repeatedly. MRO companies usually perform exchange programs with customer airlines regarding the expensive rotatable modules. When an airplane comes for an MRO service involving rotatable module, a ready-to-use module from the inventory of MRO company is exchanged with the rotatable module extracted from the airplane so that the service time for the aircraft is minimized. The extracted module is overhauled in the MRO shop with a limited workforce capacity and the overhauled module is rotated back to the inventory for a future exchange. We tackle the overhaul

and exchange scheduling problem together with the workforce planning for MRO companies with an expedited overhaul option. We propose a mixed integer programming formulation of the problem as a finite planning horizon model where we assume that there are multiple types of rotables handled by the MRO company, and we minimize the sum of inventory holding and workforce-related costs. The salient features of the model are that we allow exchanges to be carried out earlier than their due dates, if it makes sense cost wise, up to a certain earliness limit, and we assume that there is an expedited overhaul option. The model uses two types of time buckets, small (days) and big (quarter-year), for overhaul scheduling and workforce planning, respectively. Both the problem and its model are new in the literature. We show that this planning problem is NP-Hard. We provide extensive numerical tests on a set of randomly generated problems and propose some managerial insights based on the results obtained. We introduced a mixed-integer programming model of this problem for the first time in the literature, and suggested a fix and optimize type heuristic solution procedure. We showed the performance of the suggested heuristic on a set of random problem.

**Keywords:** Production scheduling, Rotable inventory, Maintenance and repair operations, Workforce capacity planning, Fix and optimize heuristic.

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca yüksek motivasyonu ve kıymetli katkılarıyla beni yönlendiren, bu çalışmayı gerçekleőtirebileceđime inanan ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Kadir ERTOĞRAL'a,

Kıymetli zamanlarını ayırarak tezimi okuyan ve geri bildirimde bulunan tez jürimin üyeleri Prof Dr. Hadi GÖKÇEN'e ve Dr. Öğr. Üyesi Salih TEKİN'e,

Hem lisans hem de yüksek lisans eğitimim süresince kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine,

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca bana burs sağlayan TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne,

Enerjimi hep yüksek tutan, her zaman beni dinleyen ve desteklerini esirgemeyen sevgili arkadaşlarıma,

Beni yetiőtirerek bu günlere gelmemi sağlayan, özverisi ve sabrıyla her zaman yanımda olan anneanneme, anneme, babama ve kardeőtime çok teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|   |             |
|---|-------------|
| <b>ÖZET</b> .....   | <b>iv</b>   |
| <b>ABSTRACT</b> .....   | <b>vi</b>   |
| <b>TEŞEKKÜR</b> .....   | <b>viii</b> |
| <b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....                                    | <b>x</b>    |
| <b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....                                  | <b>xi</b>   |
| <b>KISALTMALAR</b> .....                                      | <b>xii</b>  |
| <b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....                                   | <b>xiii</b> |
| <b>1. GİRİŞ</b> .....   | <b>1</b>    |
| <b>2. PROBLEM TANIMI VE FORMÜLASYON</b> .....                 | <b>9</b>    |
| 2.1. Problem Tanımı.....                                      | 9           |
| 2.2. Modelleme Yaklaşımı.....                                 | 10          |
| 2.3. Problemin Formülasyonu.....                              | 12          |
| 2.4. Problemin Karmaşıklığı.....                              | 15          |
| 2.5. Geliştirilen Geçerli Eşitsizlikler.....                  | 17          |
| <b>3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....                         | <b>19</b>   |
| 3.1. Bakım Onarım Revizyon.....                               | 19          |
| 3.2. Sabitle ve Optimize Et Metodu.....                       | 22          |
| <b>4. NÜMERİK ANALİZLER &amp; YÖNETİMSEL ÇIKARIMLAR</b> ..... | <b>25</b>   |
| 4.1. Problemlerin Üretimi.....                                | 25          |
| 4.2. Analiz Sonuçları ve Yönetimsel Çıkarımlar.....           | 27          |
| <b>5. ÖNERİLEN ÇÖZÜM SEZGİSELİ</b> .....                      | <b>35</b>   |
| 5.1. İlk Faz Adımları.....                                    | 36          |
| 5.2. İkinci Faz Adımları.....                                 | 37          |
| 5.3. Algoritmanın Uygulandığı Problemlerin Üretimi.....       | 40          |
| 5.4. Problemin Çözümü ve Performans Analizi.....              | 41          |
| <b>6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER</b> .....                     | <b>45</b>   |
| <b>KAYNAKLAR</b> .....  | <b>47</b>   |
| <b>EKLER</b> .....  | <b>51</b>   |
| <b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....   | <b>57</b>   |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|  |    |
|--|----|
| Şekil 2.1: Devrimli stok akış sistemi.....   | 12 |
| Şekil 4.1: 5 farklı problem setinin ortalaması olarak toplam maliyet ve envantere tutma maliyetinin maksimum erkenlik seviyesine göre değişimi ..... | 28 |
| Şekil 4.2: Problem seti-1 için toplam maliyet ve envantere tutma maliyetinin maksimum erkenlik seviyesine göre değişimi .....                        | 29 |
| Şekil 4.3: Normal ve fazla mesai ücretlerinin maksimum erkenlik seviyesine göre değişimi .....   | 30 |
| Şekil 4.4: Maliyet bileşenlerinin dağılımı .....   | 32 |
| Şekil 4.5: İşe alma ve işten çıkarma ücretlerinin maksimum erkenlik seviyesine göre değişimi .....   | 33 |
| Şekil 5.1: Sabitle ve optimize et sezgiselinin ilk fazının şematik gösterimi.....  | 36 |
| Şekil 5.2: Sabitle ve optimize et sezgiselinin ikinci fazının şematik gösterimi .....  | 37 |





## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

|   |    |
|---|----|
| Çizelge 4.1: Envanterde tutma maliyeti oranlarına göre envanter ve normal mesai ücretlerinin toplam maliyete oranları. .... | 31 |
| Çizelge 5.1: Üretilen 20 problemin sahip olduğu parametreler. ....  | 40 |
| Çizelge 5.2: 90 günlük alt problemlerle Max Earliness=0 ve h=%7 parametreleri için elde edilen sonuçlar.....                | 41 |
| Çizelge 5.3: 90 günlük alt problemlerle Max Earliness=0 ve h=%20 parametreleri için elde edilen sonuçlar.....               | 42 |
| Çizelge 5.4: 90 günlük alt problemlerle Max Earliness=8 ve h=%7 parametreleri için elde edilen sonuçlar.....                | 42 |
| Çizelge 5.5: 90 günlük alt problemlerle Max Earliness=8 ve h=%20 parametreleri için elde edilen sonuçlar.....               | 42 |



## KISALTMALAR

|                |  |
|----------------|--|
| <b>APP</b>     | :Aggregated Production Planning (Bütünleşik Üretim Planlam)              |
| <b>BO</b>      | :Bakım Onarım Revizyon   |
| <b>DMİKRPP</b> | :Devinimli Modüller İçin İşgücü Kapasitesi ve Revizyon Planlama Problemi |
| <b>MRO</b>     | :Maintenance Repair Overhaul (Bakım Onarım Revizyon)                     |
| <b>TBKPKP</b>  | :Tek Boyutlu Kutu Paketleme Karar Problemi                               |



## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

### Kümeler

|      |  |
|------|--|
| T    | planlama ufkundaki periyotlar (gün) kümesi                               |
| C    | işgücü seviyesinin değiştirilmesine izin verilen periyotlar (gün) kümesi |
| J    | farklı tip devinimli envanterler kümesi                                  |
| I(j) | devinimli envanterler için takas talepleri kümesi                        |

### Parametreler

|          |  |
|----------|--|
| $d_{ji}$ | $j \in J$ tipinin $i \in I(j)$ talebi için izin verilen son takas periyodu   |
| $a_j^1$  | hızlandırılmış modda revizyon uygulanıyorsa $j \in J$ tipi envanter için günlük gerekli işçilik saati (adam-saat)  |
| $a_j^2$  | normal modda revizyon uygulanıyorsa $j \in J$ tipi envanter için günlük gerekli işçilik saati (adam-saat) ( $a_j^2 < a_j^1$ )  |
| $p_j^1$  | hızlandırılmış modda revizyon uygulanıyorsa $j \in J$ tipi envanter için gün sayısı cinsinden revizyon süresi  |
| $p_j^2$  | normal modda revizyon uygulanıyorsa $j \in J$ tipi envanter için gün sayısı cinsinden revizyon süresi ( $p_j^2 > p_j^1$ )  |
| r        | bir işçinin günlük normal mesai süresi   |
| $z_j$    | $j \in J$ tipi envanterin satın alma maliyeti  |
| $hc_j$   | $j \in J$ tipi envanter için günlük stokta tutma maliyeti oranı  |
| $h_j$    | planlama ufku süresince $j \in J$ tip envanter için stokta tutma maliyeti<br>( $j \in J$ tipi envanterin satın alma maliyeti*planlama ufkundaki periyot sayısı/bir yıldaki gün sayısı*j $\in J$ tipi envanter için günlük stokta tutma maliyeti oranı) |
| D        | başlangıç envanterlerini satın almak için kullanılabilir başlangıç bütçesi   |

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| $C_W$                           | her işçi için günlük işçilik maliyeti (günlük normal mesai ücreti) |
| $C_H$                           | bir işçiyi işe alma maliyeti                                       |
| $C_F$                           | bir işçiyi işten çıkarma maliyeti                                  |
| $C_O$                           | her işçi için saatlik fazla mesai maliyeti                         |
| $\beta$                         | azami fazla mesai limiti çarpanı                                   |
| $w$                             | planlama ufku başındaki ( $t = 0$ ) mevcut işçi sayısı             |
| $\text{Max}_{\text{Earliness}}$ | erkenlik için izin verilen azami gün sayısı                        |
| $TC$                            | toplam maliyet   |

### **Karar Değişkenleri**

|            |  |
|------------|--|
| $Y_{jt}^1$ | $j \in J$ tip envanterden $t \in T$ periyodu başında hızlı modda revizyona başlayanların sayısı                                  |
| $Y_{jt}^2$ | $j \in J$ tip envanterden $t \in T$ periyodu başında normal modda revizyona başlayanların sayısı                                 |
| $H_{jt}$   | $j \in J$ tip envanterden $t \in T$ periyodu sonunda değişime hazır stok miktarı   |
| $B_{jt}$   | $j \in J$ tip envanterden $t \in T$ periyodu başı itibari ile revizyon bekleyen stok miktarı                                     |
| $X_{jit}$  | 1, eğer $j \in J$ tip envanterin $i \in I(j)$ inci talebi $t \in T$ periyodu başında takasla karşılanıyorsa; 0, diğer durumlarda |
| $W_t$      | $t \in T$ periyodu başındaki mevcut işçi sayısı  |
| $G_t$      | $t \in T$ periyodu başında işe alınan işçi sayısı  |
| $F_t$      | $t \in T$ periyodu başında işten çıkarılan işçi sayısı   |
| $S_j$      | $j \in J$ tip envanterin planlama ufku başındaki ( $t = 0$ ) stok miktarı  |
| $O_t$      | $t \in T$ periyodunda gerçekleşen fazla mesai süresi (saat)  |

## 1. GİRİŞ

Endüstriyel bakım, onarım ve revizyon faaliyetleri (BO), sahadaki donanımın bozulmalarını en aza indirerek işlevsel tutan, ömrünü uzatan, işletmenin operasyonlarını sürdürmesini sağlayan ve güvenli çalışmalarını garantileyen önemli bir destek faaliyetleridir. BO bir katma değer oluşturma faaliyeti değildir, ancak sistemlerin sürdürülebilirliği açısından önemlidir.

Özellikle havacılık sektöründeki BO faaliyetleri, uçuş faaliyetlerinde emniyetin sağlanması, uçağın uçuşa hazır durumda bulunmasının sağlanması ve emniyet faktöründen ödün vermeden maliyetlerin azaltılması amacıyla yapılan ve sıkı regülasyonlara tabi tutulan zorunlu aktivitelerdir. Hem sivil hem de askeri amaçlı yapılan uçuşlarda kullanılan uçakların veya ilgili parçaların belirli periyotlarla bakıma girmesi gerekmektedir. Buradaki esas amaç parçaların sürekliliğinin korunmasını sağlayarak istenmeyen güvenlik riski oluşturan hadiselerin önüne geçmektir. Bu bahsedilen bakım-onarım periyodu uçuş zamanına ya da uçuş sayısına bağlı olarak belirlenmektedir. Bu iki kısıttan hangisi önce gerçekleşirse, diğer kısıta bakılmaksızın uçak veya ilgili parçası bakıma girmek zorundadır. Bakımdan sonra bu iki kısıt sıfırlanır ve bir sonraki bakım için yine bu iki temel kriterden birinin gerçekleşmesi beklenir. Bu döngü sürekli kontrol edilerek bakım onarım faaliyetlerinin tekrarlanması gerekmektedir.

BO faaliyetleri genel olarak, ihtiyaç duyulduğu anda, optimum fiyat ve kalitede tam hizmet verebilecek hava araçlarının sağlanmasını amaçlar. Bu faaliyetlere örnek olarak (Ayeni vd. (2011)):

- Tanımlı periyodik kontroller
- Bakım
- Servis
- Onarım
- Modifikasyon
- Revizyon
- Muayene

Bakım, onarım ve revizyon kavramları aşağıda daha detaylı anlatılmaktadır:

Bakım aşağıdaki gibi iki gruba ayrılarak incelenebilir;

a) Programlı Bakım: Uçak üzerindeki parçaların ve/veya sistemlerin arızalansın-arızalanmasın kontrol edildiği, üretici firmanın belirlediği toleranslara uygunluğun araştırıldığı, limit dışı ise gerekli müdahalelerin uygulandığı bakımdır. Günlük, haftalık, aylık ve yıllık olarak planlanabilmektedir. Programlı bakımlar ayarlanırken bazı periyotlar dikkate alınmalıdır. Bunlar; uçuş sayısı, uçuş süresi, blok uçuş süresi ve yaştır.

b) Programsız Bakım: Uçuş esnasında uçuş ekibince belirlenen veya kontrolörler tarafından tespit edilen arızaların giderilmesi için derhal uygulanması gereken bakımlardır. Programsız bakımlarda hangarın ve personelin ne kadar süre kullanılacağı planlanamaz. Pilotaj hataları, bakım aksaklıkları, zorunlu tadilatlar, uçağın yaşı, uçağın imalat seri numarası programsız bakıma etki eden faktörlerdir.

Onarım faaliyetleri; uçağın herhangi bir parçasında hasar ya da arıza oluştuğunda, bu parçanın uçak üzerinde veya ilgili atölyede daha önceden belirlenmiş standartlarına geri getirilmesi için yapılan faaliyetlerin tümüdür. Bu faaliyetler, herhangi bir temizleme işleminden, parçasının tamamen revize edilmesine kadar uzanan geniş bir alanı kapsamaktadır.

Revizyon ise üretici firmanın izni olmadan yapılamayan fabrika seviyesi bakımdır. Belirli bir uçuş süresini tamamlamış olan uçağın veya ilgili modülünün, ana bakım ünitesinde sökülerek gerekli bakımının yapılması ve gerekli komponentlerinin değiştirilmesi varsa kimi tadilatların uygulanması, sonuç olarak uçağın sıfırlanarak yeniden monte edilmesi, gerekli tüm yer testlerinin ve deneme uçuşlarının yapılması, boyanması ve yeniden sertifikalandırılması işlemlerinin tümüdür. Revizyondan çıkan bir uçak, model ve tip açısından eski, yapısal durum ve performans karakteristikleri açısından yeni bir uçak sayılır. Revizyon bakım-onarım işlemlerinin en kapsamlısı ve en zordur. Uygulayıcıya yüksek yatırım masrafı yükler, bunun yanı sıra geniş bilgi birikimi ve deneyim ister.

BO faaliyetleri, yakıt masraflarından sonra havayolu firmaları için ikinci en yüksek maliyet kalemidir. Havacılık endüstrisindeki teknolojinin de hızla ilerlemesiyle artan



ciddi rekabet koşullarında, havayolu şirketleri kalite ve güvenlikten ödün vermeden BO maliyetlerini azaltmaya çalışmaktadır. BO servis sağlayıcı firmalar 4 grupta kategorize edilmektedir:

- i. Sadece kendi bakımlarını yapanlar
- ii. Kendi bakımlarını yapanlar ve aynı zamanda diğer müşterilerine hizmet verenler
- iii. İş jetleri (VIP Corporate)
- iv. Bakım Hizmeti yanında aynı zamanda orijinal ekipmanlar da üreten bakım kuruluşları

Büyük ticari havayolu şirketleri önemli BO faaliyetlerini kendileri yaparken, bu alanda hizmete odaklanmış bağımsız şirketler de bu sektörde yaygındır. Kendi BO faaliyetlerini gerçekleştiren havayolu şirketleri zaman içinde masrafları azaltmak ve operasyonel etkinliklerini iyileştirmek açısından üçüncü partilere de hizmet verecek şekilde kendi BO şirketlerini kurmaya başlamışlardır. Bu şirketlerin önde gelenleri Lufthansa Technic, Air France/KLM, Delta TechOps, Iberia Maintenance'tır. 2006 yılında Türk Hava Yolları da Turkish Technic'i kurarak bu alanda önemli bir atılıma imza atmıştır.

Oliver Wyman (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, dünya çapında ticari havayolları için BO pazarının 2017 yılındaki 77,4 milyar \$'dan 2028 yılında 114,7 milyar \$'a ulaşacağı tahmin edilmektedir. Tüm dünyada varolan ve serviste olan BO firmalarına bakıldığında; Kuzey ve Latin Amerika bu pazarın %31'ini kontrol etmektedir. Avrupa %26, Asya-Pasifik %18 pazar payına sahip ve kalan %25 de diğer şirketlere ve bölgelere dağılmış durumdadır. 2028'de Amerika kıtasının %26, Avrupa'nın %23 ve Asya-Pasifik'in %18 pazar payına sahip olacağı ön görülürken, Çin'in %16 ile pazarda önemli söz sahibi olacağı tahmin edilmektedir. BO hizmetleri için talebin çoğunluğu Asya (%31), Amerika (%26) ve Avrupa'dan (%25) gelmektedir. Motor bakım hizmetleri %42'lik payla en büyük BO segmentidir ve bunu %21'lik payla komponent segmenti takip etmektedir. Büyümenin bazı yerlerde durgunlaştığı daha olgun Avrupa ve Kuzey Amerika pazarları için, çok sayıda üretici, talebi karşılamaya yardımcı olmak ve yerel havayollarını daha düşük işgücü ücretine sahip bölgelerden geri almak için ortaklıklar aramaktadır (Airline

Economics – MRO Global. (2018, Spring). Bu durum BO sektörünün önemini ve onun etkili bir şekilde yönetilmesi gerektiğini ifade etmektedir.

