

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI**

**ÇOKLU ONARIM AĞINDA ONARIM SEVİYESİ ANALİZİNE İLİŞKİN  
ÖNERİLEN YENİ MODEL VE ÇOK AMAÇLI BİR YAKLAŞIM**

**HAZIRLAYAN  
İSMAİL BIÇAKCI**

**DOKTORA TEZİ**

**ANKARA 2021**



**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI**

**ÇOKLU ONARIM AĞINDA ONARIM SEVİYESİ ANALİZİNE İLİŞKİN  
ÖNERİLEN YENİ MODEL VE ÇOK AMAÇLI BİR YAKLAŞIM**

**HAZIRLAYAN**

**İSMAİL BIÇAKCI**

**DOKTORA TEZİ**

**TEZ DANIŞMANI**

**PROF.DR. YUSUF TANSEL İÇ**

**ANKARA 2021**

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı “Endüstri Mühendisliği” Doktora Programı çerçevesinde İsmail Bıçakçı tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 18 / 06 / 2021

**Tez Adı:** Çoklu Onarım Ağında Onarım Seviyesi Analizine İlişkin Önerilen Yeni Model ve Çok Amaçlı Bir Yaklaşım

<b>Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı - Soyadı, Kurumu )</b>		<b>İmza</b>
Prof. Dr. Berna Dengiz	Başkent Üniversitesi	.....
Prof. Dr. Esra Karasakal	Orta Doğu Teknik Üniversitesi	.....
Prof. Dr. Gülçin Büyükoçkan Feyzioğlu	Galatasaray Üniversitesi	.....
Prof. Dr. Yusuf Tansel İç	Başkent Üniversitesi	.....
Dr.Öğr. Üyesi Barış Keçeci	Başkent Üniversitesi	.....

**ONAY**

Prof.Dr. Ömer Faruk Elaldı  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Müdürü

Tarih: ... / ... / .....

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU**

Tarih: 06/07/ 2021

Öğrencinin Adı, Soyadı: İsmail BIÇAKCI

Öğrencinin Numarası: 21210306

Anabilim Dalı: Endüstri Mühendisliği

Programı: Endüstri Mühendisliği

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı: Prof.Dr. Yusuf Tansel İÇ

Tez Başlığı: Çoklu Onarım Ağında Onarım Seviyesi Analizine İlişkin Önerilen Yeni Model ve Çok Amaçlı Bir Yaklaşım

Yukarıda başlığı belirtilen Doktora tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 64 sayfalık kısmına ilişkin, 06/07/2021 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 10'dur. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası: .....

**ONAY**

Tarih: ... / ... / 20...

Öğrenci Danışmanı

Prof.Dr. Yusuf Tansel İÇ

## TEŞEKKÜR

Yazar, bu çalışmanın gerçekleőmesinde katkılarından dolayı, aşağıda adı geçen kiőilere içtenlikle teşekkür eder.

Sayın hocam Prof. Dr. Yusuf Tansel İ'e (tez danışmanı) alıőmanın baőarıya ulaőmasında her zaman yardımcı, yol gősterici ve anlayıőlı olduğu için...

Sayın hocam Prof. Dr. Esra KARASAKAL'a çalışmaya yapmış olduğu katkı ve destek için...

Sayın hocam Prof. Dr. Berna DENGİZ'e her zaman yol gősterici ve anlayıőlı olduğu için...

Sayın Papatya Sevgin BIÇAKCI'ya (eőim) yardımını esirgemediği ve her zaman destek olduğu için...

Sayın Saime BIÇAKCI'ya (annem) ve Sayın Metin BIÇAKCI'ya (babam) bana her zaman desteklerini hissettirdikleri ve anlayıő gősterdikleri için...

## ÖZET

**İsmail BIÇAKCI**

### **ÇOKLU ONARIM AĞINDA ONARIM SEVİYESİ ANALİZİ İÇİN ÖNERİLEN YENİ MODEL VE ÇOK AMAÇLI BİR YAKLAŞIM**

**Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**2021**

Onarım Seviyesi Analizi (OSA), (i) arızalı alt bileşenin onarılıp onarılmaması ile ilgili kararın verilmesi; (ii) verilen onarım kararının hangi onarım kademesinde yapılacağı ve (iii) onarım kararı için kullanılacak gerekli kaynağın konuşlanacağı en uygun konumun belirlenmesi için kullanılmaktadır. Uçak, gemi, tank gibi stratejik önem taşıyan ve yüksek maliyetli silah sistemlerinin ömür devri süreleri uzun olmakla birlikte; ömür devri maliyetleri de son derece yüksektir. OSA, silah sistemlerinin ömür devri maliyetlerini enküçüklemede önemli bir rol oynamaktadır. Bu tez kapsamında, kaynaklarda OSA probleminin temel yapısını ele alan modellere göre daha kapsamlı ve esnek yapıda yeni bir matematiksel model geliştirilmiştir. Önerilen model, bileşenlerin alt onarım kademesindeki bir tesisten üst onarım kademesindeki önceden tanımlanmış tesise sevk edilmesine izin veren ve onarım ağındaki tesislerin konumlarını tanımlayarak her tesis arasındaki malzeme hareket yollarını belirleyen çoklu yukarı akış yaklaşımını kullanmaktadır. Önerilen modelin performansı, üretilen kıyaslama problemleri aracılığıyla test edilmiş ve sonuçlar tekli yukarı akış yaklaşımı ile karşılaştırılmıştır. Yapılan sayısal analizler sonucunda, önerilen modelin tekli yukarı akış seçenekli modelden daha etkili olduğu ve toplam onarım maliyetlerini ortalama %4,85 oranında düşürdüğü görülmüştür. Silah sistemlerinin oldukça yüksek ömür devri maliyetleri olduğu dikkate alındığında, bu oran çok önemli bir maliyet tasarrufunu ifade etmektedir. Çoklu yukarı akış yaklaşımına ek olarak, onarım süresini (malzeme teslim sürelerinden etkilenen) ve onarım maliyetlerini birlikte enküçükleyen çok amaçlı bir karar modeli önerilmiştir. Önerilen çok amaçlı model, aynı zamanda arızalı bileşenlerin sevkıyatı için karayolu, demiryolu ve hava yolu gibi farklı sevk seçeneklerini dikkate alabilmektedir. Önerilen çok amaçlı model, toplam onarım maliyetleri ile toplam onarım süresi arasındaki ödünleşmenin gösterilmesi için bir örnek problem üzerinde çözülmüş ve bu kapsamda epsilon kısıt yöntemi kullanılarak Pareto eğrisi oluşturulmuştur.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Onarım Seviyesi Analizi, Bakım, Ömür Devri Maliyeti, Matematiksel Model, Çok Amaçlı Optimizasyon, Epsilon Kısıt Yöntemi, Pareto Eğrisi.

## ABSTRACT

**İsmail BIÇAKCI**

### **A NEW FORMULATION FOR THE LEVEL OF REPAIR ANALYSIS IN MULTIPLE ECHELON NETWORK AND A MULTI-OBJECTIVE APPROACH**

**Başkent University Institute of Science and Engineering**

**Department of Industrial Engineering**

**2021**

Level of Repair Analysis (LORA) determines (i) the best decision during a malfunction of each product component; (ii) the location in the repair network to perform the decision and (iii) the quantity of required resources in each facility. Capital goods have long life cycles and their total life cycle costs are extremely high. LORA plays an important role in minimizing the total life cycle costs of the capital goods. Within the scope of this thesis, a new mathematical model has been developed for the LORA problem, which is more comprehensive and flexible than the other pure LORA models in the literature. The proposed model uses the multiple upstream approach that allows the transfer of the components from a location in the lower echelon to the predefined locations in the upper echelon, and determines the material movement paths between each facility, defining the facilities' locations in the repair network. The performance of the proposed model is tested on generated benchmark problems and the results are compared with the single upstream model. As a result of computational analyses, it is concluded that the proposed model is more effective than the single upstream model and reduces the maintenance costs 4.85% on average, which means enormous cost savings when considering the total life cycle costs of capital goods. In addition to the multiple upstream approach, a multi-objective decision model that minimizes both the repair time (affected by lead times) and the repair costs is proposed. The proposed multi-objective model also considers the movement of the defective components to be performed by multiple transportation modes such as highway, railway, and airway. In order to demonstrate the trade-off between total repair costs and total repair time, the proposed multi-objective model is solved on an illustrative example and the Pareto frontier is generated by using the epsilon constraint method.

**KEY-WORDS:** Level of Repair Analysis, Maintenance, Life Cycle Cost, Mathematical Model, Multi-objective Optimization, Epsilon Constraint Method, Pareto Frontier.



# İÇİNDEKİLER LİSTESİ

	Sayfa
TEŞEKKÜR .....	i
ÖZET .....	ii
ABSTRACT .....	iii
İÇİNDEKİLER LİSTESİ.....	iv
TABLolar LİSTESİ .....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	viii
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Motivasyon.....	1
1.1.1. Ömür devri maliyetinin önemi.....	2
1.1.2. Silah sistemlerinin yüksek hazır bulunma oranının önemi.....	2
1.1.3. Entegre lojistik destek çalışmaları .....	3
1.2. Sistemlerin ve Onarım Ağının Yapısı .....	4
1.3. Onarım Seviyesi Analizi (OSA).....	6
1.4. Tezin Amacı, Hedefleri ve İçeriği.....	7
2. LİTERATÜR TARAMASI .....	9
2.1. Literatürde Mevcut Olan Çalışmalar .....	9
2.2. Literatürde Var Olan Çalışmaların Karşılaştırılması .....	10
3. ONARIM SEVİYESİ ANALİZİ PROBLEMİ İÇİN ÇOKLU YUKARI AKIŞLI ONARIM AĞI ÖNERİSİ.....	16
3.1. Tekli Yukarı Akışlı ve Çoklu Yukarı Akışlı Onarım Ağı Arasındaki Fark .....	16
3.2. Örnek Problem .....	17
3.3. Ara Sonuçlar .....	24
4. EN KÜÇÜK MALİYETLİ AKIŞ MODELİNİN ÇOKLU YUKARI AKIŞ MODELİNE DÖNÜŞTÜRÜLMESİ .....	25
4.1. En Küçük Maliyetli Akış Modeli.....	25
4.2. En Küçük Maliyetli Akış Modelinin Çoklu Yukarı Akış Modeline Dönüştürülmesi İçin Yapılan İşlemler .....	29
4.3. Bazı Kıyaslama Problemlerinin Çözümü .....	32
4.4. En Küçük Maliyetli Akış Modeline Yönelik Yapılan Eleştiri ve Değerlendirmeler .....	33
4.4.1. Modelleme güçlükleri .....	33
4.4.2. Bileşen bazında onarım zamanı kısıtı getirilmesi .....	33