BO faaliyetlerini yürütürken, etkin stok yönetimi önemli bir konudur. Havayollarında BO için kullanılan envanter iki geniş kategoride sınıflandırılmıştır; motorla ilgili envanter ve uçak gövdesi envanteri. Uçak gövdesi envanteri, motorla ilgili parçalar dışındaki tüm envanterleri kapsar. Her iki kategoride de, temel olarak hurda oranlarına dayalı olarak üç farklı türde envanter çeşidi vardır; devinimli (rotatable) envanter, onarılabilir envanter ve tek kullanımlık (sarf) envanter. Sarf envanterler %100 hurda oranına sahiptir ve tek kullanımlık kalemlerdir. Onarılabilir envanterler ise %1 ile %100 arasında bir hurda oranına sahiptir. Öte yandan, devinimli envanterler genellikle onarılabilir kalemlerden oluşan pahalı modüllerdir ve sıfır veya ihmal edilebilir düzeyde hurda oranlarına sahiptirler. Bunlar “ekonomik olarak hizmet edilebilir duruma getirilebilen ve normal operasyonlar sırasında ilgili olduğu uçuş ekipmanının ömrüne yaklaşan bir süre boyunca tam olarak hizmet verilebilir bir duruma tekrarlı şekilde getirilebilen envanter” olarak tanımlanır. Bu tip devinimli envantere örnek olarak iniş takımı, şanzımanlar, yakıt pompaları vb. verilebilir (International Air Transport Association (2015)).

Bakım onarım şirketleri için üç temel kriter olarak kalite, uçakların bakım onarım süresi (turn-around time (TAT)) ve bakım masrafı karşımıza çıkmaktadır. Bu gibi bakım onarım hizmeti veren şirketlerden hava yolları gün ve hafta bazında değil, saat-dakika bazında hizmet beklemektedirler (Spafford (2012)). Bunun temel sebebi ise uçağın bakımdayken kullanılamamasından dolayı hava yolu şirketi için gelir kaybına neden olmasıdır. Örneğin, ticari havayolu endüstrisinde, uçakların durma süreleri nedeniyle fırsat maliyeti, uçağın türüne ve ticari kullanımına bağlı olarak, günde on binlerce ile yüz bin dolar arasında değişebilir. Bu nedenle, BO planlamasında bakım onarım süresinin azaltılması (TAT) önemli bir amaçtır. Uçuş firmalarının bu konudaki titiz tavrı sonucunda sektördeki bakım onarım faaliyetleri hızlı bir şekilde devam etmektedir. Anlaşılacağı üzere bakım onarım faaliyetleri yalnız ürünün devamlılığı ve güvenlik açısından değil, ekonomik süreklilik açısından da önem arz etmektedir.

Envanter yönetimi, TAT'ın azaltılması için BO'da çok önemli bir faktördür. Devinimli envanterler, müşterilerle borç veya takas olarak kullanılabilen pahalı

bileşenlerden veya modüllerden oluşur. Devinimli envanter kullanımı, bakım onarım sistemlerini klasik üretim yöntemlerinden ayıran en önemli özelliktir. Bunun sebebi kapalı döngü tedarik zinciri şeklinde işlemedir, yani sisteme devinimli envanter girdisi uçaklardan çıkarılan devinimli modüllerin bakım onarımdan geçirilip envantere eklenmesi ile olmaktadır. Bu kısımda takas politikası uygulanır. Klasik üretim sistemlerinde ise takas modeli pek uygulanan bir yaklaşım değildir. Bu uygulamanın temelinde; tamir ve bakım için sisteme gelen parçayı veya modülü bakım onarım şirketi bünyesine alması ve devinimli envanter stokunda bulunan parçayı veya modülü müşteriye vermesi yatmaktadır. Takas, diğer BO süreçlerinden dolayı herhangi bir gecikme olmaksızın sadece kullanılan modülü çıkarmak ve yeni modülü takmak için harcanan süreyi ifade ettiğinden uçaklar için TAT'ı en aza indirir. Bakıma ihtiyacı olan parça gerekli işlemlerden geçirildikten sonra devinimli envanter stokuna eklenir ve doğrudan veya bir süre bekledikten sonra, revizyon sürecine girer. Modül için revizyon süreci tamamlandıktan sonra, gelecekteki takas için kullanılmaya hazırdır. Böylece, BO sistemindeki toplam devinimli modül sayısı her zaman sabittir ve bu stok her zaman şu üç durumdan birindedir; revizyon bekleyen, revizyon halinde ve takas edilmeye hazır. Bir yandan, BO şirketleri yüksek maliyetlerden kaçınmak için düşük sayıda değerli devinimli modül envanterleri ile çalışmayı hedeflemektedir. Diğer taraftan da yeterli düzeyde müşteri hizmetini sağlamalıdır. Sonuçta bu tür pahalı parça veya modüllerde envanter tedarik suretiyle değil, dönüşüme tabi tutularak yenilenmiş olur.

Yukarıda da bahsedildiği gibi; malzeme akışı klasik üretim sistemlerinde çoğunlukla tek yönlü iken, devinimli stok kullanılan sistemlerde akış eşit miktarda stoka ve stoktan olmak üzere iki yönlüdür (Kashyap (2012)). Bu da envanter yönetiminin kapalı dönüşümlü tedarik zinciri yapısında olduğunu göstermektedir (Hayek (2005)).

Son yıllarda, havayolu şirketleri BO sağlayıcı firmaların devinimli envanterleri takas için stoklarında tutmasını istemeye başlamıştır. Çoğu BO şirketi ve müşterisi, devinimli envanterler için değişim garantisi sözleşmeleri ile çalışmaktadır (Ayeni et al. (2011)). Örneğin, bir Boing girişimi olan Aviall, 24 saatlik bir gönderi garantisiyle devinimli envanter takas programı sunmaktadır (<https://www.aviall.com/aviallstorefront/rotables#overview>). Bu sözleşmeler kapsamında, uçaklar BO için geldiğinde, devinimli modüller BO şirketlerinin

stoklanmış modülleri kullanılarak değiştirilir ve böylece TAT en aza indirilir. Bu takas politikası, BO şirketlerinin, devinimli envanter stoklarını dikkatli bir şekilde yönetmelerini, süreçleri, işgücü seviyelerini revize etmelerini ve planlarını uçakların gelişimiyle senkronize etmelerini gerektirmektedir. Devinimli envanter ve işgücü ile ilgili maliyetler, BO şirketleri için iki temel kritik maliyet faktörüdür ve bu iki faktör, entegre bir şekilde dikkate alınmalıdır. Genelde pahalı modüller olan devinimli stoklar için talebin gelişimi genellikle rastgele değildir ve BO şirketleri ve müşterileri arasında önceden belirlenen bir programa dayanır. Daha önce de bahsedildiği gibi, BO faaliyetleri arasında geçen zamanlar ihlal edilemeyen, katı regülasyonlara tabidir. Örneğin, bir iniş takımı için revizyon gerekliliği, uçağın kullanım ve modeline bağlı olarak her 6-8 yılda bir gerçekleşir (Lufthansa Teknik (n.d)). Maliyet verimliliği açısından, havayolu şirketleri bu zaman aralıklarını tam olarak kullanmayı tercih ederler ve bu döngü zamanını standart süreden daha kısa süreye indirmek istemezler çünkü bu durum, havayolları için birim zaman başına BO maliyetinde bir artışa neden olacaktır. BO firmasının havayolu firmasını revizyon amaçlı takas için belirli tarihten daha önce çağırmasını erkenlik olarak tanımlayacağız. Bir uçağın bir rotasyon için gerekli olan son takas tarihi (döngü sonu) ile bu ekipman için planlanan değişim tarihi arasındaki fark olarak tanımlanır. İdeal olarak, son tarihler ile gerçek değişim tarihleri arasında bir fark olmamalıdır. Ancak, BO firmalarının sınırlı sayıda envanter ve işgücü kapasitesi nedeniyle, son takas tarihlerinin ihlal edilmediği ve ekonomik olarak uygun bir çözüm elde etmek için bazı takasları erkene almayı tercih edebilecektir. Bu nedenle, BO firmalarının erken dönem değişimlerini en aza indirmek amacıyla, kendi devinimli envanterleri ve işgücü kapasitesi sınırlamalarını göz önünde bulundurarak devinimli stokların revizyon operasyonlarını verimli bir şekilde planlaması gerekmektedir.

Klasik üretim sistemleri için planlama, çizelgeleme ve envanter kontrolüne yönelik optimizasyon çalışmaları ve uygulamaları literatürde ve pratikte çokça çalışılmış olduğu halde BO alanı nispeten üzerinde daha az çalışılmış bir alan olarak dikkat çekmektedir. Bu çalışmada, havayolu işletmeciliğinde BO şirketleri için devinimli tip envanterler için bir revizyon üretim planlaması ve işgücü planlama modeli geliştirilmiştir ve bu boşluğu doldurmaya yönelik, literatürdeki az sayıdaki ilgili ve yeni modelden birisidir. Geliştirilen matematiksel formülasyon, birden çok tipte devinimli modül envanteri için verilen takas son tarihleri ile revizyon

çizelgelemesini, yine belirli dönemlerde işgücü seviyesi değişimine izin veren entegre bir model ile toplam envanter ve işgücü maliyetlerini en küçüklemeyi amaçlayarak yapmaktadır. Model, farklı problem setleri için detayları daha sonra anlatılacak olan farklı parametreler ile çalıştırılarak analiz edilmiştir.

Tezin 2. bölümde problemin tanımı ve çözümü için geliştirilen formülasyon verilmiştir. Ayrıca, problemin teorik karmaşık sınıflaması ve karma tam sayılı model için geliştirilen geçerli eşitsizlikler bu bölümde anlatılmıştır. Bölüm 3'te literatür incelenmiştir ve yapılan çalışmanın literatürdeki yeri tespit edilmiştir. Çalışmamızın, literatürdeki en yakın iki çalışma olan Ertoğral vd. (2015) ve Arts ve Flapper (2015) ile benzerlikleri ve farklılıkları bu bölümde incelenmiştir. Problemin etkin çözümü için kullanılan sabitle ve optimize et sezgisel metodu ile ilgili literatür çalışmaları bu bölümünün sonunda belirtilmiştir. Bölüm 4'te yapılan nümerik çalışmalar ve kapsamlı hassasiyet analizleri ile elde edilen yönetimsel çıkarımlar değerlendirilmiştir. Ayrıca literatürde tam olarak karşılığı bulunmayan problemimiz için örnek veri üretimi ve veri üretirken kullanılan parametrelerin tanımları da Bölüm 4'te verilmiştir. Bölüm 5'te problemin etkin çözümü için literatürden bilinen sabitle ve optimize et sezgisel metodu matematiksel modele uyarlanarak problem üzerinde uygulanmış ve performansı incelenmiştir. Takip eden sonuç bölümünde elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.



## 2. PROBLEM TANIMI VE FORMÜLASYON

### 2.1. Problem Tanımı

Ele aldığımız problem, devinimli envanterlerin revizyonlarının planlanması ve işgücü kapasitesi planlama probleminin entegrasyonudur. Bir BO şirketinin, planlama ufku boyunca birden fazla devinimli envanter tipi için devinimli stok takas talebi çizelgesiyle karşı karşıya olduğunu varsayıyoruz. Talep çizelgesi, çok tipli devinimli modüller için son takas tarihlerini ifade etmektedir. BO firması, müşteri tarafından belirlenen son takas tarihine kadar veya izin verilen üst sınır ölçüsünde bu tarihten daha önce devinimli modülün takas talebini karşılamalıdır. Belirtilen tarihten daha önce gerçekleştirilen takaslar havayolu firmaları tarafından tercih edilmemektedir. Revizyon kapasitesi, işgücü seviyesiyle sınırlıdır ve BO firması, işgücü seviyesini ancak planlama ufkundaki belirli dönemlerde belirli bir maliyete katlanarak değiştirebilir, örneğin, her çeyrek yılda. Revizyonlar, gün içerisinde daha fazla çalışma saati (adam-saat) gerektiren hızlandırılmış (expedited) modda veya göreceli daha az çalışma saati gerektiren normal (regular) modda gerçekleştirilebilir.

Bizim problemimiz Ertogral vd. (2015)'nin işgücü kapasite planlamasını dikkate alınmadığı ve devinimli envanterler için başlangıçtaki envanter düzeylerini karar değişkeni değil, parametre olarak kabul ettikleri çalışmanın önemli bir uzantısıdır. İşgücü kapasitesinin üretim planlamada önemli bir maliyet faktörü olduğu gerçeği gerçek hayattaki senaryolarda önemli bir noktadır. Bu nedenle, işgücü kapasite planlamasının, revizyon üretim planlaması ile birlikte ele alınması Ertogral vd. (2015)'nin kullandığı modelin önemli bir uzantısı olarak düşünülmelidir. Ayrıca gerçek üretim senaryolarındaki benzer şekilde bazı işlerin, bizim problemimizdeki revizyonların, ilave işçi çalışma saatleri tahsis edilerek hızlandırılmış modda gerçekleştirilebilmesi de ele alınan ilave bir detaydır. Bunu modellemek için, problemimizde iki tip revizyon türü tanımladık; normal (regular) ve hızlandırılmış (expedited). Hızlandırılmış revizyonlar, normal moda göre daha kısa sürede tamamlanabilirken bu tip işlem için tahsis edilen işgücü (adam-saat) daha fazla

olmaktadır. İşgücü kapasitesi planlamada fazla mesai pratikte yaygın olarak kullanılan bir diğer seçenektir ve bu sebeple modelimiz belirli bir üst limite kadar fazla mesai alternatifini de içermektedir. Modelimizdeki bir diğer önemli farklılık, her tip için başlangıçtaki devinimli envanter seviyelerini karar değişkenine dönüştürmektir. Başlangıçtaki devinimli envanter seviyeleri, hem revizyon planlaması hem de toplam maliyet üzerindeki etkileri açısından önemlidir.

Genişletilmiş modelin son ve en önemli farkı, amaç fonksiyonudur. Ertogral vd. (2015)'nin problemindeki temel amaç, devinimli envanter takaslarının izin verilen son tarihlerde veya mümkün olduğunca yakınında yapılmasını sağlamak ve buna bağlı olarak da takas için gelen taleplerin erken çağrılmasını minimize etmektir. Bizim önerdiğimiz matematiksel modelin amacı ise planlama ufku boyunca envanter ve işgücüne bağlı toplam maliyetin en küçüklenmesidir. Toplam maliyet; devinimli modülleri stokta tutma, işçilerin normal ve fazla mesai ücretleri ve izin verilen periyotlarda iş gücü seviyesi değişimlerinden kaynaklanan maliyet kalemlerini içermektedir. Herhangi bir takas için erken çağırma durumu için ise azami bir üst sınır ile kısıtlama yapılmıştır.

## **2.2. Modelleme Yaklaşımı**

Genel yaklaşım olarak, ele alınan problem sonlu periyotlu bir planlama ufku göz önüne alınarak modellenmiştir. Planlama ufkunda iki tip zaman penceresi bulunmaktadır: Küçük ve büyük zaman pencereleri. Bir saat, bir gün veya bir hafta olabilen küçük zaman pencereleri, devinimli modüllerin revizyon işlemlerinde ve takas değişim çizelgesinde kullanılmıştır. Problemden küçük zaman pencereleri olarak adlandırdığımız periyotlar gün olarak belirlenmiştir. Periyodun birimi kullanıcı tarafından değiştirilebilir; örneğin hafta, ay veya yarım gün gibi alınması mümkündür. Buradaki önemli nokta talep tarihlerinin ve revizyon süresinin aynı birim periyot cinsinden olmasıdır. Çeyrek yıl, 6 ay veya bir yıl olabilen büyük zaman pencereleri ise iş gücü seviyesinin sabit kaldığını düşündüğümüz zaman aralıklarıdır ve iş gücü seviyesinin sadece büyük zaman pencerelerinin başlangıcında değişimine izin verildiği varsayılmıştır. Problemimizde büyük zaman pencereleri çeyrek yıl (3 ay) olarak belirlenmiştir ve işgücü seviyesinin değişimine her çeyrek yıllık dönemin ilk gününde izin verilmektedir.



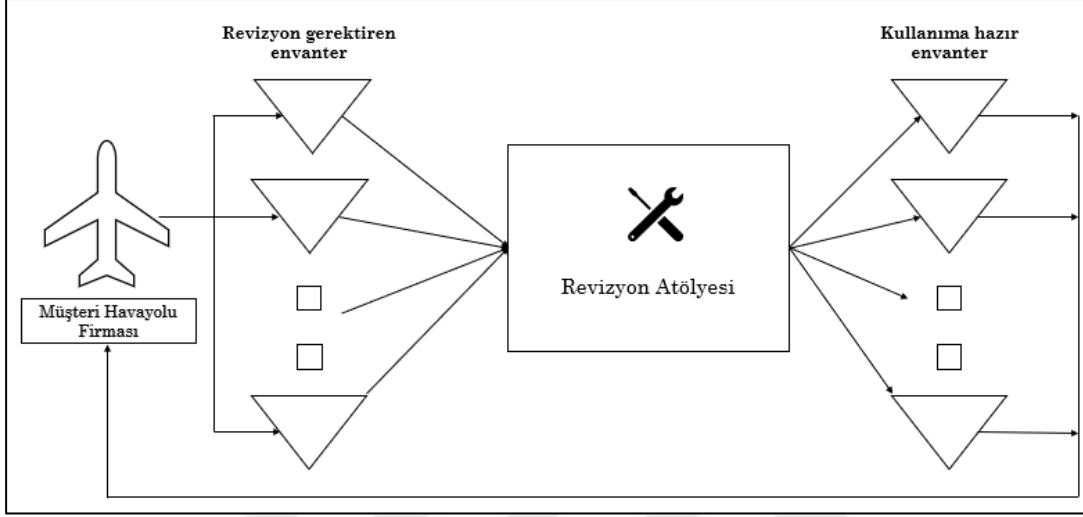
$T_{max}$ , planlama ufkundaki gün sayısını belirtsin ve  $T = \{0, \dots, T_{max}\}$  de periyotlar kümesi olsun. Büyük zaman penceresi olarak çeyrek yıllık (3 aylık) dönemler kullanılmıştır ve planlama ufkunda çeyrek yıllık dönemlerin sayısı  $n$  adettir. Her yılın 360 günden, dolayısıyla her çeyrek yılın da 90 günden oluştuğu varsayıldığında iş gücü seviyesinin değişimine izin verilen periyotlar kümesi  $C = \{1, 91, 181, \dots, 90n + 1\}$  olacaktır. İşgücü seviyesinin değişimine her çeyrek yıllık dönemin ilk gününde izin verilmektedir.