4.5. Ara Sonuçlar .....	35
5. ONARIM SEVİYESİ ANALİZİ PROBLEMİ İÇİN YENİ KARAR MODELİ VE SAYISAL ANALİZLER.....	36
5.1. Yeni Karar Modelinin Diğer Modellerden Ayrışımı .....	36
5.2. Yeni Karar Modeli.....	38
5.3. Literatürdeki Modeller İçin Yapılan Sayısal Analizler .....	42
5.3.1. Baros [25] modeli .....	42
5.3.2. Baros ve Riley [26] modeli .....	42
5.3.3. Saranga ve Kumar [27] modeli .....	42
5.3.4. Brick ve Uchoa [30] modeli .....	42
5.3.5. Basten vd. [28] modeli .....	43
5.3.6. Basten vd. [15] modeli .....	44
5.3.7. Basten vd. [29] modeli .....	45
5.4. Yeni Karar Modeli Üzerinde Yapılan Sayısal Analizler .....	45
5.4.1. Varsayımlar .....	45
5.4.2. Kıyaslama Problemlerinin Çözümü.....	47
5.5. Ara Sonuçlar .....	48
6. ONARIM SEVİYESİ ANALİZİ PROBLEMİNDE ELE ALINAN UZANTILAR .....	50
6.1. Onarım Süresi ve Farklı Sevk Türlerinin Onarım Seviyesi Analizi Problemi Üzerindeki Etkisi .....	50
6.2. Farklı Sevk Türlerinin Yeni Karar Modeline Eklenmesi .....	51
6.3. Eş Zamanlı Olarak Onarım Süresinin Enküçüklenmesi .....	52
6.4. Epsilon Kısıt Yöntemi.....	53
6.5. Epsilon Kısıt Yönteminin Çoklu Yukarı Akış Modeli İçin Uygulanması.....	54
6.6. Ara Sonuçlar .....	56
7. SONUÇLAR .....	58
KAYNAKLAR.....	61

## TABLolar LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Tablo 2.1. Kaynaklardaki çalışmaların karşılaştırılması .....	15
Tablo 3.1. Değişken ve Sabit Maliyetler .....	21
Tablo 3.2. Bileşen Bazlı Maliyet Karşılaştırma Tablosu.....	24
Tablo 4.1. Bileşen Bazlı Maliyet Karşılaştırma Tablosu.....	33
Tablo 5.1. Sayısal Analizlerde Kullanılan Problem Büyüklükleri (Brick ve Uchoa [30]).....	43
Tablo 5.2. Sayısal Analizlerde Kullanılan Parametre Değerleri – 1 (Basten vd. [15]).....	44
Tablo 5.3. Sayısal Analizlerde Kullanılan Parametre Değerleri – 2 (Basten vd. [15]).....	45
Tablo 5.4. Sayısal Analizlerde Kullanılan Parametre Değerleri.....	47
Tablo 5.5. Çözümü Araştırılan Kıyaslama Problemleri Tablosu .....	48
Tablo 6.1. Sayısal Analizlerde Kullanılan Parametre Değerleri.....	54

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 1.1. Ürün Ağacı Yapısı .....	4
Şekil 1.2. Onarım Kademe Yapısı.....	5
Şekil 2.1. Simetrik ve Asimetrik Onarım Ağı.....	10
Şekil 2.2. Kümelenmemiş ve Kümelenmiş Onarım Ağı .....	11
Şekil 2.3. Çok Seviyeli Ürün Kırılımı .....	12
Şekil 2.4. Tekli Yukarı Akış Seçenekli Onarım Ağı .....	14
Şekil 2.5. Çoklu Yukarı Akış Seçenekli Onarım Ağı.....	15
Şekil 3.1. Tekli Yukarı Akışlı ve Çoklu Yukarı Akışlı Onarım Ağı Arasındaki Fark .....	17
Şekil 3.2. Örnek HDÜ .....	17
Şekil 3.3. Güç Grubu Ürün Ağacı .....	19
Şekil 3.4. Örnek Onarım Ağı .....	20
Şekil 3.5. Tekli Yukarı Akış Seçenekli Onarım Ağı Çözümü .....	22
Şekil 3.6. Çoklu Yukarı Akış Seçenekli Onarım Ağı Çözümü.....	23
Şekil 3.7. Örnek Ürün Yapısı.....	25
Şekil 3.8. Örnek Onarım Ağı .....	25
Şekil 3.9. Kaynak Düğümü.....	26
Şekil 3.10. Karar Düğümü .....	26
Şekil 3.11. Dönüşüm Düğümü .....	27
Şekil 3.12. Bitiş Düğümü.....	27
Şekil 3.13. Onarım ağı örnek gösterim.....	28
Şekil 4.1. Tekli Yukarı Akış Seçenekli Onarım Ağı – Genişletilmiş Örnek .....	30
Şekil 4.2. Çoklu Yukarı Akış Seçenekli Onarım Ağı – Genişletilmiş Örnek.....	30
Şekil 4.3. Tekli Yukarı Akış Seçeneğine Sahip Onarım Ağında Sevk Kararı.....	30
Şekil 4.4. İki Model Arasında Sevk Hareketinin Karşılaştırılması .....	31
Şekil 4.5. Sevk Seçeneği Eklenmiş Örnek En Küçük Maliyetli Akış Problemi.....	35
Şekil 5.1. Örnek Düğüm ve Ayrıt Gösterimi .....	39
Şekil 5.2. Karar Değişkeninin Örnek Gösterimi .....	40
Şekil 6.1. Farklı Sevk Türleri ile Örnek Düğüm ve Ayrıt Gösterimi .....	51
Şekil 6.2. Farklı Sevk Türleri ile Karar Değişkeninin Örnek Gösterimi .....	52
Şekil 6.3. Örnek Problemin Pareto Eğrisi.....	55
Şekil 6.4. Toplam Onarım Süresi ve Toplam Onarım Maliyeti Arasındaki Fark .....	56

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AC	Alliance Committee (İttifak Ortaklığı)
DDÜ	Depoda Değiştirilebilir Ünite
ELD	Entegre Lojistik Destek
HDÜ	Hatta Değiştirilebilir Ünite
LORA	Level of Repair Analysis (Onarım Seviyesi Analizi)
LRU	Line Replaceable Unit (Hatta Değiştirilebilir Ünite)
OSA	Onarım Seviyesi Analizi
SRU	Shop Replaceable Unit (Atölyede Değiştirilebilir Ünite)

# 1. GİRİŞ

Bu bölümde savunma sanayi ürünü olan silah sistemlerinin ömür devri süreçleri ile ilgili genel bilgi verilmiş, sistemlerin içinde buldukları onarım ağları ve ürün yapısı tanıtılmış ve Onarım Seviyesi Analizi (OSA) probleminin detayları ayrıntılı biçimde açıklanmıştır. Ayrıca tezin amacı, hedefleri ve kapsamı hakkında bilgilendirme yapılmıştır.

## 1.1. Motivasyon

Savunma sanayi ürünü olan silah sistemleri, ömür devirleri süresince kavramsal tasarım, detay tasarım, geliştirme, üretim, işletme ve envanterden çıkarılma gibi süreçlerinden geçerler [1]. Kullanım alanına ve özelliklerine göre değişkenlik göstermekle birlikte, genel olarak bir silah sistemi ortalama 30-40 yıllık bir ömür devri süresi düşünülerek tasarlanır ve üretilir. Bu süre içerisinde işletme ve lojistik destek süreci, kapsadığı süre ve maliyet açısından en büyük payı alan süreçtir. Silah sistemlerinin toplam ömür devri maliyet dağılımının, üretim ve yatırım maliyetleri için %30, işletme ve idame maliyetleri için %70 olarak gerçekleştiği tahmin edilmektedir [2].

Silah sistemlerinin ömür devri süresince arızalanması kaçınılmaz bir gerçektir. Meydana gelen arızalar, sistemlerin hizmet dışı kalmasına ya da sisteme ait bir alt fonksiyonun yerine getirilememesine neden olabilmektedir. Uçak, gemi, tank gibi stratejik önem taşıyan, yüksek maliyetli ve karmaşık ürün yapısına sahip silah sistemleri arıza nedeniyle hizmet dışı kaldıklarında, tekrar hizmete girmeleri için ilgili arızanın giderilmesinden başka bir seçenek bulunmamaktadır. Bunun yanında arıza sayısı arttıkça sistemlerin işletme ve idame maliyetleri yükselmekte, arızalı kaldığı sürelerde kullanımları mümkün olmamaktadır [3]. Bu nedenle, karşılaşılan arızaların hızlı ve maliyet etkin bir şekilde giderilmesi kritik bir konu olarak ele alınmaktadır.

Silah Sistemlerinin tam kapasite hizmet verebilmesi için bakımlarının düzenli olarak yapılması gerekmektedir. Silah sistemleri için uygulanan bakımlar, (i) Planlı/önleyici bakım ve (ii) düzeltici bakım olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [4]. Planlı/önleyici bakımlar sistemin güvenlik gereksinimlerini, görev/operasyon başarısını ve güvenilirlik seviyesini idame etmek için yapılmaktadır [5]. Düzeltici bakım ise sistemde beklenmedik bir arıza olduğunda, arızanın giderilmesi için yapılan faaliyetlerden meydana gelmektedir. Sistemlerin servis dışı kalması, genelde beklenmedik zamanlarda karşılaşılan bu arızalar nedeniyle gerçekleşmektedir.

### **1.1.1. Ömür devri maliyetinin önemi**

Yüksek maliyetlere karşılık gelmesi nedeniyle, silah sistemlerinin ömür devri maliyetleri kullanıcılar için büyük önem taşımaktadır. Bu açıdan, silah sistemleri ile ilgili verilen satın alma kararlarında ilk yatırım maliyetinin yanında ömür devri maliyeti de her geçen gün daha fazla dikkate alınmaktadır [6]. Amerika Birleşik Devletleri [7] ve İngiltere Savunma Bakanlığı tarafından yayımlanmış [8] askeri standartlarda, silah sistemlerinin tedariklerine ilişkin olarak ilk yatırım maliyetinin yanında toplam ömür devri maliyetinin de değerlendirilmesi konusuna yer verilmektedir [9]. Bunun yanında, Kuzey Atlantik Paktı'nın (NATO) askeri kanadında yer alan İttifak Komitesi 327 – “Alliance Committee 327” (AC/327) – Ömür Devri Yönetim Grubu bünyesinde ömür devri maliyeti konusunda çalışmalar yapılmaktadır.

Ömür devri maliyetlerinin her geçen gün daha fazla önem kazanması, sistem üreticilerini daha düşük ömür devri maliyeti olan sistemler üretmeye zorlamakta ve bunu başaran sistem üreticileri rakiplerine karşı büyük avantajlar elde etmektedir. Bu kapsamda sistem üreticileri, bir sistemin düşük ömür devri maliyetine sahip olup olmadığının belirlenebilmesi amacıyla, ömür devri maliyet analizi çalışmaları yapmaktadır. Bu çalışmalar, sözleşme gereksinimi olarak kullanıcılar ile paylaşılmasının yanı sıra, kullanım dönemi lojistik destek kapsamında ihtiyaç sahibi ve üretici arasında yapılabilecek sözleşmeler için bir alt yapı oluşturmaktadır. Bunların yanı sıra, ömür devri maliyet analizi (i) sistemin performans ve kullanılabilirlik gereksinimlerinin karşılanabilmesi ve üretim programına uyulabilmesi amacıyla geliştirilen alternatiflerin maliyetlerinin belirlenmesi, (ii) farklı tasarım ve destek seçeneklerinin toplam ömür devri maliyetine etkisinin tahmin edilebilmesi ve (iii) seçilen tasarımın maliyet tahmininin ömür devrinde ilerledikçe iyileştirilebilmesi amacıyla da kullanılmaktadır [1].

Diğer yandan, sistemin ne şekilde tasarlandığının da ömür devri maliyeti üzerinde çok önemli etkileri vardır. Konsept tasarım aşamasında ya da bu aşamaya kadar tasarıma ve lojistik destek çözümüne ilişkin olarak alınan kararlar, sistemin ömür devri maliyetinin %85'lik bir bölümünü taahhüt altına almaktadır [1].