Bu problemde temel girdi olarak, belirli bir periyot içinde taleplerin karşılanabileceği son tarih ile ilgili bilgiler ve hem normal hem de hızlandırılmış modlar için revizyon işlem süreleri kullanılmıştır. Envanter tiplerine göre revizyon süreleri değişkenlik gösterir. Bununla beraber aynı tip envanter için revizyon süresi eşit ve sabittir. Bu kısımda üretim hattında meydana gelebilecek değişiklikler envanterin bakım süresini değiştirmeyecektir.  $J_{max}$  farklı tipte devinimli envanter sayısını belirtsin ve  $J = \{1, \dots, J_{max}\}$  de farklı tipteki envanterler kümesi olsun. Planlama ufkunda  $j \in J$  tipi devinimli envanterler için son değişim tarihlerinin kümesi ise  $I(j)$  olarak tanımlanmıştır.

Planlama ufkunda herhangi bir günde, devinimli stok envanteri sistemde üç durumda bulunabilir; takas edilmeye hazır, tamir bakım sürecinde veya tamir bakım bekler durumda. Her takasta, takasa hazır bekleyen envanter bir azalır ve tamir bakım bekleyen envanter uçaktan çıkartılan modül nedeniyle bir artar. Ayrıca takasa hazır envanter, her periyot tamir bakımı biten envanter kadar artacaktır. Devinimli stokun hareketi ve sistem Şekil 2.1’de gösterilmiştir.

Optimizasyon modeli, her tip devinimli envanterden başlangıçta ne kadar bulunması gerektiğine, takas taleplerinin hangi periyotta karşılanacağına, her periyotta normal ve hızlandırılmış modlarda her devinimli envanter tipi için kaç adet revizyon işleminin başlayacağına, her çeyrek yıllık dönem boyunca çalışacak işçi sayısına ve her periyotta ne kadar fazla mesai yapılacağına karar vermektedir. Model envanter seviyesi dengesi, işgücü kapasitesi ve takas taleplerini karşılama kısıtlamalarına sahiptir. Envanter denge kısıtlamaları, takas edilmeye hazır ve tamir bakım bekleyen envanterler için geçerlidir. İşgücü kapasite kısıtları ise bir günde adam-saat cinsinden kullanılan toplam kapasitenin o günkü normal çalışma ve belirli bir limite kadar

müsaade edilen fazla mesai saatlerinden oluşan mevcut kapasiteyi aşmamasını sağlamaktadır. Takas talepleri müşteri tarafından belirlenen son değişim gününe kadar izin verilen maksimum erken teslim edebilme limitini de göz önünde bulundurarak gerçekleştirilmelidir.



Şekil 2.1: Devinimli stok akış sistemi

### 2.3. Problemin Formülasyonu

Havayolları BO servisleri için önerdiğimiz revizyon çizelgeleme ve işgücü kapasitesi planlama bütünleşik modeli aşağıda verilmiştir.

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{En Küçük} \quad TC = \sum_{j \in J} (h_j * S_j) + \sum_{t=1}^T [C_W * W_t + C_O * O_t] + \sum_{t \in C} [C_H * G_t + C_F * F_t]$$

Öyle ki;

$$\sum_{t=1}^{d_{ji}} X_{jit} = 1 \quad \forall j, \forall i: j \in J, i \in I(j) \quad (2.1)$$

$$\sum_{t=d_{ji}+1}^T X_{jit} = 0 \quad \forall j, \forall i: j \in J, i \in I(j) \quad (2.2)$$

$$B_{jt} = B_{j,t-1} + \sum_{i \in I(j)} X_{jit} - (Y_{jt}^1 + Y_{jt}^2) \quad \forall j, \forall t: j \in J, t = 1, \dots, T \quad (2.3)$$

$$H_{jt} = H_{j,t-1} - \sum_{i \in I(j)} X_{jit} + Y_{j,t-p_j^1}^1 \quad \forall j, \forall t: j \in J, t = p_j^1, \dots, (p_j^2 - 1) \quad (2.4)$$

$$H_{jt} = H_{j,t-1} - \sum_{i \in I(j)} X_{jit} + (Y_{j,t-p_j^1}^1 + Y_{j,t-p_j^2}^2) \quad \forall j, \forall t: j \in J, t = p_j^2, \dots, T \quad (2.5)$$

$$H_{jt} = H_{j,t-1} - \sum_{i \in I(j)} X_{jit} \quad \forall j, \forall t: j \in J, t = 1, \dots, (p_j^1 - 1) \quad (2.6)$$

$$\sum_{j \in J} \left[ \sum_{n=t-p_j^1+1}^t a_j^1 * Y_{jn}^1 + \sum_{n=t-p_j^2+1}^t a_j^2 * Y_{jn}^2 \right] \leq r * W_t + O_t \quad \forall t: t = 1, 2, \dots, T \quad (2.7)$$

$$\sum_{j \in J} z_j * S_j \leq D \quad (2.8)$$

$$O_t \leq \beta * (r * W_t) \quad \forall t: t = 1, 2, \dots, T \quad (2.9)$$

$$(d_{ji} - t) * X_{jit} \leq \text{MaxEarliness} \quad \forall i, \forall j, \forall t: i \in I(j), j \in J, t = 1, 2, \dots, T \quad (2.10)$$

$$W_t + F_t = W_{t-1} + G_t \quad \forall t \in C \quad (2.11)$$

$$W_t = W_{t-1} \quad \forall t: t = 1, \dots, T \text{ and } t \notin C \quad (2.12)$$

$$H_{j0} = S_j \quad \forall j \in J \quad (2.13.a)$$

$$B_{j0} = 0 \quad \forall j \in J \quad (2.13.b)$$

$$Y_{j0}^1 = 0 \quad \forall j \in J \quad (2.13.c)$$

$$Y_{j0}^2 = 0 \quad \forall j \in J \quad (2.13.d)$$

$$W_0 = w \quad (2.14)$$

$$X_{jit} \in \{0, 1\} \quad \forall i, \forall j, \forall t: i \in I(j), j \in J, t = 1, \dots, T \quad (2.15)$$

$$Y_{jt}^1, Y_{jt}^2, H_{jt}, B_{jt}, W_t, G_t, F_t, S_j \geq 0 \text{ ve tamsayı} \quad \forall j, \forall t: j \in J, t = 1, \dots, T \quad (2.16)$$

$$O_t \geq 0 \quad \forall t: t = 1, \dots, T \quad (2.17)$$

Modelin amaç fonksiyonu, envanterleri stokta tutma, normal ve fazla mesai işçilik ücretleri ve izin verilen dönemlerde işe alma/işten çıkarma gibi maliyet faktörlerinin toplamının en küçüklenmesidir. Takas politikası sebebi ile sistemde her zaman ya takas edilmeye hazır ya da tamir bakım sürecinde  $S_j$  adet devinimli envanter bulunmaktadır. Bu sebeple BO firması planlama ufku boyunca her tip devinimli envanter için  $h_j * S_j$  kadar envanterde tutma maliyetine katlanmaktadır. Kısıt (2.1) ve (2.2) her tip envanterin, her talebinin, o talep için daha önceden belirlenmiş olan son değişim gününe kadar karşılanmasını ve değişimini sağlarken aynı zamanda bu belirlenen son değişim gününden sonra da takas yapılmasını engellemektedir. Kısıt (2.3),  $t$ . periyotta revizyon bekleyen  $j$ . tip envanterlerin sayısını belirlemektedir. Burada bir önceki periyotta revizyon bekleyen envanter sayısına, içinde bulunulan periyotta gelen talep eklenir ve bu miktardan hızlı ve normal modlarda revizyona başlayan envanter sayısı çıkartılır. Bu işlem her tip için her dönemde uygulanmaktadır. Kısıt (2.4) - (2.6) değişime hazır stok dengesi kısıtlarını ifade etmektedir. Kısıt (2.6)  $j$  tipinden  $t$  anındaki hazır stok miktarını belirlemek için kullanılmaktadır. Burada bir önceki periyotta  $j$  tipi için eldeki hazır stoktan, o periyotta  $j$  tipinden takas yapılması halinde envanterden düşülür. Bu kısıttaki önemli nokta  $j$  tipi envanter için hızlı moddaki revizyon süresinin, içinde bulunulan periyottan büyük olmasından dolayı revizyon hattından revizyonu bitip çıkan ve hazır hale gelen herhangi bir  $j$  tipi envanter olmamasıdır. Yani  $p_j^1$ 'ye kadar geçmişte başlamış hiçbir revizyon tamamlanamaz. Kısıt (2.4) ve (2.5) ise, (2.6) daki gibi kullanıma hazır envanter dengesini, bulunulan periyot  $t$ 'nin hızlı ve normal modda revizyon sürelerinden fazla olması durumu için yansıtır. İçinde bulunulan periyot  $t$  düşünüldüğünde, Kısıt (4)'te daha önceden hızlı modda revizyona giren, Kısıt (2.5)'te ise hem hızlı hem de normal modda revizyona giren  $j$  tipli bir ürün revizyon hattından çıkabilecektir ve hazır stoka revizyondan çıkmış  $j$  ürününün girmesi sağlanır. Kısıt (2.7) her periyottaki hızlı ve normal moddaki revizyonlar için kapasite kısıtını ifade etmektedir. Herhangi bir  $t$  periyodunda,  $(t - p_j^1 + 1)$ 'den  $t$ 'ye kadar

hızlandırılmış modda devam eden revizyonların ve  $(t - p_j^2 + 1)$ 'den  $t$ 'ye kadar normal modda devam eden revizyonların kullandığı işgücü kapasitesi (adam-saat) o periyottaki maksimum işgücü kapasitesinden fazla olamaz. Devininimli envanter tipleri için başlangıçta hazır bulunması gereken stokların satın alınmaları için belirli bir bütçe sınırı vardır ve bu bütçe kısıtı (2.8) numaralı kısıt ile sağlanmaktadır. Kısıt (2.9) ile her periyot  $t$ 'deki fazla mesailer için bir üst limit belirlenmiştir. Müşterilerin hangi tarihlerde çağrılacağına karar vererek, erken çağırmanın minimize edilmesi Kısıt (2.10) ile sağlanmaktadır. Kısıt (2.11) - (2.12) her periyot  $t$ 'deki işçi sayısı dengesini ifade etmektedir. Bu kısıtlar ile sadece izin verilen periyotlarda işçi alımı ve işçi çıkarımına izin verilmesi sağlanmaktadır. Diğer periyotlarda işçi sayısı sabit kalmaktadır. Bizim problemimizde izin verilen periyotlar üç aylık (çeyrek) dönemlerin başı olarak kullanılacaktır. Kısıt (2.13) - (2.14) takasa hazır envanterlerin, revizyona bekleyen envanterlerin, revizyondaki envanterlerin, işçi sayısı, işe alınacakların ve işten çıkarılacakların planlama dönemi başlangıç değerlerini ifade etmektedir.

#### **2.4. Problemin Karmaşıklığı**

**Önerme 1.** *Devinimli modüller için işgücü kapasitesi ve revizyon planlama problemi (DMİKRPP) NP-Zor problemidir.*

Önerme 1'in ispatı, literatürdeki kutu paketleme probleminden indirgeme yöntemi ile yapılmıştır.

**Önerme 1'in İspatı:** Bu çalışmada ele alınan problemin, E.G. Coffman vd. (1996) tarafından NP-Zor olduğu kanıtlanan "Tek Boyutlu Kutu Paketleme Karar Problemi (TBKPKP)"ne polinom zamanlı indirgenmesiyle NP-Zor olduğunu göstermekteyiz.

"Tek Boyutlu Kutu Paketleme Karar Problemi"nde farklı hacimlerdeki nesnelere, kullanılan toplam kutu miktarını en aza indirecek şekilde eşit hacimli sonlu sayıdaki kutuya veya konteynere paketlenmelidir. Problemimizi göz önünde bulundurarak, bazı varsayımlar altında, mevcut problem polinom zamanda kutu paketleme problemine dönüştürülebilmektedir.

Bu indirgemenin ardındaki temel fikir, problemimizdeki çeyrek yıllık periyot kümelerinin kutu paketleme problemindeki kutular olarak kabul edilmesiyle DMİKRPP'in bir örneğini oluşturmaktır. Planlama ufkunun  $k$  adet çeyrek yıllık kümelerden oluştuğu farz edilerek, gerekli revizyonlar, normal mesai çalışan sayısının bu dönemler boyunca sabit kaldığı  $k$  adet dönemlere sığdırılmaya çalışılmaktadır. Tek tip devinimli envanter olduğu kabul edilerek ilgili parametrelerden devinimli envanter indisini kaldırılmıştır. Başlangıç envanter miktarı olan  $S$ ,  $b$  olarak, planlama ufkunda talep edilen takas miktarı da  $N$  olarak belirlenmiştir. Böylece, planlama ufku içerisinde  $N - b$  tane revizyon gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Polinom zamanda, ancak ve ancak TBKPKP'nin ilgili örneğinin optimal amaç fonksiyonu değeri sıfır ise, DMİKRPP örneğinin cevabı Evet olacaktır.

Oluşturduğumuz örnekteki parametreleri uygun bir şekilde ayarlayarak;

1. Eşit sayıda normal mesaide çalışan işçi ve sıfır toplam normal mesai maliyeti ile ya da
2. Toplam maliyeti sonsuz hale getirecek olan normal mesaide çalışan işçi sayısını arttırarak ve/veya bazı günlerde fazla mesai ile işçi çalıştırarak

revizyon gerekli tüm takas talepleri  $k$  tane çeyrek yıllık dönemde gerçekleştirilmeye çalışılmıştır.

Yukarıda anlatılan DMİKRPP'in örneği için ilgili tüm parametre varsayımları şöyledir:

$|J|=1$ ,  $S=b$ ,  $|I|=N$ ,  $\{d_i=|T|, i = \{1,2,\dots,N\}\}$ ,  $C_H = C_O = \text{Max}_{\text{Earliness}}=\infty$ ,  $C_w=0$   $C_F=0$ ,  $W_0 = w_c$ ,  $h=0$ ,  $p^1=90$  gün (1 çeyrek yıl),  $p^2=\infty$  gün.

$b$ 'nin yeterince yüksek bir değeri için bu örneğin olurlu bir çözümünün her zaman olacağı unutulmamalıdır. Yukarıda belirlenen parametrelere göre amaç fonksiyonu  $\sum_{t=1}^T [\infty * O_t] + \sum_{t \in C} [\infty * (G_t + F_t)]$ 'a indirgenecektir. Dolayısıyla, amaç fonksiyonunun optimal değerine OPT denilecek olursa, eğer fazla mesai ve işgücü seviyesindeki değişim optimal çözümde 0 ise OPT de sıfır olacaktır, aksi taktirde OPT sonsuz olacaktır.

Maksimum erkenlik parametresi  $\infty$  ve tüm takasların son değişim günü ( $d_i$ ) planlama ufkunun son günü olduğundan planlama ufkunun herhangi bir gününde revizyona başlanabilmektedir. Bir çeyreğin ortasında revizyonun başladığı herhangi bir çözüm verildiğinde, tüm revizyonun, revizyonun başladığı çeyreğin başlangıcına veya bir sonraki çeyreğin başına kaydırılmasıyla, aynı veya daha iyi bir amaç fonksiyonu değerine sahip çözüm bulunabilir. Eğer revizyon bir çeyreğin ortasında başlarsa, hem mevcut hem de sonraki çeyreklerde çalışan sayısının artmasına neden olabilir. Bu nedenle, tüm revizyonların çeyrek yıllık dönemlerin başlangıcında başladığı bir optimal çözüm her zaman vardır.

Yukarıda kurgulanan problem örneği çözüldüğünde,  $N - b$  tane revizyon,  $k$  tane çeyrek yıllık döneme ya her dönemde  $w_c$  tane normal mesai işçi ve sıfır fazla mesai ile sığdırılabilir ve  $OPT=0$  olacaktır ya da bazı dönemlerde fazla mesai süresini ve/veya normal mesai çalışan sayısını arttırmak suretiyle  $OPT=\infty$  olduğu durumda sığdırılmış olur. Dolayısıyla, DMİKRPP örneğinin  $OPT$  değeri sıfır ise, karşılık gelen ilgili TBKPKP örneğinin yanıtı Evet'tir,  $OPT=\infty$  ise cevap Hayır'dır.□

## 2.5. Geliştirilen Geçerli Eşitsizlikler

Geçerli eşitsizlikler (valid inequalities) olurlu alanı daraltarak sınırları dışbükey örtüye yaklaştırırlar. Olurlu bölgedeki olurlu noktaları kesmedikleri için amaç fonksiyonu değerini kötüleştirmezler, ancak problemi zorladıkları için zaman kısıtlı problemlerde daha kötü sonuçlar verebilmektedirler (Wolsey (1998)).

Problemimizin çözümü için kurulan karma tamsayılı programlama modeli için 2 adet geçerli eşitsizlik üretilmiştir. Bu eşitsizlikler 2.18 ve 2.19 da verilmiştir. (2.18) numaralı eşitsizlik; her  $j \in J$  tipi devinimli envanter için  $t' \in T$  anına kadarki normal ve hızlandırılmış modda revizyona başlayan modüllerin toplam sayısının, o tip envanter için  $t'$  anına kadarki takasların toplam sayısından fazla olamayacağına karşılık gelmektedir.

$$\sum_{t=1}^{t'} Y_{jt}^1 + Y_{jt}^2 \leq \sum_{t=1}^{t'} \sum_{i \in I(j)} X_{jit} \quad \forall (t', j): j = 1 \dots J, t' = 1 \dots T \quad (2.18)$$

$$\sum_{t=1}^{d_{ji}} \sum_{a=1}^{i+1} X_{jat} \geq i \quad \forall (j, i): j = 1 \dots J, i \in I(j) \quad (2.19)$$

(2.19) numaralı eşitsizlik ile her  $j \in J$  tipi devimli envanterin  $i \in I(j)$ nci takas talebi için  $d_{ji}$  anına kadar geçen sürede  $i + 1$ . talebin takasına kadar  $i$  adet takasın gerçekleştirilmesi sağlanmaktadır. Bu eşitsizliklerin doğruluğu ve geçerliliği önerilen model kullanılarak nümerik olarak kontrol edilmiştir. Ancak bu eşitsizlikler problemin sezgisel çözüm yöntemi olarak seçilen sabitle ve optimize et metodunda kullanılmamışlardır.