### **1.1.2. Silah sistemlerinin yüksek hazır bulunma oranının önemi**

Hazır bulunma oranı, bir silah sisteminin tüm fonksiyonları ile görevini yapmak için hazır olma oranıdır. Silah sistemlerinin yüksek ömür devri maliyetleri, karmaşık ürün yapıları ve üstlendikleri stratejik sorumluluklar nedeniyle en üst seviyede hazır bulunma

oranına sahip olmaları büyük önem taşımaktadır. Herhangi bir nedenden dolayı hizmet dışı kalmaları söz konusu olduğunda çok ciddi boyutta sonuçlarla karşı karşıya kalılabilmektedir. Bu durumu açıklayan bazı örneklere aşağıda yer verilmiştir.

1. Hava savunma sisteminde yer alan hava radarlarından birinin arızalanması durumunda sistem tam kapasite görev yapamayacak ve gelen füze tehditlerine karşı istenilen seviyede koruma sağlayamayacaktır.
2. Sahil güvenlik helikopterinin arama kurtarma vincinin arızalı olması sorumlu olduğu bölgede yapılacak bir arama kurtarma faaliyetinde görev alamamasına neden olacak ve hayati tehlikesi olan kazazedelere ihtiyaç duyduğu desteği sağlayamayacaktır.
3. Firkateyn sınıfı bir savaş gemisinin ana makinesinde yer alan kritik bir alt sistemin arıza yapması tüm gemiyi harekattan sakıt hale getirebilecek ve yüzlerce kişinin üzerinde görev yaptığı, milyonlarca USD değerindeki platformun kullanılmamasına neden olacaktır.

### **1.1.3. Entegre lojistik destek çalışmaları**

Teknoloji alanında yaşanan gelişmeler nedeniyle tasarlanan ürünlerin yapısı her geçen gün daha karmaşık bir hale gelmektedir. Kaynakların etkin bir şekilde kullanılması ve aynı zamanda sistemlerin yüksek güvenilirlik ve hazır bulunma oranlarına sahip olmaları için, ihtiyaç sahibi makamlar ile üretici firmaların çeşitli mühendislik çalışmaları yapması gerekmektedir. Bu kapsamda, silah sistemlerinin ömür devri süresince lojistik destek ihtiyaçlarının en etkin bir şekilde planlanıp geliştirilebilmesi için sistem üreticileri tarafından Entegre Lojistik Destek (ELD) çalışmaları yürütülür.

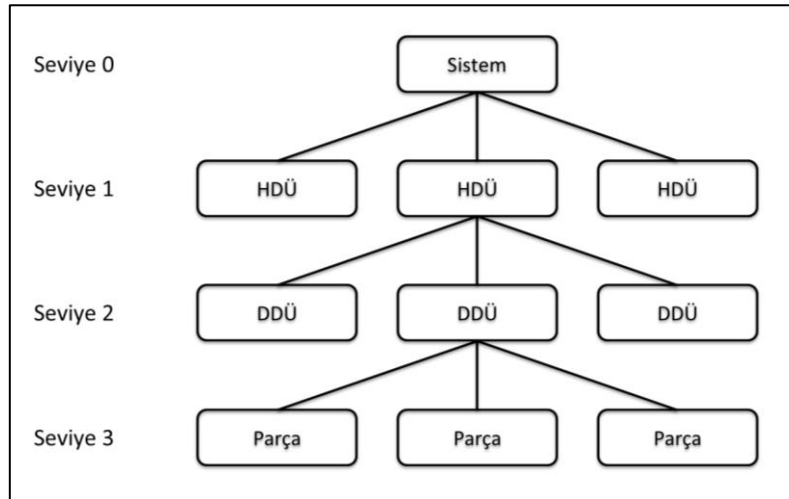
ABD Savunma Bakanlığının 5000.39 sayılı direktifi [10] ELD'yi şu şekilde tanımlamaktadır: "Entegre Lojistik Destek, tasarlanmış bir sistemin ömür devrinin kullanım aşamasında asgari bir maliyetle desteklenebilmesi için sistemin desteğini etkilemek için kullanılan yönetimsel ve teknik yaklaşımdır" [11]. Sistem üreticileri tarafından yapılan ELD çalışmaları, silah sistemlerinin güvenilirlik, kullanılabilirlik, bakım, desteklenebilirlik ve test edilebilirlik açısından kalitesini arttırmak amacıyla yapılmaktadır [1]. ELD faaliyetleri kapsamında, sistem üreticileri tarafından lojistik destek analizi kayıtları, teknik dokümantasyon, yedek parça desteği, yer destek ve test ekipmanı desteği, kullanıcı ve bakım eğitimleri vb. ürün ve hizmetler hazırlanmakta ve kullanıcıların hizmetine sunulmaktadır.



Kullanıcılar, ELD kapsamında sunulan ürün ve hizmetler sayesinde kazandıkları yetenekler ile garanti dönemi sonrasında sistemlerin idamesini kendi imkânları ile gidermeyi tercih edebilmektedir. İdame ihtiyacını kendi imkânları ile gidermek yerine, kullanıcı bu ihtiyacı üreticiden aldığı bakım onarım hizmeti ile gidermeyi tercih edebilmektedir. Çoğu zaman hizmet satışının mal satışından daha karlı olduğu bilinmektedir [12, 13, 14]. Bu nedenle, üretici firmalar bu tip hizmet sözleşmeleri iyi bir gelir kaynağı olarak görmektedir. Bu açıdan, karlılığın arttırılabilmesi için bir silah sisteminin ömür devri boyunca maruz kalacağı bakım onarım maliyetleri, en küçüklenmesi arzulanan ve tasarım aşamasından itibaren dikkate alınması gereken önemli bir faktör olarak ortaya çıkmaktadır.

## 1.2. Sistemlerin ve Onarım Ağının Yapısı

Karmaşık yapılara sahip olan silah sistemleri, ürün ağacı şeklinde modellenen birçok bileşenden oluşmaktadır. Silah sistemlerini oluşturan bileşenler, ürün ağacı içerisinde Şekil 1.1’de belirtildiği gibi baba oğul ilişkisine sahip olmakla birlikte çok kademeli bir yapı sergilemektedir. Her bir silah sistemi bir veya birden fazla Hatta Değiştirilebilir Ünite (HDÜ)’den, her HDÜ de bir veya birden fazla Depoda Değiştirilebilir Ünite (DDÜ)’den oluşmaktadır. Benzer şekilde DDÜ’ler de daha küçük parçalardan oluşabilmektedirler. Bu kavramların her biri ürün ağacında bir seviyeye karşılık gelmektedir. Şekil 1.1’de verilen örnekte silah sistemi Seviye 0’ı HDÜ’ler Seviye 1’i, DDÜ’ler Seviye 2’yi ve parçalar Seviye 3’ü oluşturmaktadır.

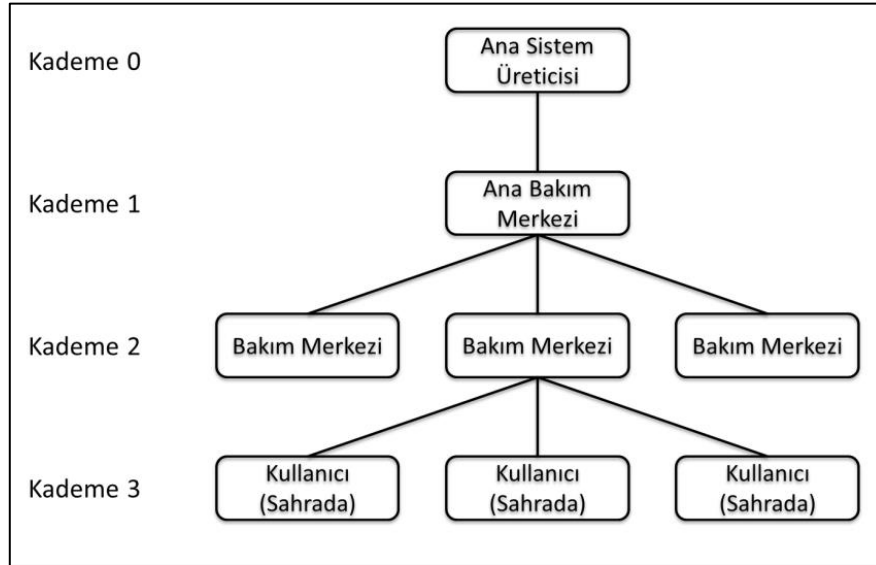


Şekil 1.1. Ürün Ağacı Yapısı

Silah sisteminde meydana gelen arızaların hızlı bir şekilde çözülmesi gerekmektedir. Bu nedenle, karşılaşılan arızalar genellikle arızalı HDÜ’nün sökülmesi ve çalışan bir yedeği

ile değiştirilmesi ile giderilir. Sökülen arızalı HDÜ, arızanın çeşidine göre değişmekle birlikte ya onarılır ya da hurdaya ayrılır. HDÜ hurdaya ayrılacaksa yerine yenisinin tedarik edilmesi ihtiyacı ortaya çıkar. Eğer onarımı yapılacaksa, HDÜ'nün arızalı DDÜ'sünün çalışan bir yedeğiyle değiştirilmesi gerekir. Bu durumda, DDÜ'nün de onarımı ya da hurdaya ayrılması kararı ortaya çıkar.

Arızaların giderilmesi konusunda gündeme gelen diğer bir soru ise bu onarımların nerede yapılacağıın belirlenmesidir. Karşılaşılan arızaların onarımları veya yedek parçaların stoklanması sistem için tanımlanmış bir onarım ağında bulunan bakım noktalarında yapılmaktadır. Örneğin, kara sistemi olan bir ana muharebe tankını düşünecek olursak, karşılaşılan arızaya müdahale sahrada, bakım merkezinde, ana bakım merkezinde ya da ana üretici firma tesislerinde yapılabilir. Söz konusu bakım merkezleri, birbirleri ile arasında hiyerarşik bir ilişki olacak şekilde çok aşamalı onarım kademe ağını oluşturur. Bu tip çok aşamalı onarım kademe ağının örnek gösterimi Şekil 1.2'de verilmiştir. Verilen örnekte Ana Sistem Üreticisi Kademe sıfırı, Ana Bakım Merkezi Kademe 1'i, Bakım Merkezleri Kademe 2'yi ve aracın fiilen bulunduğu bölge olan Sahra Kademe 3'ü oluşturmaktadır.



Şekil 1.2. Onarım Kademe Yapısı

Onarımın nerede yapılacağı ile ilgili verilecek karar, katlanılması gereken sabit ve değişken maliyetleri gündeme getirmektedir. Ulaşım maliyetleri, yedek parça maliyetleri, işçilik maliyetleri gibi maliyetler değişken maliyetlere; özel destek ve test ekipmanları, tesis maliyetleri, yedek parça tutma maliyetleri gibi maliyetler de sabit maliyetlere örnek olarak verilebilir.

### 1.3. Onarım Seviyesi Analizi (OSA)

Yukarıda yapılan açıklamalardan anlaşılacağı gibi, karmaşık yapıya sahip ve icra ettikleri görevler açısından büyük önem taşıyan silah sistemleri, bakım onarım faaliyetleri açısından oldukça karmaşık bir onarım ağına tabi olmaktadır. Onarım ağının büyüklüğü ve karmaşıklık seviyesi katlanılan değişken ve sabit maliyetler üzerinde büyük etkiye sahiptir. Silah sistemlerinin işletme ve idame maliyetlerinin ömür devri maliyetinin en büyük kısmını oluşturması nedeniyle, toplam onarım maliyetlerinin hesaplanması ve bu maliyetlerin enküçüklenmesi için bazı yöntemlerin geliştirilmesi gündeme gelmektedir.