### 3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu kısımda ele alınan problem ve çözüm yöntemini içeren literatür çalışmaları anlatılacaktır. İlk önce BO sektörünün literatürdeki yerinden, bu sektördeki envanter ve işgücü kapasitesi planlama problemlerinden, daha sonra problemimize uygulanan çözüm yöntemi olan sabitle ve optimize et metoduyla ilgili literatürdeki önemli çalışmalardan bahsedilecektir.

#### 3.1. Bakım Onarım Revizyon

Geçtiğimiz birkaç on yıl boyunca, BO aktiviteleri hakkında önemli miktarda araştırma yapılmıştır. Literatürdeki ilk çalışmalar daha çok bir firmanın kendi bakım faaliyetlerinin planlanmasına yöneliktir. Bu konuda yapılan çalışmalarının oldukça bilgilendirici bir özeti Dekker (1996) tarafından rapor edilmiştir. Dekker, BO sektöründe karar vermeyi destekleyecek araç ve optimizasyon metotlarının seksenli ve doksanlı yıllarda sınırlı olduğunu belirtirken, gelişen teknik sistemler ve rekabet dolayısıyla gelecek yıllarda BO servis optimizasyonuna daha fazla önem verileceğini tahmin etmiştir.

BO sistemlerinde planlama problemi üzerine yapılan araştırmaların büyük kısmı, bileşen ve yedek parça envanter yönetimine odaklanmaktadır (MacDonnell ve Clegg. (2011), Van Jaarsveld vd. (2012)). Diğer bir araştırma kolu, MacDonnell ve Clegg (2011), Van Jaarsveld vd. (2012), Gu vd. (2015)'nin çalışmalarında ele aldığı MRO faaliyetlerinde maliyet ve duruş sürelerinin en aza indirilmesi ile stok kontrolüdür. Tedarik zincirlerindeki taraflar arasındaki entegrasyon modelleri ise MacDonnell ve Clegg (2007) ve Kilpi vd. (2009)'in çalışmalarında literatürde karşımıza çıkmaktadır.

Araştırmamıza göre devinimli envanter kontrolünü ele alan ve bu problemi BO firması açısından operasyonel seviyede ilk inceleyen çalışma Rupp vd. (2000) olmuştur. Bu çalışmada talep gelişleri Poisson proses olarak modellenmiş ve stokastik sistemin analizi simülasyon kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma sadece stok yönetimine odaklanmaktadır ve talep yönetimini veya üretim planlamasını

dikkate almamaktadır. Herhangi bir masraf analizi yapılmamış, servis seviyelerine odaklanılmıştır. İlgili bir çalışmada, Romo ve Erkoç (2013), problemi devinimli stoklar ve rastgele talep varışlarıyla gelir maksimizasyonunu amaçlayan şekilde ele almıştır. Çalışmalarında analitik bir model kullanarak envanter ve kapasite seviyelerine karar verilmiştir. Birçok küçük parça için BO şirketine talep gelişleri büyük ölçüde rassal olabilir. Fakat büyük devinimli modül bakım servislerinde talepler çoğunlukla randevu üzerinden olur ve genelde çok önceden bu devinimli modüllerin son BO servis tarihleri bilinir.

Bu tezde önerilen çalışmaya en yakın çalışmalar geçmişte Luh vd. (2005), Joo (2009), Joo ve Min (2011), Erkoç ve Ertogral (2015), Ertogral vd. (2015), Arts ve Flapper (2015) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmalar detaylı olarak açıklanacaktır.

Luh vd. (2005) matematiksel modelleme kullanarak eş zamanlı çizelgeleme ve devinimli envanter problemini çalışmışlardır. Ancak önerilen çalışmadan farklı olarak talep gelişlerini ve bakım onarım sürelerini stokastik veri olarak almışlar ve müşterilere randevu verme kararını modele dahil etmemişlerdir. BO servisini konvansiyonel şekliyle ele almışlardır. Yani çalışmaları takaslama sistemi temelinde yapılmamıştır. Çizelgeleme daha çok servis faaliyetlerinin planlanmasına yöneliktir. Ayrıca ele alınan modelde servisin son tarihi geçmesi cezaya tabi olarak olurlu görülmüştür. Bu çalışmada araştırmacılar Lagrangean gevşetme tekniğine bağlı çözüm algoritmaları önermektedirler. Biz önerdiğimiz modelin amacına, envanter tutma maliyetine ek olarak işgücüne bağlı maliyetleri de dahil etmekteyiz ve model, belirli bir erken takas limiti ile birlikte herhangi bir gecikmeye izin vermemektedir. Talebin geliş süreci ve kararların türleri ve çözümü açısından, bu çalışma modelimizden oldukça farklıdır. Envanter seviyesi veri olarak (exogenous) alınmış ve karar sürecine dahil edilmemiştir. Ayrıca çok tipli devinimli modül ve bunların paralel bakımının yol açtığı kapasite kısıtları da çalışmaya dahil edilmemiştir.

Joo (2009) çalışmasında tek tip devinimli envanter takaslarının çizelgelenmesi için toplam erken teslimin (erkenlik) en küçüklenmesini amaçlayan problemi ele almıştır. Bizim problem tanımımıza benzer şekilde, devinimli modülün, bilinen son teslim tarihlerine göre benzer filodaki devinimli envanterlerle takası planlanmaktadır. Takaslar, ilgili son teslim tarihinden daha geç olmamak üzere programlanmıştır.

Envanter seviyesi veri olarak alınmış ve karar sürecine dahil edilmemiştir. Belirli bir başlangıç devinimli envanter seviyesi için, yazar takas zamanlarını ve revizyon sürecini optimize eden bir polinom zamanlı algoritma önermektedir. Çizelgenin oluşturulması, yalnızca devinimli envanter seviyesinin kullanılabilirliği ile sınırlıdır. Ayrıca çok tipli devinimli modül ve bunların paralel bakımının yol açtığı iş gücü kapasite kısıtları da çalışmaya dahil edilmemiştir. Bir başka makalede (Joo ve Min (2011)), bu modeli, bir bütçe kısıtlaması ile devinimli envanter kararını dahil ederek genişletmektedir. Son takas tarihi ve bütçe kısıtlamalarının yumuşak kısıtlar olarak alındığı bir hedef programlama yaklaşımı kullanılmıştır. Elde edilen çok amaçlı model, doğrudan bir ticari çözücü ile çözülerek bu kısıtlamaların ihlalini en aza indirmeyi amaçlayan ağırlıklandırılmış bir amaç fonksiyonu kullanmışlardır. Biz çalışmamızda, işgücü kapasite planlamasını, çoklu tip devinimli envanterler ile çizelgeleme problemine açıkça dahil ederek pratikteki uygulamalara daha da yakınlaştırmaktayız.

Daha yakın tarihli bir çalışmada, Erkoc ve Ertogral (2015), tek tip devinimli envanterin olduğu ve optimal çözümü elde etmek için kesin bir algoritma önerdikleri bir problem ile ilgilenmektedir. Ancak, gerçek hayatta yaşanan problemlerde olduğu gibi, farklı revizyon süreleriyle birden çok devinimli envanter tipi olabilir ve ortak işlem kapasitesini paylaşırlar. Tek tip devinimli envanter varsayımının gevşetilmesi ve çoklu tiplerin dikkate alınması, hem modelleme hem de çözüm yaklaşımı açısından problemi önemli ölçüde karmaşıktır. Ertogral vd. (2015), Erkoc ve Ertogral (2015) 'daki modeli çok tipli devinimli envanter olarak genişletmiş ve yönetsel iç görülerle problemin sayısal analizini vermişlerdir. Her iki çalışmada da modelimizden farklı olarak işgücü kapasite planlaması dikkate alınmamakta ve başlangıç envanter seviyeleri karar değişkeni değildir. Bizim çalışmamızda ele alınan problemde amaç envanter ve işgücü ile ilgili maliyetleri en aza indirmeye çalışırken bahsi geçen iki çalışmada ele alınan problemlerde amaç toplam erkenliliği en aza indirmektir.

Arts ve Flapper (2015), bütünleşik üretim planlama (aggregated production planning - APP) modelini tanıtan oldukça yeni bir çalışmadır. APP, bir taktik planlama faaliyetidir ve bir firmanın planlama ufkunda işgücü kapasite seviyelerini nasıl değiştirmesi gerektiğine karar vermek, üretim (normal mesai, fazla mesai, taşeron

türleri) ve envanter seviyelerinin, çeşitli ürün ailelerinde bütünleşik birim cinsinden ne kadar olması gerektiğine karar vermekle ilgilidir. APP'nin en önemli noktası, işgücü kapasite seviyesi kararlarının önceden yapılması gerektiğidir ve bu kararlar, tek tek ürünlerin yerine bütünleşik birimlerin üretimine dayanabilir. (Silver vd. (1998) ve Nahmias (2009)). Arts ve Flapper (2015), uzun dönemli bir planlama ufkunda hem devinimli envanter hem de işgücü planlama kararlarını dikkate almaktadır. Model iki tip zaman penceresi kullanır; ay ve yıl. İşgücü kapasite seviyeleri sadece planlama ufkundaki yılların başında ilgili maliyetlere bağlı olarak değiştirilebilir. Ayrıca model, devinimli envanter taleplerinin tam zamanlamasını dikkate almaz, bunun yerine işgücü seviyelerini değiştirerek aylık toplam talebin karşılanmasına odaklanır. Bu çalışmada modelin amacı, araç filosunun yaşam döngüsü boyunca işgücü, malzeme ve stok maliyetleri gibi çeşitli maliyet faktörlerinin toplamını en küçükmektir. Model, bakım işlemleri için gereken toplam kapasiteyi sağlamak için her bir dönem için işgücü seviyelerini belirlemeye çalışır ve revizyonların tam olarak planlanmasını ve her bir talebin takasını sağlamaya çalışır. Problemin kapsamı şirkete ait olan ve belirli zaman aralıklarında BO servisi gerektiren belirli sayıda aracın bulunduğu bir şirketteki BO hizmetleri ile ilgilidir. BO'yu planlamada yaşam boyu maliyet kavramına odaklanılmıştır. Arts ve Flapper (2015)'in problem tanımı ile kıyaslandığında, modelimiz daha dar bir planlama ufkunda revizyon ve takas talepleri planlamasını, her bir talebi zamanında veya daha önce karşılamaya çalışan bir takas planı oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra, bizim çalışmamızda BO planlaması problemini herhangi bir müşteriye hizmet veren bir şirket için modelliyoruz ve sonlu bir planlama ufku için şirketin toplam işgücü ve envanter maliyetini en aza indirmeye çalışıyoruz. Son olarak, modelimiz, normal hızda revizyon hizmetine ek olarak işgücü hızının artırılmasıyla hızlandırılmış revizyon alternatifini de pratikte önemi olan bir seçenek olarak ele almaktadır.

Özetle, BO şirketlerindeki detaylı revizyon ve takas çizelgelemesini işgücü planlaması ile entegre eden problemimiz literatür için yeni bir problemdir.

### **3.2. Sabitle ve Optimize Et Metodu**

Tez kapsamında çalışılacak problemin çözümü için Sabitle ve Optimize Et (Fix and Optimize) metodunun performansı değerlendirileceğinden literatürde daha önceden

başka problemlerde uygulanan Sabitle ve Optimize Et metodu için literatür araştırmasına gidilmiştir.

Sabitle ve Optimize Et 2005 yılında Gintner vd. tarafından zaman-uzay şebekesi yaklaşımına dayalı çoklu depo ve araç tipi için otobüs çizelgeleme probleminde uygulanmıştır. Bu makale ile Sabitle ve Optimize Et metodunun uygulanış biçimi ve aşamaları öğrenilmiş ve tez kapsamında çalışılacak probleme nasıl uygulanacağı belirlenmiştir. Pochet ve Wolsey 2006 yılındaki çalışmalarında Gevşet ve Sabitle metodunu iyileştirmek için geliştirdikleri ve “takas (exchange)” adını verdikleri metodu üretim planlama problemleri üzerinde uygulamışlardır. Federgruen vd. 2007 yılında yayınladıkları makale ile Sabitle ve Optimize Et metodunun uygulanışını çok ürünlü, kapasiteli parti büyüklüğü belirleme problemleri üzerinde göstermişlerdir. Helber ve Sahling 2010 yılında aynı algoritmanın dinamik çok seviyeli, pozitif teslim süreli, kapasiteli parti büyüklüğü belirleme problemi için uygulanışını anlatmışlardır. Helber ve Sahling (2010) ve Sahling vd. (2009) literatürdeki Tempelmeier ve Derstroff (1996) ve Stadler (2003)'in çok seviyeli, kapasiteli parti büyüklüğü belirleme problemi çözümü için kullandıkları ve en iyi sezgisel çözüm yöntemi olarak bilinen metottan daha iyi sonuçlar elde ettiklerini çalışmalarında göstermişlerdir. Chen (2015) ise sabitle ve optimize et ve değişken komşu arama algoritmasını entegre ettiği bir yaklaşımla Helber ve Sahling (2010)'e göre iyileştirilmiş sonuçlar elde etmiştir. Dorneles vd.'nin 2014 yılındaki çalışmasında ise bizim problemimize benzer olarak ikili ve tamsayılı değişkenler mevcuttur. Yazarlar, yerel arama algoritmasına entegre edilmiş Sabitle ve Optimize Et metodunu kullanarak yöntemin verimliliğini analiz etmişlerdir. Önerilen yöntemin, yedi adet problem seti için en iyi bilinen çözümleri bulabildiklerini ve bunlardan 3 tanesinin de optimal sonuçlar olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, önerdikleri sezgiselin, 10 dakikalık bir sürede, CPLEX çözücüsü ile 10 saatlik hesaplama zaman sınırı olan kaba kuvvet çözümlerine kıyasla daha iyi sonuç verdiğini göstermişlerdir.

Literatürde sabitle ve optimize et metodunu uygulayanlar, sonuç olarak, büyük boyutlu ve NP-Zor olarak nitelendirilen problemleri sezgisel değişken sabitleme yöntemi ile birleştirerek karma tam sayılı optimizasyon yaklaşımına göre çok daha kısa sürede ve yüksek çözüm kalitesi ile çözümlerin mümkün ve olurlu olduğu sonucuna varmışlardır.

Sabitle ve Optimize Et metodunun tanımı ve aşamaları yukarıda incelenen makalelerdeki başarılı sonuçları nedeniyle tez kapsamında çalışılan probleme uygulanması uygun görülmüştür.



## 4. NÜMERİK ANALİZLER & YÖNETİMSEL ÇIKARIMLAR

Bu bölümde, sayısal deneylerde kullanılan problem setlerinin hangi yöntemlerle ve nasıl oluşturulduğundan bahsedilecektir ve sayısal deneylerin sonuçlarından elde edilen analizlere dayanan yönetimsel çıkarımlar açıklanacaktır.

Bu bölümde ele alınan problem setlerinin çözümü için Intel® Core™ i5-6200U CPU @ 2.30 GHz işlemci ve 12 GB RAM içeren bir makinede IBM IL00G CPLEX Studio IDE v.12.7.1 kullanılmıştır.

### 4.1. Problemlerin Üretimi

Sayısal analiz çalışmasında üç tip devinimli envanter içeren problemler kullanılmıştır. Bu problemler revizyon süreleri, planlama ufku, talepler arası süre itibariyle Amerika'daki bir BO şirketinin gerçek datasından esinlenilerek üretilmiştir. 5 adet rassal problem farklı parametre kümelerinde çözdürülmüştür.

Planlama periyodu olarak gün alınmıştır ve her problem 720 günlük (yaklaşık iki yıl) planlama ufku içermektedir. Her yılın 360 günden dolayısıyla her çeyrek yılın da 90 günden oluştuğu varsayılmıştır. Her bir tip devinimli envanter takas talep sayısı 720 gün boyunca 36 adettir ve toplamda dolayısıyla 108 takas talebi söz konusudur. Takas talepleri ile ilgili olarak Erkoc ve Ertogral (2016) 'da verilen duruma benzer sayıda takas talebi kullanılmıştır. Onların senaryosunda 5 yıllık planlama ufkunda 80 adet takas talebi söz konusudur. Revizyon amaçlı takası talep edilen modül bölgesel bir jet tipinin iniş takımıdır.

Bizim problemimizde 36 adet takas talebi kullanmamızın sebebi 2 yıldan 5 yıla orantılı olarak belirlenmiştir böylece gerçek durumdaki senaryonun talep yoğunluğu az çok temsil edilmiştir. 5 problem sadece içerdikleri talep serisi açısından farklıdır ve bu problemler üç tip envanter için olan takas taleplerinin (son) tarihlerinin, 720 günlük planlama ufkunda rassal olarak 1 ile 720 arası tek düze dağılıma uygun olarak dağıtılmasıyla oluşturulmuştur. Üretilen problem setleri EK 1'de verilmiştir.

Yukarıda bahsi geçen, sadece içerdikleri talep serisi açısından farklılık gösteren 5 problem 3 farklı envanter tutma maliyeti oranı ve 11 farklı maksimum erkenlik seviyesine göre çözülmüştür. Uluslararası Havayolu Taşımacılığı Birliği (2015) 'nde kullanılmakta olan yıllık envanter tutma maliyet oranları %7, %14 ve %20'dir. Aynı birlik çoğu havayolunun daha yüksek envanter tutma maliyet oranına ulaştığını hatta %20 seviyesini geçtiğini belirtmiştir. Kullanılan 11 farklı maksimum erkenlik ( $Max_{Earliness}$ ) seviyesi 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12 ve 14 gündür. 14 günün ötesinde bu kısıtlama yeterince gevşediği için sonuçlarda değişiklik olmadığı görülmüştür ve bu sebeple üst sınır olarak 14 gün belirlenmiştir. Böylece toplamda 165 ( $= 5 * 3 * 11$ ) farklı problem yarım saatlik (30 dakika) çözüm süresi kısıtı ile çözülmüştür ve tüm koşuturum sonuçlarının ortalama optimalden uzaklığı (gap) %1.85 olarak hesaplanmıştır.