Ömür devri maliyeti ve hazır bulunma oranı üzerindeki en büyük etki, beklenmedik anlarda karşılaşılan arızalar için yapılan düzeltici bakım faaliyetleri tarafından sağlanmaktadır [9]. Para ve zaman açısından değerlendirildiğinde, bu tip arızaların en düşük maliyetle giderilmesi için sistemin ve lojistik destek yapısının tasarlanması ve bu aşamada önemli bazı kararların alınması gerekmektedir.

Askeri uygulamalarda, çalışır durumdaki bir sistemin arızalanması durumunda ilk olarak bu sistemin tekrar nasıl çalışır duruma getirileceği sorusu ortaya çıkmaktadır. Bir arıza ile karşılaşıldığında arızanın çeşidine ya da ihtiyaç duyulacak yedek parça vb. ihtiyaçlara bakılmaksızın ilk olarak arızalı HDÜ sistemden sökülür ve mevcut ise çalışan bir yedeği ile değiştirilir. Eğer yedekte çalışır durumda bir HDÜ yok ise o zaman sistem arıza giderilene kadar hizmet dışı kalır. Sistem hizmet dışı kaldığı sürede operasyonda aktif kullanılmamasından kaynaklanan önemli maliyetler ortaya çıkar. Bu nedenle sistemin uzun süre hizmet dışı kalması istenmez. Arızanın en kısa zamanda giderilebilmesi için arızalanan HDÜ'nün neden arızalandığı tespit edilir ve onarım için ya HDÜ'nün kendisi ya da arızalı HDÜ/DDÜ'sü ilgili onarım kademesine sevk edilir.

Arızalı alt bileşenin onarılıp onarılmaması ile ilgili kararın verilmesi ve bu işlemlerin hangi onarım kademesinde yapılacağı sorusunun cevabı yapılan Onarım Seviyesi Analizi (OSA) – “Level of Repair Analysis” (LORA) – ile belirlenir. OSA'nın amaçlarından bir diğeri, verilen onarım kararı için kullanılacak gerekli kaynağın en uygun konuş yerinin belirlenmesidir. OSA, sistemin ömür devri süresince en düşük potansiyel ömür devri maliyetine sahip olmasını sağlar [15]. ABD Savunma Bakanlığı tarafından ise OSA, ekonomik, ekonomik olmayan ve duyarlılık değerlendirmelerinin yanı sıra harekât hazırlık gereklilikleri ile elde edilen kısıtlamalara dayanarak, bakım konseptlerinin geliştirilmesinde,

tasarımın etkilenmesinde ve arızalı bileşenlerin onarılacağı veya elden çıkarılacağı bakım seviyesinin belirlenmesinde kullanılan analitik bir metodoloji olarak tanımlanmaktadır [16].

#### **1.4. Tezin Amacı, Hedefleri ve İçeriği**

Bu tez çalışmasının temel amacı, karmaşık ürün yapısına sahip ve yüksek maliyetli savunma sanayi ürünleri ile diğer sektörlerde benzer ürün yapısına sahip ürünleri kapsayacak şekilde, en düşük ömür devri maliyetini sağlamak üzere gerçekleştirilecek OSA için bir karar modeli geliştirmektir.

Çalışmanın temel amacı doğrultusunda belirlenen hedefler aşağıda belirtilmiştir:

1. Geliştirilen modelin çok seviyeli ürün yapısının ve çok kademeli onarım ağının olduğu durumlara cevap vermesi ve gerçek hayat problemlerinde kullanılabilecek esnek bir yapıya sahip olması.
2. Sabit maliyet kalemleri açısından kullanılmayan kapasitelerin dikkate alınmasıyla sabit maliyet kalemlerinden tasarruf sağlanarak daha düşük maliyetli çözümlere ulaşılması.
3. Malzemelerin onarım maliyetlerinin yanında tedarik ve teslim sürelerini kapsayan onarım sürelerinin de OSA hesaplamalarına dahil edilmesi.
4. Malzemelerin sevki için farklı taşıma yöntemlerinin kullanılması ve farklı taşıma yöntemlerinin maliyetleri ile birlikte teslim sürelerinin hesaplamalara dahil edilmesi.
5. Karar vericilerin kullanımına sunulmak üzere maliyet ve teslim süresi arasındaki ödünleşmenin ortaya konması.

Tezin ikinci bölümünde, OSA ile ilgili literatürde var olan çalışmalar incelenmiş ve var olan modeller irdelenmiştir. Üçüncü bölümde, tekli yukarı akış seçenekli ve çoklu yukarı akış seçenekli onarım ağı arasındaki fark açıklanmış ve çoklu yukarı akış özelliğinin getireceği avantajların basit bir şekilde gösterilebilmesi için örnek problem çözülmüştür. Dördüncü bölümde, literatürde bulunan Basten vd. [15] tarafından önerilen modelin tanıtılmasına, söz konusu modelin çoklu yukarı akış modeline nasıl dönüştürülebileceğine, kıyaslama problemlerinin çözülmesine ve elde edilen ara sonuçlara yer verilmiştir. Beşinci bölümde, çoklu yukarı akış seçenekli onarım ağı için önerilen yeni karar modelinin literatürde var olan modellerden ayrılan yönleri tartışılmıştır. Ayrıca, karar modelinin detayları açıklanarak, literatürde mevcut olan çalışmalardaki OSA problemi için gerçekleştirilen sayısal analizler sonuçlarıyla önerilen yeni karar modelinin sayısal analiz

sonuçları karşılaştırılmıştır. Altıncı bölümde, OSA problemi kapsamında onarım süresinin ve farklı sevk türlerinin dikkate alınmasına yönelik yeni karar modeli üzerinde yapılan çalışmaların detaylarına yer verilmiştir. Sonuç bölümünde ise tez kapsamında elde edilen bulgulara ve gelecek çalışmalara yönelik önerilere yer verilmiştir.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde, OSA ile ilgili literatürde bulunan çalışmalar incelenmiş ve var olan modellerin detayları aktarılmıştır.