Envanter haric diğer maliyet parametreleri 165 adet problemin hepsi için aynıdır. Her işçi başına günlük normal mesai ücretinin,  $C_W$ , bir BO hizmetleri işgücü araştırması sonucu saatlik yaklaşık 56\$ olduğu sonucuna varılmıştır (Derber (2017)). Saatlik fazla mesai ücreti hemen hemen tüm dünyada ortak olarak iş yasaları ve uygulama yönetmeliklerine göre normal saatlik mesai ücretinin 1.5 katı olarak hesaplanmaktadır. Fazla mesai için üst limit çarpanı,  $\beta$ , 0.25 olarak sabitlenmiştir. Wesselbaum (2014) 'da, ABD'de işten çıkarma maliyetlerinin üç aylık çalışma ücretlerinin %30'u olduğu tahmin edilmiştir. Bu tahminden yola çıkarak, bir işçinin işten çıkarılma maliyeti  $C_W * 90 * 0.30$  olarak belirlenmiştir. Bir işçiyi işe alma maliyeti de işten çıkarılma maliyetinin bir oranı (%60) olarak sabitlenmiştir. Standart bir iş günü boyunca işçilerin 8 saatlik normal mesai yaptığı varsayılmıştır ve başlangıç işçi sayısı 20 işçi olarak sabitlenmiştir.

Üç tip devinimli modül için revizyon süreleri, hızlandırılmış mod için sırasıyla (25, 15, 10) ve normal mod için (35, 25, 30) olarak gün cinsinden belirlenmiştir. Bu revizyon süresi parametrelerini belirlerken, Erkoc ve Ertogral (2017)'da verilen gerçek hayat senaryosu için belirlenen, tipik bir devinimli modül olan iniş takımı için 30 günlük bakım süresi dikkate alınmıştır. 5 vasıflı işçinin olduğu bir revizyon atölyesi ele alınacak olursa revizyon süreleri adam-saat cinsinden şu hesaplamalar ile elde edilebilir; örneğin, devinimli bir modül için normal moddaki revizyon süresinin 30 gün olduğu ve hızlandırılmış moddaki revizyon süresinin 10 gün olduğu



durumları dikkate alalım. 30 gün süreli normal moddaki revizyon süresi  $30 * 8 * 5 = 1200$  adam-saat ve  $a_j^2 = 8 * 5 = 40$  adam-saate eşdeğer olacaktır. Hızlandırılmış modda revizyon süresi 10 gün ise, belirli bir tip devinimli modülün hızlandırılmış moddaki revizyonu için günlük gerekli işgücü,  $a_j^1 = 1200/10 = 120$  adam-saat olarak hesaplanabilir. Bu şekilde, tüm devinimli envanter tipleri için  $a_j^1$  ve  $a_j^2$  parametreleri sabitlenmiştir.

Her tip devinimli modülden başlangıçta satın alabilmek için var olan bütçe parametresi  $D$ 'nin tüm problem setleri için olurlu bir çözüm bulunmasını sağlayacak kadar yüksek tutulması istenmiştir. Bunun için problem, oldukça yüksek envanter maliyetine zorlayacak parametre ayarları olan  $Max_{Earliness} = 0$  ve devinimli modülü günlük envantere tutma maliyet oranı  $hc_j = \%20$  ile bütçe kısıtlaması olmaksızın belirlenen problem setleri için çözülmüştür. Sonuçlardan elden edilen başlangıç envanter miktarları, satın alma maliyetleri ile çarpılarak tüm problemler için bütçe kısıtı olan  $D$ , 24 milyon dolar olarak sabitlenmiştir.

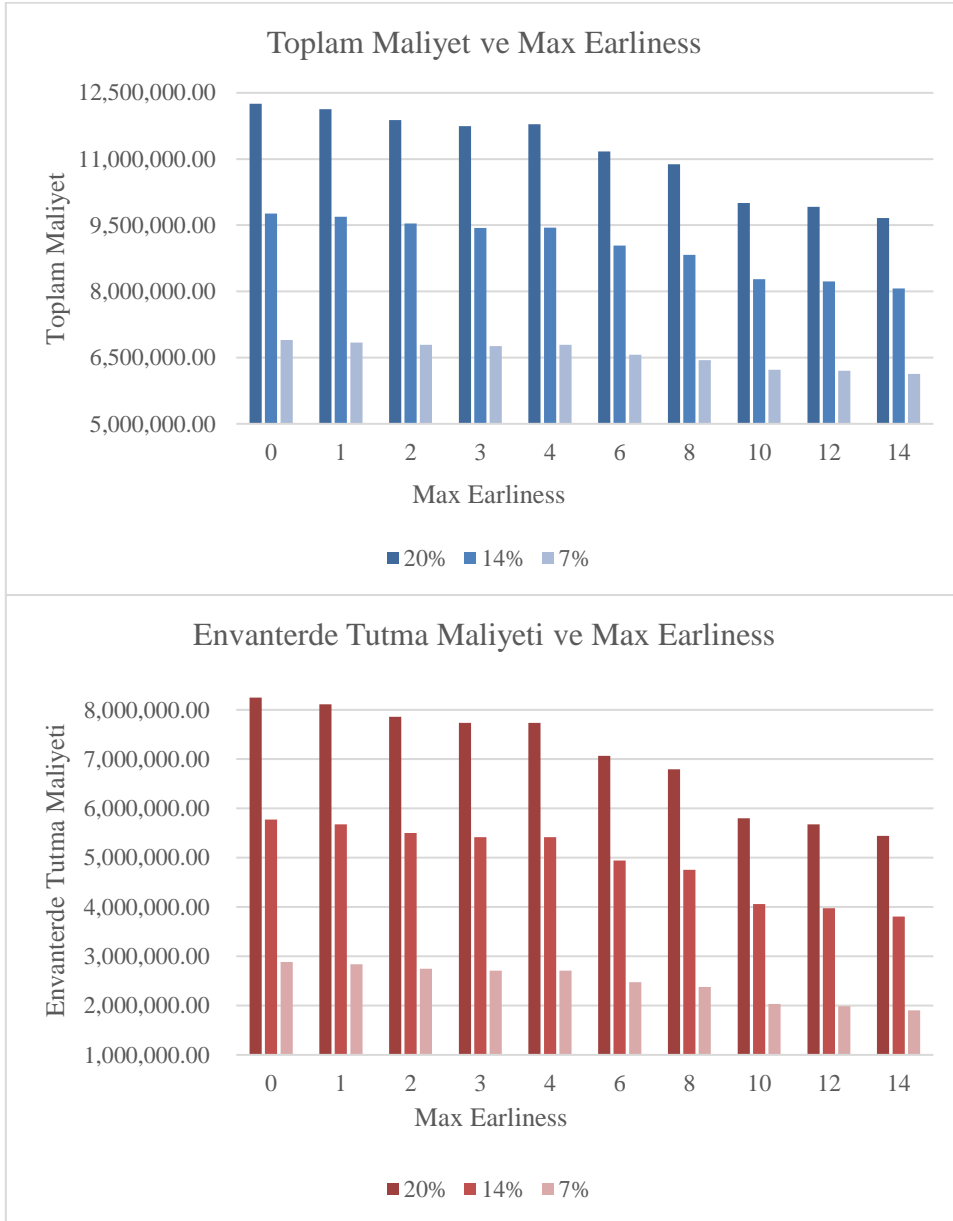
Çözülen problemlerin her bir örneği 77.868 tanesi (yaklaşık %87) ikili değişken olan 89.407 karar değişkenine ve 863,607 adet kısıta sahiptir.

#### 4.2. Analiz Sonuçları ve Yönetimsel Çıkarımlar

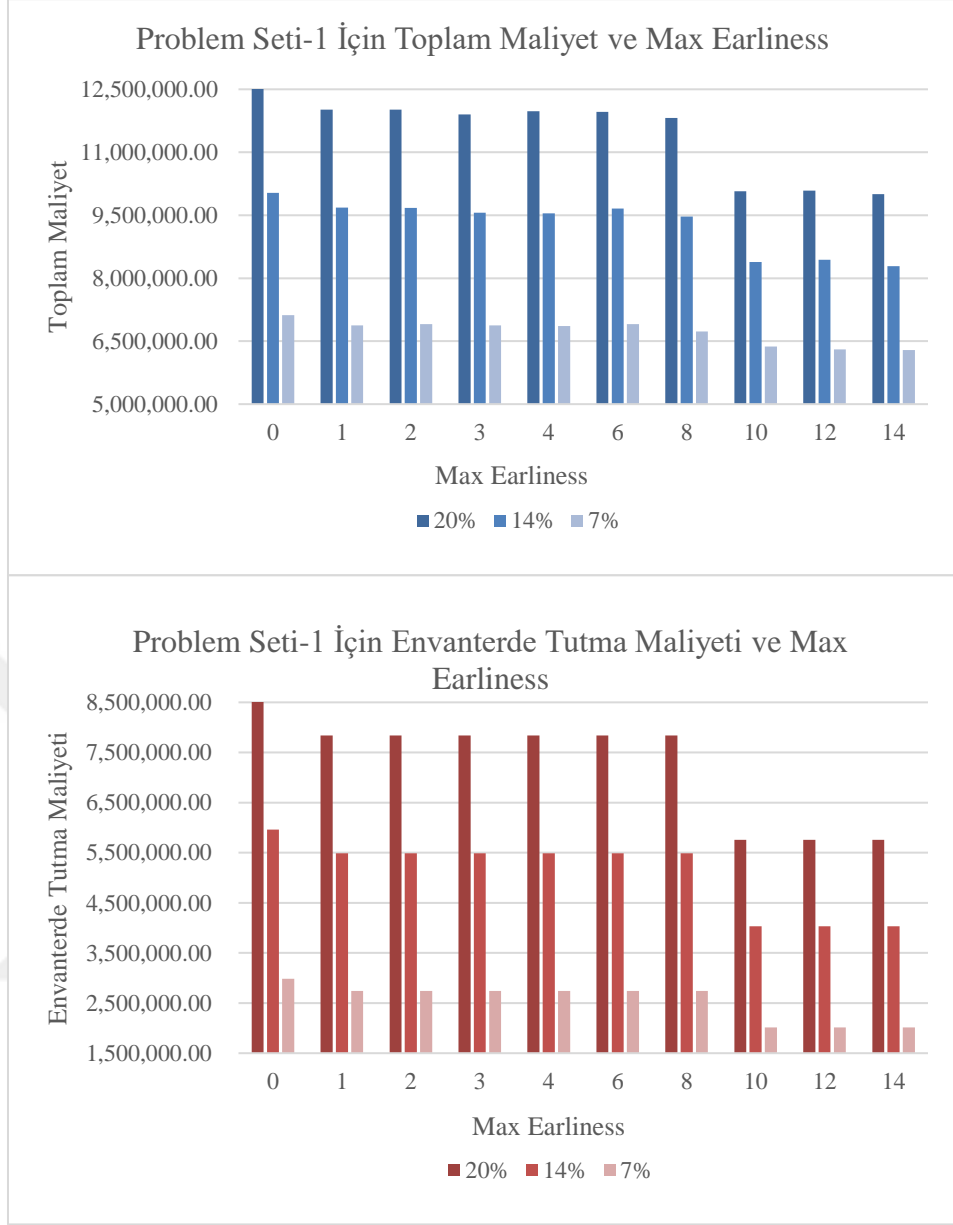
Sayısal analizlerde elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekillerde özetlenmiştir.

3 farklı envantere tutma maliyeti oranı ve 11 farklı maksimum erkenlik seviyesi için yapılan koşutrumlar sonucunda toplam maliyetin ve envantere tutma maliyetinin değişimleri Şekil 4.1'de görülmektedir. Grafikteki her çubuk son teslim tarihlerine göre rastgele farklılık gösteren 5 problem seti için elde edilen değerlerin ortalamasını temsil etmektedir. Şekil 4.2, örnek olarak problem seti-1 için aynı değerleri göstermektedir. Bu grafiklerden, son teslim tarihinden daha erken teslim edebilme süresinin maksimum değerinin ( $Max_{Earliness}$ ) artmasıyla, problem daha az kısıtlandığından amaç fonksiyonunda, beklendiği gibi, bir azalmaya neden olduğu görülmektedir. Şekil 4.1 ayrıca, envantere tutma maliyetinin yüksek olduğu durumlarda, amaç fonksiyonunun (toplam maliyet) ortalama değerinin maksimum erkenlik seviyesine bağlı olarak önemli bir düşüş sergilediğini göstermektedir.

Maksimum erkenlik seviyesi 0'dan 14 güne arttıkça toplam maliyetteki düşüş %7, %14 ve %20 oranındaki envantere tutma maliyetleri senaryolarında sırasıyla %21.1, %17.4 ve %11.1 dir. Toplam maliyeti yansıtan amaç fonksiyonu Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de görüldüğü üzere envantere tutma maliyeti ile çok yakından ilişkilidir. Daha önce de bahsedildiği gibi maksimum erkenlik seviyesi 14 günden fazla tutulduğunda toplam maliyetin değişmediği gözlemlendiği için 14 gün üst sınır olarak belirlenmiştir.



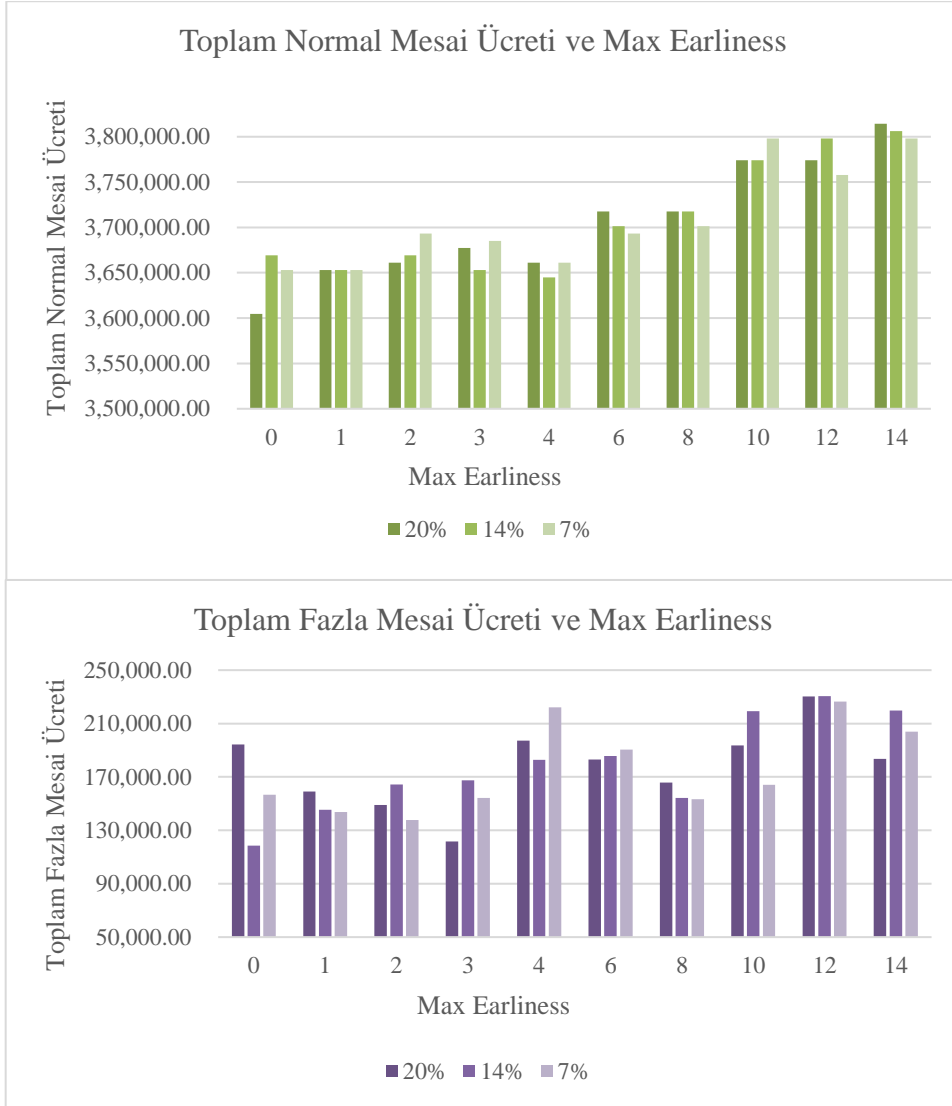
Şekil 4.1: 5 farklı problem setinin ortalaması olarak toplam maliyet ve envantere tutma maliyetinin maksimum erkenlik seviyesine göre değişimi



Şekil 4.2: Problem seti-1 için toplam maliyet ve envantere tutma maliyetinin maksimum erkenlik seviyesine göre değişimi

Hem Şekil 4.1 hem de Şekil 4.2'deki ortalama toplam maliyet değerlerine bakıldığında maksimum erkenlik seviyesi arttırıldıkça toplam maliyet değerlerinin basamak fonksiyonu şeklinde azaldığı görülmektedir. Yani, maksimum erkenlik seviyesi arttıkça marjinal olarak artan düşüşler söz konusudur. Örnek olarak Şekil 4.1'deki toplam maliyet değerleri ele alınırsa, 1 ile 2, 4 ile 5 ve 8 ile 10 maksimum erkenlik seviyeleri arasında ilerlenildikçe önemli düşüşlerin yaşandığı söylenebilir ve son düşüşün en önemli düşüş olduğu görülmektedir. Benzer davranışın Şekil 4.2'de problem seti-1 için de gerçekleştiği söylenebilmektedir. Bu örüntüden elde

edilebilecek ilk çıkarım; bir BO firması havayolu şirketleriyle maksimum erkenlik parametresini müzakere etmesi durumunda üretim maliyetlerinde önemli düşümlere sebep olan eşik değerlerini bilmesi gerekmektedir. Bir diğer çıkarım ise envantere tutma maliyetinin yüksek olması durumunda yine maksimum erkenlik seviyesinin daha önemli bir parametre haline gelmesidir.



Şekil 4.3: Normal ve fazla mesai ücretlerinin maksimum erkenlik seviyesine göre değişimi

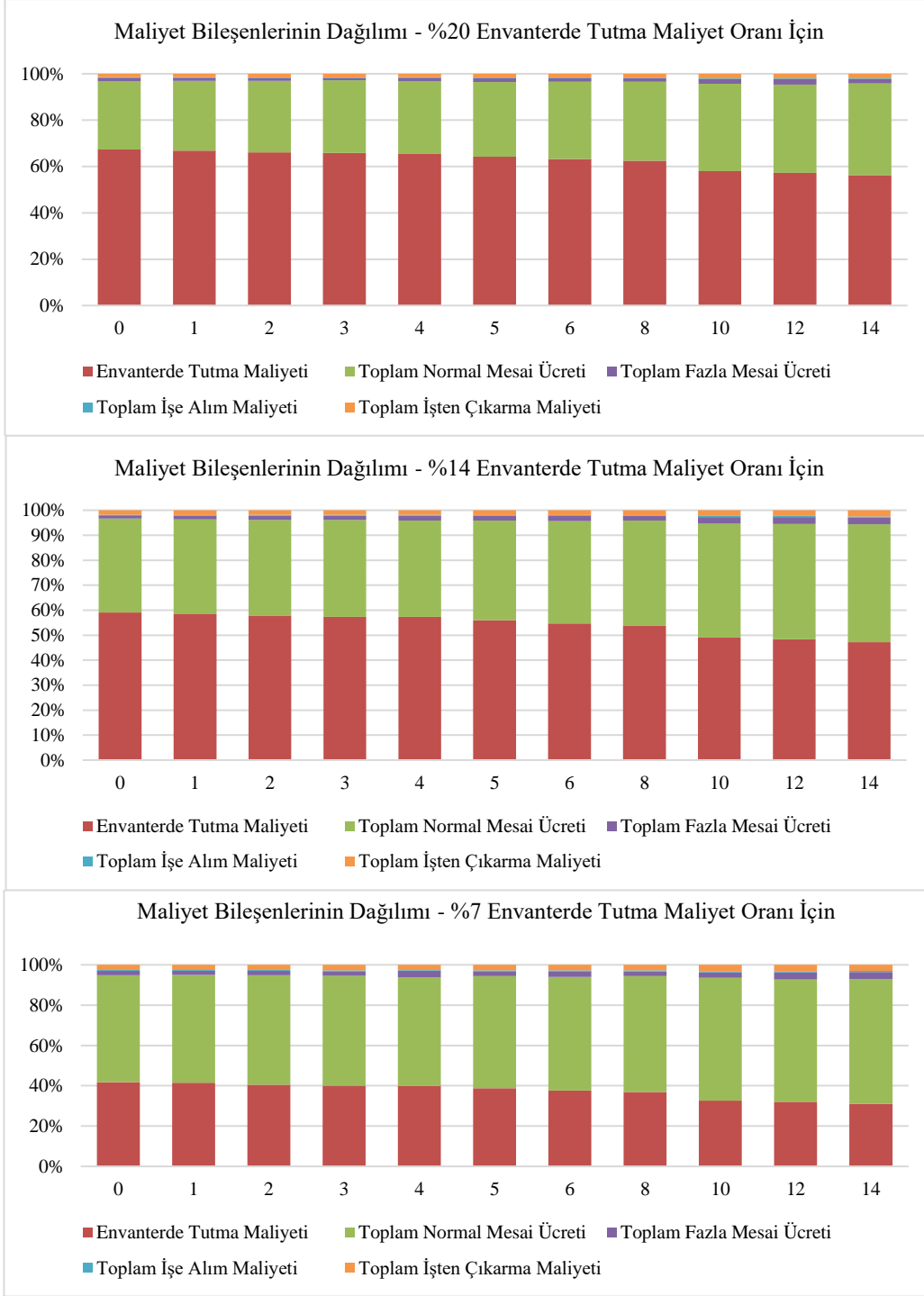
Şekil 4.3'te verilen normal ve fazla mesai için işçilik maliyetleri dikkate alındığında, maksimum erkenlik seviyesi arttırıldığında, toplam maliyetten tasarruf etmek için envanter seviyelerinin düşürüldüğü ancak talebi karşılayabilmek için daha fazla işgücü kullanma eğiliminde olduğu genel olarak söylenebilmektedir. Envanterin miktarının düşürülmesi, her devinimli envanter türü için daha fazla revizyon

işleminin yapılmasını gerektirecektir ve işgücü miktarı artırılarak envanterle ilgili kısıtlamaların etkisi azaltılmaya çalışılacaktır. Örneğin, planlama ufku boyunca 30 adet takas talebi ve hazır envanterde 5 adet modül olursa her bir modül için  $30/5=6$  defa revizyon işlemi gerçekleştirilmesi gerekecektir. Mümkün olabilecek envanter düşüşleri için, bizim problemimizde olduğu gibi 8 günlük izin verilen maksimum erken takas günü gibi bir eşik değerinin ötesine geçilmesi gerekmektedir. Bu grafiklerden elde edilen çıkarım ise, bir BO firması, müşteri havayolu şirketleriyle maksimum erkenlik parametresini müzakere etmesi durumunda maksimum erkenlik seviyesini daha büyük ölçekte artırma talebinde bulunması durumunda işgücü seviyesini arttırabilmelidir. Aksi halde firma artan erken teslim edebilme süresine rağmen envanter maliyetlerini azaltamayacaktır.

Şekil 4.4, tüm problem setleri için ortalama maliyet bileşenlerinin dağılımını göstermektedir. Çözülen tüm problemlerde envanterde tutma maliyeti ve normal mesai ücretlerinin en önemli iki maliyet kalemi olduğu görülmektedir. İzin verilen erken teslim edebilme süresi arttıkça envanterde tutma maliyeti yüzdesinin azaldığı, buna karşın normal mesai ücreti yüzdesinin arttığı göze çarpmaktadır. Bunun sebebi toplam maliyeti düşürmek için envanter seviyesi azaltılmaya çalışılırken, daha önce de belirtildiği gibi envanter kısıtlamanın etkisini azaltmak için işgücü kapasitesinin arttırılmasıdır. Maksimum erkenlik seviyesi 0'dan 14 güne arttıkça toplam maliyetin yaklaşık olarak %10'luk kısmının envanter maliyetinden normal mesai ücretlerine kaydığı söylenebilmektedir. Envanterde tutma maliyet oranları (h) için ortalama envanterde tutma maliyetlerinin ve normal mesai ücretlerinin toplam maliyete oranları Çizelge 4.1'de verilmiştir. Bu yüzdeler, potansiyel gerçek hayat maliyet dağılımlarının geniş bir kısmını kapsamaktadır. Bu nedenle sonuçların gerçek hayat senaryolarının iyi bir temsili olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 4.1: Envanterde tutma maliyeti oranlarına göre envanter ve normal mesai ücretlerinin toplam maliyete oranları.

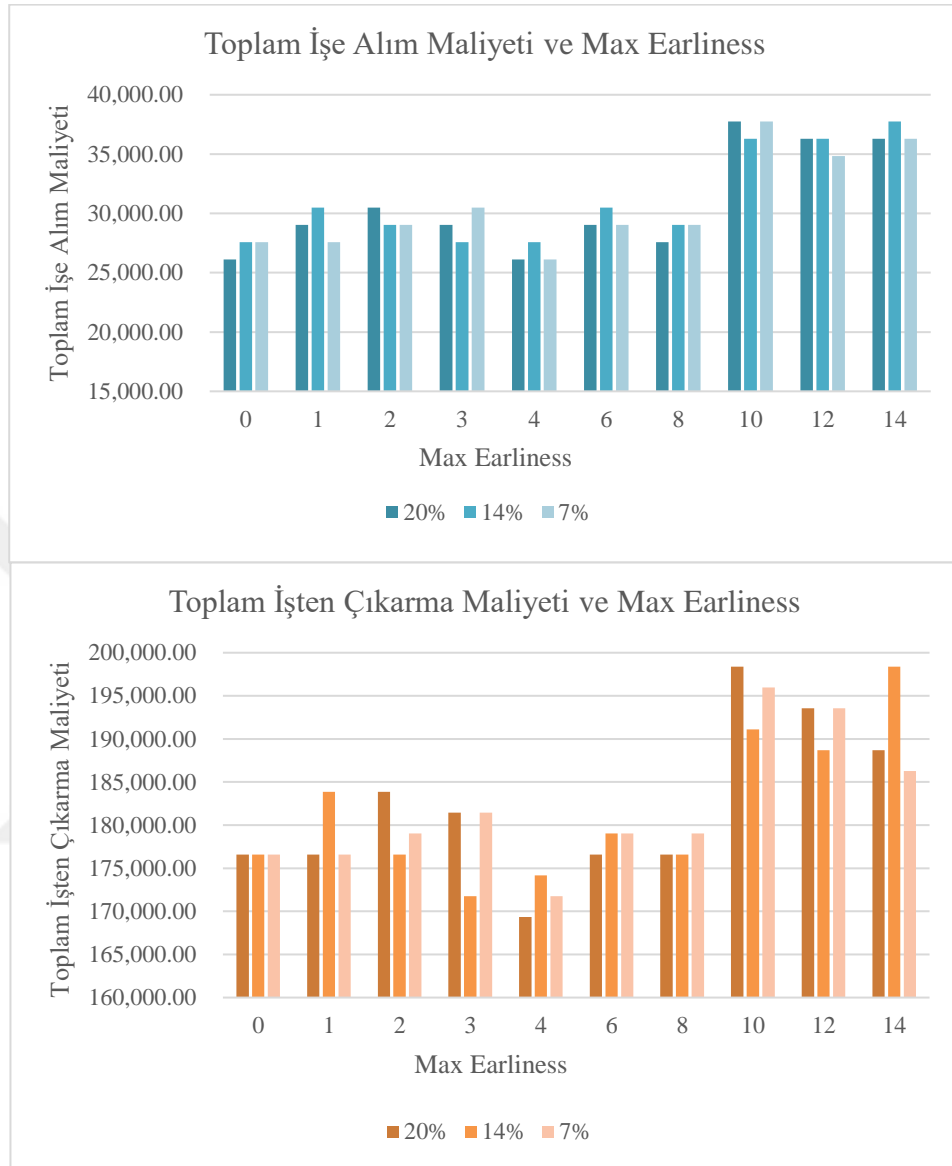
|                                    | h=%7  | h=%14 | h=%21 |
|------------------------------------|-------|-------|-------|
| Ortalama envanterde tutma maliyeti | %63.1 | %54.7 | %37.7 |
| Ortalama normal mesai ücreti       | %33.4 | %41.1 | %56.6 |



Şekil 4.4: Maliyet bileşenlerinin dağılımı

Şekil 4.5'teki toplam işe alma ve çıkarma maliyetleri grafiğine göre maksimum erkenlik seviyesinin 8 günü aşması durumunda bu maliyet bileşenlerinde bir artış başladığı görülmektedir. Bu beklenen bir durumdur çünkü işgücü kapasitesinin maksimum erkenliliğin üst seviyelerinde artma eğiliminde olduğu yukarıdaki paragraflarda nedenleriyle açıklanmıştır. Daha yüksek iş gücü seviyesi, işçilik mesai

maliyetlerini düşürmek için işgücü düzeyi dinamik ve agresif bir şekilde yönetildiğinden daha fazla işe alma ve işten çıkarma anlamına gelmektedir.



Şekil 4.5: İşe alma ve işten çıkarma ücretlerinin maksimum erkenlik seviyesine göre değişimi





## 5. ÖNERİLEN ÇÖZÜM SEZGİSELİ

Devinimli modüller için işgücü kapasitesi ve revizyon planlama probleminin matamatiksel modeli IBM ILOG CPLEX çözücüsü kütüphanesi ile Eclipse Java kullanılarak kodlanmıştır. Ancak problemin NP-Zor olması sebebi ile sezgisel olarak çözümlenmesine ve iki fazdan oluşan “Sabitle ve Optimize Et” metodunun geliştirilip problem üzerinde uygulanmasına karar verilmiştir.

Sabitle ve optimize et metodu, bir problemi yinelemeli olarak daha küçük alt problemlere ayırıştırarak bir metasezgiseldir. Algoritmanın her yinelemesinde, karar değişkenlerinin belirlenen kısmının mevcut çözümdeki değerlerinde sabitlenmesini amaçlayan bir ayırıştırma süreci uygulanır. Ortaya çıkan alt problem sadece optimize edilecek küçük bir “serbest” değişken grubu tarafından oluşturulduğundan, her bir alt problem tam modelle kıyaslandığında bir karma tamsayılı programlama çözücüsü tarafından çok daha hızlı bir şekilde çözülebilir.

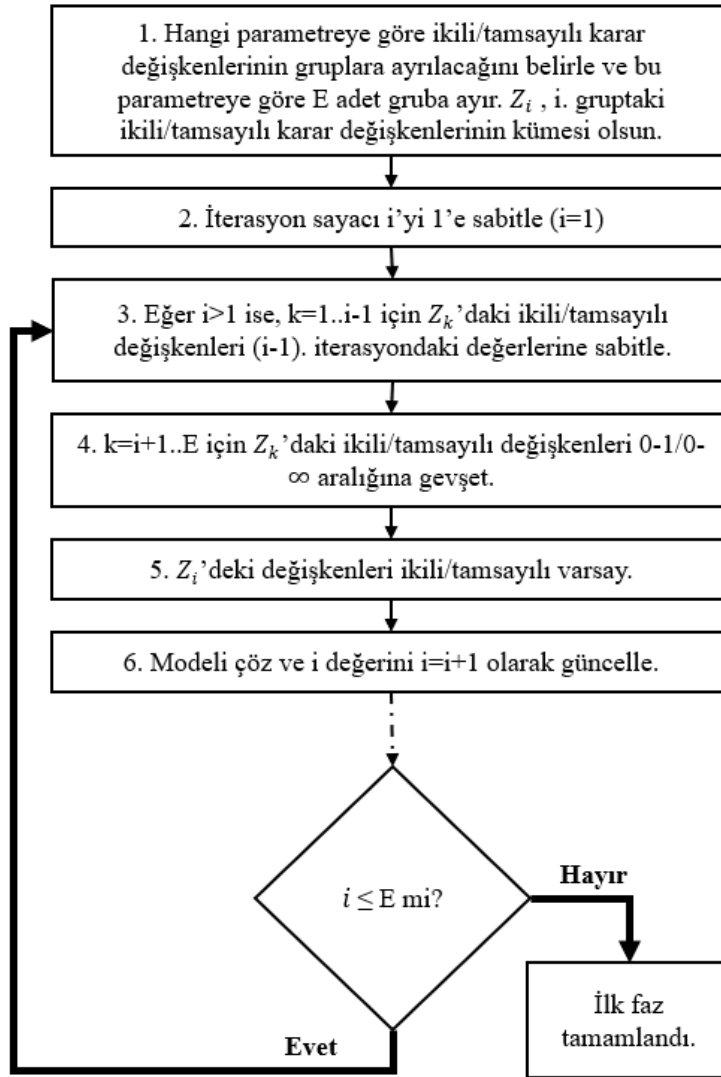
İlk fazda, sabitle ve optimize et metodu, problemi belirlenen bir parametreye göre belli sayıda karar verme problemlerine bölmektedir ve bu problemleri sırası ile çözerek sonunda ana problem için bir geçerli çözüm elde etmektedir. İkinci fazda ise birinci fazın sonunda bulunan çözümden yararlanılarak amaç fonksiyonu iyileştirilmeye çalışılır. Amaç fonksiyonu iyileştirilmeyene kadar veya belirlenen adım sayısı kadar ikinci faza devam edilir.

Problemimiz için önerdiğimiz yöntemin ilk fazı altı adımdan oluşmaktadır. İlk adımda belirlenen bir parametreye göre model  $E$  adet alt problem grubuna bölünür. Daha sonra ikinci adımda bölünen problemlerden ilkinin değişkenleri tamsayılı bırakılır. Geriye kalan  $(E - 1)$  adet problemin değişkenleri ise gevşetilmiş olarak bırakılır ve ana problem modeli bu şekilde çözülür. Üçüncü adımda ilk gruptaki değişkenlerin tamsayılı çözüm değerleri sabitlenir, ikinci gruptaki değişkenler tamsayılı yapılır. Kalan  $(E - 2)$  adet problemin değişkenleri gevşetilmiş olarak bırakılır ve ana problem modeli bu şekilde çözülür. Bu şekilde  $E$  grubun tamamı için

tamsayılı çözüm elde edilene kadar devam edilir. Önerilen yöntemin ilk fazının adımları aşağıda gösterilmiştir.

### 5.1. İlk Faz Adımları

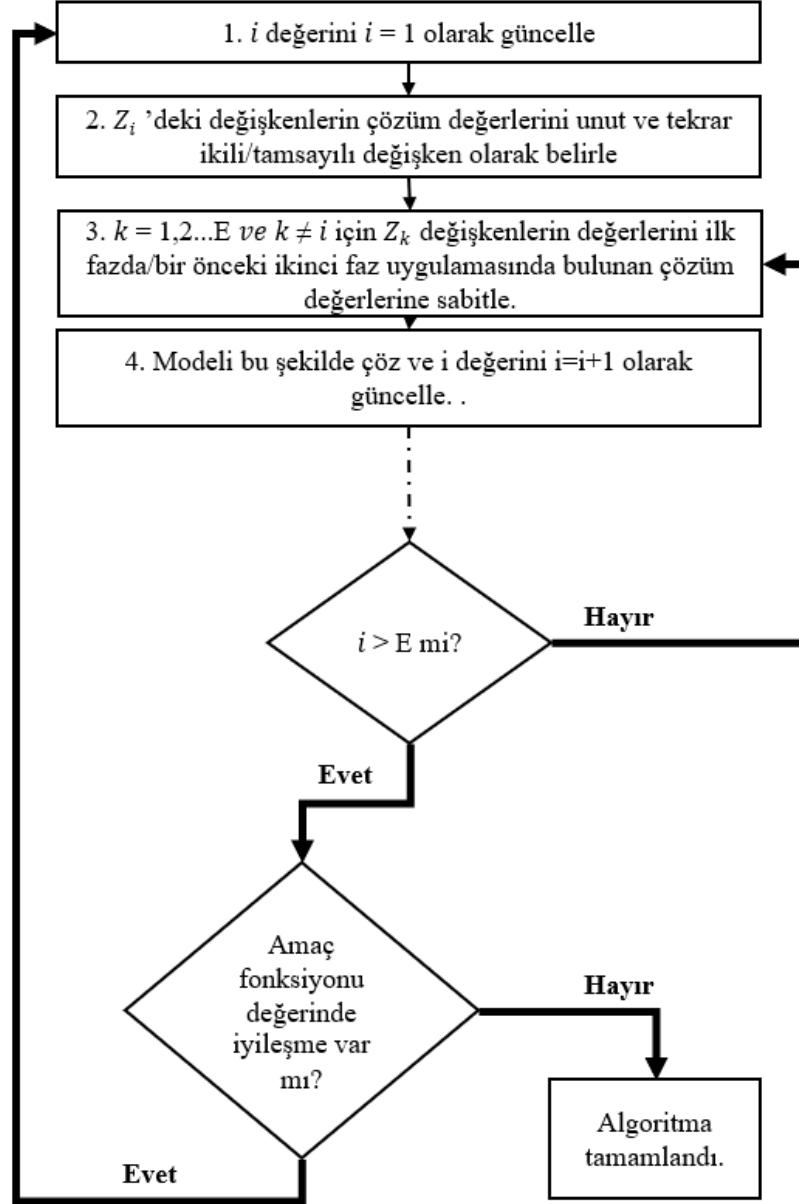
İlk fazın adımları Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Geliştirilen yöntemin ilk fazı geçerli bir olurlu çözüm bulur ve faz ikide iyileştirilmeye çalışılacak amaç fonksiyon değerini verir.



Şekil 5.1: Sabitle ve optimize et sezgiselinin ilk fazının şematik gösterimi

## 5.2. İkinci Faz Adımları

İkinci fazın adımları Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2: Sabitle ve optimize et sezgiselinin ikinci fazının şematik gösterimi

Geliştirilen yöntemin ikinci fazında, ilk fazın sonunda bulunan ana problem için geçerli olan olurlu çözümün amaç fonksiyonunun iyileştirilmesi amaçlanır. İkinci fazda  $E$  adet karar değişkeni grubundan hiçbiri gevşetilmiş olarak bırakılmaz. İkinci fazın ilk adımında  $i = 1$  yapılır ve ilk iterasyona geçilir. Daha sonra  $i$ . grup karar değişkenleri için, problemin ilk fazın son iterasyonunda bulunan çözümü unutturulur

ve değişkenleri tamsayılı yapılır. Bu işlemden sonra  $i$ . grup hariç kalan  $(E-1)$  adet grup karar değişkeni, değerleri ilk fazın son iterasyonunda bulunan olurlu çözüm değerlerine sabitlenir. İlk adımda ana problem bu şekilde çözdürülür ve ikinci adıma gidilir.

İkinci adımda  $i$ 'nin yeni değeri  $i+1$  olarak güncellenir.  $i$ . grubun değişkenleri tamsayılı yapılırken kalan  $(E-i)$  adet problem grubunun değişken değerleri ikinci adımın ilk fazında bulunan çözüme sabitlenir.  $(E - i) = 0$  ise problem bu şekilde çözdürülüp amaç fonksiyonunda iyileşme var mı diye bakılır. Amaç fonksiyonunda iyileşme var ise ilk adıma geri dönülür ve ikinci faz aynı şekilde amaç fonksiyonu değişmeyene kadar yapılmaya devam edilir.  $(E - i) > 0$  ise ana problem bu şekilde çözülür ve adım ikiye geri dönülür.

Bizim problemimizde, değişkenlerin 90 günlük periyotlara göre gruplanmasına karar verilmiştir. Örnek olarak 360 periyotluk (1 yıllık) bir modelin aralık boyutu 90 seçilerek sabitle ve optimize et metodunun uygulanışı anlatılacaktır. Öncelikle problem bölme boyutu 90 seçildiğinden ana problem 90'ar periyotluk 4 problem grubuna bölünür. Birinci grup problemde 1. ile 90. periyotlar, ikinci grup problemde 91. ile 180. periyotlar, üçüncü grup problemde 181. ile 270. periyotlar, son olarak dördüncü grup problemde ise 271. ile 360. periyotlardaki  $X_{jit}$ ,  $Y_{jt}^1$ ,  $Y_{jt}^2$ ,  $G_t$ ,  $F_t$  değişkenleri içerilecektir. Problem bölündükten sonra sabitle ve optimize et metodunun ilk fazı artık uygulanabilmektedir.

İlk grubun karar değişkenleri ikili/tamsayılı değişken kalırken modelin 91. ile 360. periyotlardaki değişkenleri gevşetilmiş olarak bırakılır. Ana problem bu şekilde çözüldükten sonra ilk grup için tamsayılı çözüm bulunur ve ilk fazın ikinci iterasyonuna geçilir.

İkinci iterasyonda, 1. ile 90. periyottaki çözümler ilk fazın ilk iterasyonunda bulunan tamsayılı çözümlere sabitlenir. Algoritmanın ilk sabitleme işlemi bu adımda yapılır. Daha sonra 91. ile 180. periyotları içeren ikinci grubun değişkenleri tamsayılı bırakılır, 181. ile 360. periyotlardaki değişkenleri gevşetilmiş olarak bırakılır. Bu şekilde ikinci lineer grubun çözümü elde edildikten sonra 181. ile 270. periyotları içeren grubun çözümü için ilk fazın üçüncü iterasyonuna gidilir.

Üçüncü iterasyonda, ilk fazın ikinci iterasyonunda bulunan çözümden yararlanılarak 1. ile 180. periyotları içeren iki grubun çözümü yine sabitlenmiş bırakılmaktadır. Üçüncü grup olan ve 181. ile 270. periyotlar arasını içeren grubun değişkenleri ise tamsayı, dördüncü grup olan 271. ile 360. periyotlar arasını içeren grup değişkenleri gevşetilmiş olarak bırakılacaktır. Bu şekilde üçüncü lineer grubun çözümü elde edildikten sonra 271. ile 360. periyotları içeren dördüncü grubun çözümü için ilk fazın son iterasyonuna geçilir.

Dördüncü iterasyon ilk fazın son adımı olarak tanımlanmaktadır. Bunun nedeni,  $E = 4$  olmasıdır. Dördüncü iterasyondan sonra artık değişkenlerin tamsayı yapıya çözüleceği bir grup bulunmayacaktır ve 4 grup problemin de tamsayılı çözümleri bulunmuş olacaktır. İlk fazın son iterasyonunda ana problem için mümkün bir çözüm bulunur. Bunun nedeni tüm değişkenlerin artık tamsayılı değerlere sahip olmasıdır.

Algoritmanın ikinci fazının ilk iterasyonunda ilk grubun ilk fazda sabitlenen değerleri unutulur ve yeniden çözülmesi amacıyla bu grubun değişkenleri tamsayı yapılır. Kalan üç grubun değişkenleri algoritmanın ilk fazında bulunan olurlu tamsayılı çözümlere sabitlenir.

Model bu şekilde çözüldükten sonra algoritmanın ikinci fazının ikinci iterasyonuna geçilir. Bu iterasyonda 1. grubun çözümleri bir önceki adımda bulunan tamsayılı çözümlere, 3., ve 4. grubun çözümleri ilk fazın sonunda bulunan tamsayılı çözümlere sabitlenir. İkinci grubun çözüm değeri unutulur ve değişkenleri tamsayı varsayılır ve model çözülür.

İkinci iterasyon çözüldükten sonra algoritmanın ikinci fazının üçüncü iterasyonuna geçilir. Bu iterasyonda ilk iki grubun değerleri ikinci fazın birinci ve ikinci iterasyonunda bulunan değerlerine sabitlenir, dördüncü grubun değerleri ise ilk fazın son iterasyonunda bulunan değerlere sabitlenir. Üçüncü grubun değişkenleri tamsayı varsayılır ve model bu şekilde çözülerek dördüncü iterasyona geçilir.

Algoritmanın ikinci fazının dördüncü iterasyonunda birinci, ikinci ve üçüncü grubun değerleri ilgili iterasyonlardaki değerlerine sabitlenir. Dördüncü grubun değerleri unutulur ve değişkenleri tamsayı varsayılarak model çözülür. Dördüncü iterasyondan sonra tamsayılı çözülecek başka grup kalmaması nedeniyle, amaç

fonksiyonundaki iyileşmeye bakılır. Dördüncü iterasyon sonunda amaç fonksiyonunda iyileşme var ise, algoritmaya ikinci fazın ilk iterasyonundan yeniden başlanarak amaç fonksiyon değeri değişmeye kadar aynı adımlarla devam edilir. Dördüncü iterasyon sonunda amaç fonksiyonu değeri ilk fazın son iterasyonunda bulunan amaç fonksiyon değerine göre iyileşmedi ise bu durum amaç fonksiyon değerinin daha fazla iyileştirilemeyeceğini göstermektedir. Bu durumda algoritma sonlandırılır ve geçerli çözüm optimal çözüm olarak bulunmuş olur.

### 5.3. Algoritmanın Uygulandığı Problemlerin Üretimi

Sabitle ve optimize et metodunun uygulandığı kısımda, problemin ana parametreleri ve talep kümesi olarak tanımlanan, son teslim günlerini belirten, rastgele oluşturulmuş 5 adet problem seti dördüncü bölümde kullanılanlar ile aynıdır.

Ön deneme çalışmaları sonucu 40 problem için parametreler belirlenmiştir. Problem için; 3 tip devinimli envanter, 36 talep ve 720 periyotluk (gün) planlama ufkunun olması kararlaştırılmıştır. Çözüm süresinin kısaltılması amacıyla her problem, algortimanın her iterasyonunda %5'lik gap limiti ile çözülmüştür. Yani çözüm optimalin %5 komşuluğunda ise optimizasyon sonlandırılmıştır. Bunun nedeni genelde çözüm süresinin %5 e kadar kısa olması ve uzun sürelerin geriye kalan %5 lik aralığı kapatmak için olmasıdır. Ayrıca her bir grup problem asıl problemin bir gevşetilmesidir ve tam optimize edilmesi şart değildir.

Çizelge 5.1: Üretilen 20 problemin sahip olduğu parametreler.

| Problem Sayısı | Pencere Genişliği (gün) | $h_j$ | $Max_{Earliness}$ (gün) |
|----------------|-------------------------|-------|-------------------------|
| 5              | 90                      | %7    | 0                       |
| 5              |                         |       | 8                       |
| 5              |                         | %20   | 0                       |
| 5              |                         |       | 8                       |

Sabitle ve optimize et yaklaşımı 90 günlük pencerelerden oluşan alt problem büyüklüğü kullanılarak çözülmüştür.  $Max_{Earliness}$  değerleri 0 ve 8 gün olarak, envanterde tutma maliyeti oranları olarak da, alt ve üst değerler olan, %7 ve %20 kullanılmıştır. Sonuç olarak  $2 * 2 * 5 = 20$  adet problem üzerinde algoritmanın

performansı incelenmiştir. Üretilen 20 problem Çizelge 5.1’de gösterilmiştir. Buradaki amaç bu parametrelerdeki değişimin problemin zorluğuna ve çözümüne ne derece etki edeceğini bulmaktır.

#### 5.4. Problemin Çözümü ve Performans Analizi

Bu çalışma kapsamındaki metot Eclipse Java programlama dilinde CPLEX kütüphanesi kullanılarak kodlanmıştır ve matematiksel modeller IBM ILOG CPLEX 12.7.1 çözücüsünde 2.30GHz Intel® Core™ i5-6200U CPU işlemcili, 12GB RAM kapasiteli bilgisayarda çözülmüştür.

Algoritmanın performansı, dördüncü bölümde 30 dakikalık süre limiti ile IBM ILOG CPLEX 12.7.1 kullanılarak çözülen matematiksel modelin koşuturları ile Çizelge 5.2 - Çizelge 5.5 arasında gösterildiği gibi son teslim tarihlerine göre farklılık gösteren 5 problem seti için sabitle ve optimize et sezgiselinin ikinci fazının sonundaki amaç fonksiyon değerleri yüzde sapma olarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca ortalama değerler alınarak da aynı karşılaştırmalar yapılmıştır. Amaç fonksiyonu değerleri toplam maliyete (\$) karşılık gelmektedir. Yüzde sapmaların nasıl hesaplandığı aşağıda gösterilmiştir.

$$Fark (\%) = \frac{(CPLEX\ Amaç\ Fonksiyonu\ Değeri - Sabitle\ Optimize\ Et\ 2.\ Faz\ Amaç\ Fonksiyonu\ Değeri)}{CPLEX\ Amaç\ Fonksiyonu\ Değeri}$$

Çizelge 5.2: 90 günlük alt problemlerle Max Earliness=0 ve h=%7 parametreleri için elde edilen sonuçlar

| Max Earliness 0<br>h %7 | 30 dk CPLEX |                 | Sabitle ve Optimize Et 1 | Sabitle ve Optimize Et 2 | Fark (%) |
|-------------------------|-------------|-----------------|--------------------------|--------------------------|----------|
|                         | Gap %       | Amaç Fonksiyonu |                          |                          |          |
| 1                       | 1,93%       | 7.117.129,60    | 8.066.002,00             | 7.454.756,40             | -4,74    |
| 2                       | 1,60%       | 6.677.660,80    | 7.220.292,80             | 7.463.988,00             | -11,78   |
| 3                       | 1,04%       | 6.942.092,80    | 7.583.083,20             | 7.356.591,20             | -5,97    |
| 4                       | 1,77%       | 6.657.488,00    | 7.373.576,00             | 7.025.732,00             | -5,53    |
| 5                       | 1,30%       | 7.108.275,20    | 7.457.494,80             | 7.468.381,20             | -5,07    |
| Ortalama                | 1,53%       | 6.900.529,28    | 7.540.089,76             | 7.353.889,76             | -6,57    |

Çizelge 5.3: 90 günlük alt problemlerle Max Earliness=0 ve h=%20 parametreleri için elde edilen sonuçlar

| Max Earliness 0<br>h %20 | 30 dk CPLEX |                 | Sabitle ve Optimize Et 1 | Sabitle ve Optimize Et 2 | Fark (%) |
|--------------------------|-------------|-----------------|--------------------------|--------------------------|----------|
|                          | Gap %       | Amaç Fonksiyonu |                          |                          |          |
| 1                        | 1,37%       | 12.567.584,00   | 12.824.428,80            | 13.445.865,60            | -6,99    |
| 2                        | 0,65%       | 11.611.980,80   | 11.991.208,40            | 11.737.150,40            | -1,08    |
| 3                        | 0,78%       | 12.368.819,20   | 12.749.328,40            | 12.904.073,20            | -4,33    |
| 4                        | 1,37%       | 11.665.120,00   | 12.463.889,60            | 12.619.264,40            | -8,18    |
| 5                        | 0,70%       | 13.034.860,80   | 13.274.505,60            | 13.457.625,60            | -3,24    |
| Ortalama                 | 0,97%       | 12.249.672,96   | 12.660.672,16            | 12.832.795,84            | -4,76    |

Çizelge 5.4: 90 günlük alt problemlerle Max Earliness=8 ve h=%7 parametreleri için elde edilen sonuçlar

| Max Earliness 8<br>h %7 | 30 dk CPLEX |                 | Sabitle ve Optimize Et 1 | Sabitle ve Optimize Et 2 | Fark (%) |
|-------------------------|-------------|-----------------|--------------------------|--------------------------|----------|
|                         | Gap %       | Amaç Fonksiyonu |                          |                          |          |
| 1                       | 0,40%       | 6.728.864,00    | 7.216.109,60             | 6.855.321,20             | -1,88    |
| 2                       | 1,98%       | 6.285.404,80    | 6.525.960,00             | 6.764.758,00             | -7,63    |
| 3                       | 2,97%       | 6.380.982,40    | 6.817.154,40             | 6.901.482,00             | -8,16    |
| 4                       | 3,99%       | 6.340.304,00    | 7.190.181,60             | 6.386.352,00             | -0,73    |
| 5                       | 1,25%       | 6.463.692,80    | 6.779.936,80             | 6.896.201,20             | -6,69    |
| Ortalama                | 2,12%       | 6.439.849,60    | 6.905.868,48             | 6.760.822,88             | -4,98    |

Çizelge 5.5: 90 günlük alt problemlerle Max Earliness=8 ve h=%20 parametreleri için elde edilen sonuçlar

| Max Earliness 8<br>h %20 | 30 dk CPLEX |                 | Sabitle ve Optimize Et 1 | Sabitle ve Optimize Et 2 | Fark (%) |
|--------------------------|-------------|-----------------|--------------------------|--------------------------|----------|
|                          | Gap %       | Amaç Fonksiyonu |                          |                          |          |
| 1                        | 0,13%       | 11.817.568,00   | 12.286.397,20            | 12.321.694,00            | -4,27    |
| 2                        | 2,22%       | 10.528.147,20   | 10.596.069,60            | 10.690.317,60            | -1,54    |
| 3                        | 2,09%       | 10.545.606,40   | 10.873.328,40            | 10.888.608,00            | -3,25    |
| 4                        | 2,08%       | 10.439.008,00   | 10.579.219,20            | 10.613.113,20            | -1,67    |
| 5                        | 0,96%       | 11.066.412,80   | 11.399.171,60            | 11.116.268,00            | -0,45    |
| Ortalama                 | 1,50%       | 10.879.348,48   | 11.146.837,20            | 11.126.000,16            | -2,27    |



Çizelge 5.2 - Çizelge 5.5 arasında görülebildiği üzere 30 dakikalık süre limiti ile CPLEX'te elde edilen amaç fonksiyonu değeri ile sabitle ve optimize et sezgiselinin 2.fazı sonunda elde edilen sonuçlar arasındaki farklar %12'nin altındadır, ortalama fark yüzde fark aralıkları ise %2.3 ile %6.6 arasında değişmektedir. Bu değerler ile, algoritmanın performansının tatmin edici düzeyde olduğu söylenebilmektedir.

Sabitle ve optimize et sezgiselinin temel çalışma prensibine göre, ikinci fazın sonunda birinci fazdan daha kötü bir sonuç bulunamaz. Ancak bu çalışmadaki uygulamasında, her problem, algortimanın her iterasyonunda %5'lik gap limiti ile çözülmüştür. Yani çözüm optimalin %5 komşuluğunda ise optimizasyon sonlandırılmıştır. Bu sebeple Çizelge 5.2 - Çizelge 5.5 arasındaki sonuçlarda görülebileceği üzere ikinci fazın sonunda birinci fazdan daha kötü bir sonuç bulunması ihtimali vardır.



## 6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

BO hizmetleri ve bu hizmetlerin etkin yönetimi, uzun vadede hem güvenlik hem de havayolu maliyetleri açısından önemli faktörler olmaya devam edecektir. Bu tez çalışmasında, BO şirketleri için bir revizyon çizelgeleme ve işgücü planlama problemi literatürde yeni bir sorun olarak ele alınmıştır. Problemin çözümüne yönelik karma tamsayılı programlama modeli önerilmiştir ve bu modelin NP-Zor olduğu yapılan ispatla gösterilmiştir. Kapsamlı nümerik çalışmalar ile problem kapsamındaki önemli maliyet noktaları ve bu maliyetleri etkileyen önemli parametreler analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda BO firmalarının etkin yönetiminde rol oynayabilecek bir takım yönetimsel çıkarımlar paylaşılmıştır.

Maksimum erkenliliğin , özellikle yüksek stok tutma maliyetlerinin olduğu durumlar için toplam maliyete olan etkisi açısından önemli bir parametre olduğu ve tasarrufun tamamen stok seviyelerinin azalmasından kaynaklandığı tespit edilmiştir. Bu nedenle, bir BO şirketinin, müşteri havayolları ile birlikte takasların son değişim gününden önce teslim edilebileceği maksimum süre (erken çağırma) konusunda pazarlık yapması maliyetler açısından önem kazanmaktadır. Havacılık endüstrisi için BO alanında çalışan vasıflı işçilerin kıt bir kaynak olduğu gerçeğini ve değişen işgücü seviyesine göre oldukça sınırlı olabileceğinin de unutulmaması gerekmektedir. Bu sebeple envanter maliyetleri ve iş gücü maliyetleri arasındaki ödünleşim (tradeoff) seçenekleri BO firması tarafından dikkatle değerlendirilmelidir.

Problemin NP-Zor olmasından dolayı çözümüne yönelik etkin bir sezgisel algoritma olan sabitle ve optimize et metodu kullanılmıştır. Farklı parametre ve problem setleri için algoritmanın performansına yönelik analizler yapılmış ve tez kapsamında sunulmuştur.



## KAYNAKLAR

- Airline Economics – MRO Global.** (2018), *MRO Market Trends*. <http://viewer.zmags.com/publication/d108c42f>, alındığı tarih: 09.11.2018.
- Arts, J. ve S. D. Flapper,** (2015), Aggregate overhaul and supply chain planning for rotables, *Annals of Operations Research*, January 2015, vol: 224(1), sf 77-100.
- Ayeni, P., T. Baines, H. Lightfoot, P. Ball,** (2011), State-of-the-art of lean in the aviation maintenance, repair and overhaul industry, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, sf. 2108-2123.
- Chen, H.,** (2015), Fix-and-optimize and variable neighborhood search approaches for multi-level capacitated lot sizing problems, *Omega*, 56, sf. 25-36.
- Coffman Jr, Edward G., M. R. Garey, D. S. Johnson,** (1996), Approximation algorithms for bin packing: a survey., *Approximation algorithms for NP-hard problems*. PWS Publishing Co.
- Dekker, R.,** (1996), Applications of maintenance optimization models: a review and analysis, *Reliability Engineering and System Safety*, vol: 51, sf. 229-240.
- Derber, A.** (2017, Ağustos 9). *Where MRO Labor Rates Are Heading*, <http://www.mro-network.com/maintenance-repair-overhaul/where-mro-labor-rates-are-heading>, alındığı tarih: 17.01.2018.
- Dorneles, Á. P., de Araújo, O. C. B., Buriol, L. S.,** (2014), A fix-and-optimize heuristic for the high school timetabling problem, *Computers & Operations Research*, 52, Part A, sf. 29-38.
- Ertogral, K., M. Erkoc, D. H. Ülker,** (2015), A production scheduling model and analysis for the maintenance repair and overhaul service providers, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30(3), sf. 513-522.
- Erkoc, M. ve K. Ertogral,** (2016), Overhaul Planning and Exchange Scheduling for Rotables with Limited Processing Capacity, *Computers and Industrial Engineering*, 98, sf. 30-39.
- Federgruen, A., Meissner, J., Tzur, M.,** (2007), Progressive interval heuristics for multiitem capacitated lot sizing problems, *Operations Research*, 55 (3), sf. 490–502.
- Gintner, Vitali, Natalia Kliewer, ve Leena Suhl,** (2005), Solving large multiple-depot multiple- vehicle-type bus scheduling problems in practice, *OR Spectrum* 27.4: 507-523.

- Gu, J., Z. Guaqing, K. W. Li,** (2015), Efficient aircraft spare parts inventory management under demand uncertainty, *Journal of Air Transport Management*, vol: 42, sf. 101-109.
- Hayek, M.,** (2005), Optimizing life cycle cost of complex machinery with rotatable modules using simulation, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 11(4).
- Helber, S., Sahling, F.,** (2010), A fix-and-optimize approach for the multi-level capacitated lot sizing problem, *International Journal of Production Economics*, 123 (2), sf. 247–256.
- International Air Transport Association,** (2015), *Guidance Material and Best Practices for Inventory Management*, 2nd edition, Montreal, Canada, <https://www.iata.org/whatwedo/workgroups/Documents/MCTF/inventory-mgmt-2nd-edition.pdf>, alındığı tarih: 02.02.2018.
- Joo, S. H.,** (2009), Scheduling preventive maintenance for modular designed components: a dynamic approach, *European Journal of Operational Research*, 192, sf. 512-520.
- Joo, S.H. ve H. Min,** (2011), A multiple objective approach to scheduling the preventive maintenance of modular aircraft components, *International Journal of Services and Operations*, 9 (1), sf. 18-31.
- Kashyap, A.,** (2012), Supply chain optimization within aviation MRO, *International Journal of Computer Applications in Engineering Sciences*, 2, pp.95-101.
- Kilpi, J., ve APJ. Vepsäläinen,** (2004), Pooling of spare components between airlines, *Journal of Air Transport Management*, 10 (2), 137-146.
- Kilpi, J., J. Töyli, ve A. Vepsäläinen,** (2009), Cooperative strategies for the availability services of repairable aircraft components, *International Journal of Production Economics*, vol: 117, sf. 360-370.
- Lufthansa Technik.** *Landing Gear Overhaul: Vital buffer between airframe and runway.* <https://www.lufthansa-technik.com/landing-gear-overhaul>, alındığı tarih: 01.11.2018.
- Luh, P. B., D. Yu, S. Soorapanth, A. I. Khibnik ve R. Rajamani,** (2005), A Lagrangian relaxation-based approach to schedule asset overhaul and repair services, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol: 2(2), sf.145-167.
- MacDonnell, M. ve B. Clegg,** (2007), Designing a support system for aerospace maintenance supply chains, *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol: 18, sf.139-151.
- MacDonnell, M. ve B. Clegg,** (2011), A new inventory model for aircraft spares, in *Service Parts management*, edited by N. Altay and L. A. Litteral, Springer-Verlang London.
- Nahmias, S.,** (2009), *Production and operations analysis (6th ed.)*, McGraw-Hill Inc., New York, USA.

- Oliver Wyman**, (2018), *Global fleet&MRO Market Forecast Commentary 2018–2028*, [www.oliverwyman.com](http://www.oliverwyman.com), alındığı tarih: 04.02.2018.
- Pochet, Yves, ve Laurence A. Wolsey**, (2006), *Production planning by mixed integer programming*, Springer Science & Business Media.
- Romo, S. ve M. Erkoc**, (2013), Exchange inventory policies and capacity management for maintenance overhaul and repair, *working paper – submitted for publication*, University of Miami, Coral Gables, FL.
- Rupp, B., D. Pauli, S. Feller ve M. Skytta**, (2000), Workshop scheduling in the MRO context, *International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics*, sf. 2000-2003.
- Sahling, F., Buschkuhl, L., Tempelmeier, H., Helber, S.**, (2009), Solving a multi-level capacitated lot sizing problem with multi-period setup carry-over via a fix-and-optimize heuristic, *Computers and Operations Research*, 36 (9), sf. 2546– 2553.
- Silver, E., Pyke, D., & Peterson, R.**, (1998), *Inventory management and production planning and scheduling*. Hoboken: Wiley.
- Spafford, C., Hoyland, T. ve Lehman, R.**, (2012), *BO Industry Landscape, Marsh&McLennan Companies*, [www.oliverwyman.com](http://www.oliverwyman.com).
- Stadtler, H.**, (2003), Multilevel lot sizing with setup times and multiple constrained resources: Internally rolling schedules with lot-sizing windows, *Operations Research*, 51 (3), sf. 487–502.
- Wesselbaum, D.**, (2014), *How Large are Firing Costs? A Cross-Country Study*, University of Hamburg, German Physical Society, EABCN, Munich Personal RePEc Archive, [https://mpa.ub.uni-muenchen.de/58762/1/MPRA\\_paper\\_58762.pdf](https://mpa.ub.uni-muenchen.de/58762/1/MPRA_paper_58762.pdf), alındığı tarih: 14.01.2018.
- Wolsey, L. A.**, (1998), *Integer Programming*: Wiley.
- Tempelmeier, H., Derstroff, M.**, (1996), A Lagrangean-based heuristic for dynamic multilevel multiitem constrained lotsizing with setup times, *Management Science*, 42 (5), 738–757.
- Van Jaarsveld, W., T. Dollevoet, ve R. Dekker**, (2012), Spare parts inventory control for an aircraft component repair shop, *working paper*, Erasmus University, Rotterdam, Netherlands.





## **EKLER**

EK 1: İzin Verilen Son Takas Tarihlerine Göre Farklılık Gösteren Rastgele Üretilmiş  
Problem Setleri



EK 1: İzin Verilen Son Takas Tarihlerine Göre Farklılık Gösteren Rastgele Üretilmiş Problem Setleri

Çizelge Ek. 1.1: Problem seti 1.

| Talep No (i)/<br>Devinimli Envanter Tipi (j) | j=1 | j=2 | j=3 |
|--|-----|-----|-----|
| i=1  | 140 | 566 | 715 |
| i=2  | 92  | 549 | 357 |
| i=3  | 601 | 129 | 384 |
| i=4  | 619 | 361 | 88  |
| i=5  | 308 | 613 | 655 |
| i=6  | 381 | 573 | 395 |
| i=7  | 13  | 253 | 216 |
| i=8  | 637 | 504 | 529 |
| i=9  | 80  | 375 | 258 |
| i=10   | 575 | 521 | 103 |
| i=11   | 310 | 309 | 102 |
| i=12   | 319 | 144 | 326 |
| i=13   | 297 | 510 | 317 |
| i=14   | 492 | 544 | 545 |
| i=15   | 46  | 62  | 272 |
| i=16   | 64  | 673 | 625 |
| i=17   | 37  | 689 | 624 |
| i=18   | 620 | 698 | 544 |
| i=19   | 44  | 468 | 318 |
| i=20   | 504 | 192 | 611 |
| i=21   | 497 | 442 | 111 |
| i=22   | 229 | 335 | 605 |
| i=23   | 499 | 646 | 99  |
| i=24   | 420 | 84  | 120 |
| i=25   | 563 | 357 | 634 |
| i=26   | 306 | 395 | 109 |
| i=27   | 527 | 134 | 625 |
| i=28   | 588 | 444 | 80  |
| i=29   | 539 | 546 | 71  |
| i=30   | 406 | 519 | 16  |
| i=31   | 467 | 112 | 382 |
| i=32   | 540 | 85  | 550 |
| i=33   | 489 | 224 | 385 |
| i=34   | 336 | 194 | 249 |
| i=35   | 38  | 111 | 128 |
| i=36   | 636 | 469 | 463 |

Çizelge Ek. 1.2: Problem seti 2.

| Talep No (i)/<br>Devinimli Envanter Tipi (j) | j=1 | j=2 | j=3 |
|--|-----|-----|-----|
| i=1  | 525 | 380 | 219 |
| i=2  | 42  | 505 | 325 |
| i=3  | 645 | 155 | 694 |
| i=4  | 195 | 263 | 524 |
| i=5  | 369 | 475 | 249 |
| i=6  | 544 | 142 | 11  |
| i=7  | 569 | 264 | 392 |
| i=8  | 660 | 638 | 409 |
| i=9  | 228 | 617 | 272 |
| i=10   | 431 | 123 | 171 |
| i=11   | 642 | 613 | 13  |
| i=12   | 458 | 698 | 718 |
| i=13   | 630 | 21  | 287 |
| i=14   | 351 | 455 | 28  |
| i=15   | 659 | 445 | 83  |
| i=16   | 446 | 612 | 327 |
| i=17   | 431 | 630 | 491 |
| i=18   | 692 | 178 | 641 |
| i=19   | 542 | 676 | 174 |
| i=20   | 372 | 171 | 131 |
| i=21   | 95  | 468 | 136 |
| i=22   | 401 | 264 | 433 |
| i=23   | 423 | 646 | 275 |
| i=24   | 714 | 560 | 403 |
| i=25   | 42  | 60  | 77  |
| i=26   | 719 | 595 | 135 |
| i=27   | 677 | 289 | 309 |
| i=28   | 574 | 637 | 523 |
| i=29   | 284 | 574 | 514 |
| i=30   | 487 | 589 | 695 |
| i=31   | 277 | 237 | 516 |
| i=32   | 712 | 583 | 195 |
| i=33   | 361 | 426 | 453 |
| i=34   | 710 | 432 | 574 |
| i=35   | 288 | 592 | 621 |
| i=36   | 502 | 243 | 248 |

Çizelge Ek. 1.3: Problem seti 3.

| Talep No (i)/<br>Devinimli Envanter Tipi (j) | j=1 | j=2 | j=3 |
|--|-----|-----|-----|
| i=1  | 72  | 141 | 81  |
| i=2  | 12  | 512 | 551 |
| i=3  | 79  | 19  | 582 |
| i=4  | 470 | 646 | 573 |
| i=5  | 35  | 703 | 14  |
| i=6  | 479 | 501 | 614 |
| i=7  | 26  | 509 | 330 |
| i=8  | 439 | 44  | 554 |
| i=9  | 10  | 632 | 483 |
| i=10   | 375 | 193 | 375 |
| i=11   | 518 | 395 | 423 |
| i=12   | 477 | 301 | 109 |
| i=13   | 575 | 152 | 80  |
| i=14   | 184 | 85  | 201 |
| i=15   | 278 | 519 | 56  |
| i=16   | 599 | 28  | 397 |
| i=17   | 620 | 102 | 196 |
| i=18   | 620 | 557 | 715 |
| i=19   | 542 | 348 | 509 |
| i=20   | 236 | 439 | 233 |
| i=21   | 499 | 654 | 714 |
| i=22   | 43  | 337 | 278 |
| i=23   | 593 | 282 | 578 |
| i=24   | 384 | 36  | 99  |
| i=25   | 12  | 102 | 693 |
| i=26   | 254 | 38  | 119 |
| i=27   | 234 | 668 | 232 |
| i=28   | 54  | 400 | 339 |
| i=29   | 464 | 21  | 399 |
| i=30   | 493 | 554 | 239 |
| i=31   | 516 | 393 | 616 |
| i=32   | 169 | 517 | 717 |
| i=33   | 348 | 56  | 395 |
| i=34   | 113 | 330 | 398 |
| i=35   | 382 | 703 | 461 |
| i=36   | 440 | 284 | 553 |

Çizelge Ek. 1.4: Problem seti 4.

| Talep No (i)/<br>Devinimli Envanter Tipi (j) | j=1 | j=2 | j=3 |
|--|-----|-----|-----|
| i=1  | 561 | 473 | 716 |
| i=2  | 11  | 381 | 422 |
| i=3  | 16  | 511 | 337 |
| i=4  | 448 | 71  | 449 |
| i=5  | 317 | 663 | 233 |
| i=6  | 502 | 330 | 441 |
| i=7  | 598 | 56  | 658 |
| i=8  | 49  | 624 | 108 |
| i=9  | 133 | 558 | 432 |
| i=10   | 131 | 308 | 630 |
| i=11   | 130 | 19  | 553 |
| i=12   | 684 | 91  | 716 |
| i=13   | 278 | 100 | 51  |
| i=14   | 151 | 184 | 58  |
| i=15   | 515 | 262 | 308 |
| i=16   | 161 | 116 | 433 |
| i=17   | 363 | 72  | 57  |
| i=18   | 231 | 41  | 562 |
| i=19   | 365 | 77  | 143 |
| i=20   | 700 | 479 | 675 |
| i=21   | 615 | 372 | 177 |
| i=22   | 372 | 618 | 189 |
| i=23   | 155 | 537 | 344 |
| i=24   | 613 | 540 | 525 |
| i=25   | 23  | 313 | 533 |
| i=26   | 383 | 372 | 626 |
| i=27   | 639 | 573 | 233 |
| i=28   | 607 | 371 | 130 |
| i=29   | 698 | 713 | 476 |
| i=30   | 590 | 505 | 214 |
| i=31   | 226 | 433 | 461 |
| i=32   | 159 | 44  | 109 |
| i=33   | 546 | 93  | 431 |
| i=34   | 308 | 389 | 241 |
| i=35   | 190 | 294 | 472 |
| i=36   | 93  | 331 | 203 |

Çizelge Ek. 1.5: Problem seti 5.

| Talep No (i)/<br>Devinimli Envanter Tipi (j) | j=1 | j=2 | j=3 |
|--|-----|-----|-----|
| i=1  | 65  | 710 | 333 |
| i=2  | 623 | 182 | 628 |
| i=3  | 657 | 462 | 437 |
| i=4  | 93  | 218 | 150 |
| i=5  | 95  | 470 | 374 |
| i=6  | 214 | 68  | 597 |
| i=7  | 429 | 703 | 63  |
| i=8  | 260 | 644 | 609 |
| i=9  | 367 | 26  | 100 |
| i=10   | 490 | 476 | 400 |
| i=11   | 13  | 116 | 244 |
| i=12   | 566 | 277 | 367 |
| i=13   | 354 | 649 | 107 |
| i=14   | 367 | 410 | 305 |
| i=15   | 564 | 438 | 53  |
| i=16   | 551 | 326 | 475 |
| i=17   | 562 | 196 | 505 |
| i=18   | 547 | 474 | 381 |
| i=19   | 96  | 427 | 150 |
| i=20   | 620 | 440 | 467 |
| i=21   | 507 | 235 | 96  |
| i=22   | 716 | 595 | 121 |
| i=23   | 686 | 127 | 672 |
| i=24   | 386 | 33  | 30  |
| i=25   | 371 | 539 | 701 |
| i=26   | 288 | 545 | 488 |
| i=27   | 145 | 483 | 421 |
| i=28   | 486 | 590 | 257 |
| i=29   | 701 | 327 | 226 |
| i=30   | 51  | 708 | 95  |
| i=31   | 485 | 510 | 151 |
| i=32   | 173 | 433 | 449 |
| i=33   | 694 | 670 | 318 |
| i=34   | 509 | 259 | 103 |
| i=35   | 316 | 645 | 400 |
| i=36   | 309 | 340 | 437 |

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Fatma Sedanur Öztürk  
**Uyruğu** : T.C.  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 07.03.1993 / Altındağ-Ankara  
**E-posta** : fsedanur.ozturk@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2018, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği, Endüstri Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

| Yıl          | Yer                             | Görev                                    |
|--------------|---------------------------------|--|
| 2017 - Şu an | NuRD (COMODO) Innovation Center | Proje Yönetimi Uzmanı                    |
| 2016 - 2018  | TOBB ETÜ                        | Araştırma Burslu Yüksek Lisans Öğrencisi |

**YABANCI DİL:** İngilizce

### TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Ozturk, F.S., Ertogral, K.,** (2018), An Integrated Production Scheduling and Workforce Capacity Planning Model and Analyses for Maintenance Repair Operations in the Airline Industry, *29<sup>th</sup> European Conference on Operational Research*, Valencia, İspanya, 8-11 Temmuz.
- Ertogral, K., **Ozturk, F.S.,** (2018). An integrated production scheduling and workforce capacity planning model for the maintenance and repair operations in airline industry, *Computers and Industrial Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.022>.