### 2.1. Literatürde Mevcut Olan Çalışmalar

Literatürde OSA problemine ilişkin yapılmış çalışmalar iki gruba ayrılabilir. İlk grup, OSA probleminin temel yapısını tartışan, matematiksel modellere odaklanan ve gerçek hayat uygulamalarını ele alan çalışmaları içerir. İkinci gruptaki çalışmalar ise OSA problemi ve yedek parça stoklama problemini birlikte ele alarak; bu iki problemin eş zamanlı olarak eniyenmesine odaklanır. Alfredsson [17], Basten vd. [18], Cranshaw vd. [19], Basten vd. [20], Liu vd. [21] Ghaddar vd. [22], Rawat vd. [23] ve Rawat ve Lad [24] çalışmaları bu kategoriye dahil edilebilir. Söz konusu çalışmalar tezin konusu ile ilişkili görülmediğinden literatür taramasına dahil edilmemiştir.

Literatürde OSA probleminin temel yapısına odaklanan sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. OSA problemi için önerilen ilk model Barros [25] tarafından önerilmiştir. Bu modelde, aynı kademede onarılan alt sistemlerin aynı kaynakları kullandıkları varsayılmıştır. Barros [25], çalışmasında iki onarım kademesine sahip onarım ağını ve iki seviyeli ürün kırılımına sahip bir sistemi ele almış, geliştirdiği tam sayılı doğrusal karar modeli küçük ölçekli problemler için makul sürelerde LINDO yazılımı ile çözmüştür. Barros ve Riley [26] aynı problemi ele almış, problemi dal sınır algoritması ve açgözlü (greedy) algoritma kullanarak çözmüştür. Saranga ve Dinesh Kumar [27], Barros [25] tarafından ele alınan problemden farklı olarak, her alt parçanın kendi maliyetlerini dikkate almış ve problemi Evolver isimli Genetik Algoritma çözücü paket yazılım ile çözmüştür. Söz edilen çalışmada yazarlar, üç seviyeli yapıya sahip bir sistemi ve üç kademeli bir onarım ağını ele almıştır.

Basten vd. [28], Barros [25] ve Saranga ve Dinesh Kumar [27] tarafından önerilen modelleri genelleyerek yeni bir model geliştirmiştir. Çalışmada, üretilen kıyaslama problemleri önerilen model ile CPLEX yazılımı kullanılarak çözülmüş ve sonuçlar var olan iki model ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, yazarlar bu çalışmada OSA problemini kapasite kısıtsız tesis yeri seçim problemine indirgeyerek, problemin NP-hard olduğunu göstermiştir. Basten vd. [15], Basten vd. [28]'nin önerdiği modeli aynı kademe seviyesinde yer alan farklı noktalarda farklı kararların verilebileceği şekilde genişletmiş ve OSA problemini en küçük maliyetli akış problemi olarak yeniden modellemiştir. Bu şekilde çok daha kısa sürelerde en

iyi çözüme ulaşılabilmektedir. Basten vd. [29], Basten vd. [28]'nin geliştirdiği modele yönelik başarısız onarım olasılığı, hata bulunmama olasılığı, sonlu kaynak kapasitesi, aynı alt sisteme ait birden fazla hata türü ve onarım hizmetinin dış kaynaktan tedariki gibi bazı uzantıları tartışmış ve söz edilen ilk üç uzantıyı test etmiştir.

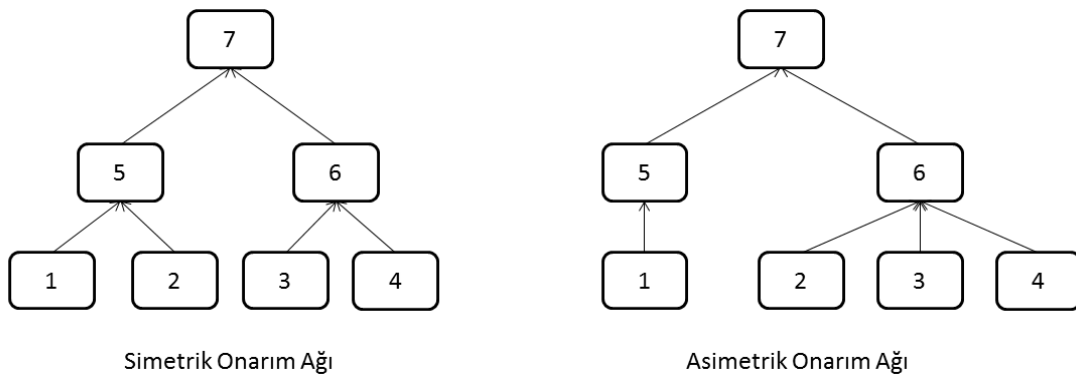
Brick ve Uchoa [30], OSA problemi ile kuruluş yeri seçimi problemini birleştirmiştir. Yazarlar, iki seviyeli yapıya sahip bir sistemi ve iki kademeli bir onarım ağını ele almışlar ve önerilen modeli CPLEX yazılımı kullanarak çözmüştür. Bouachera vd. [31], problemi Melez Genetik (Genetik ve Tabu Algoritması) Algoritma kullanarak çözmüş ve algoritmanın etkinliğini bir örnek uygulama ile göstermiştir.

## 2.2. Literatürde Var Olan Çalışmaların Karşılaştırılması

Literatürde OSA probleminin temel yapısını tartışan çalışmalar, problemin farklı özelliklerini ele almaktadır. Bu çalışmalarda ele alınan problemin özellikleri aşağıda açıklanmıştır.

### i. Asimetrik onarım ağı

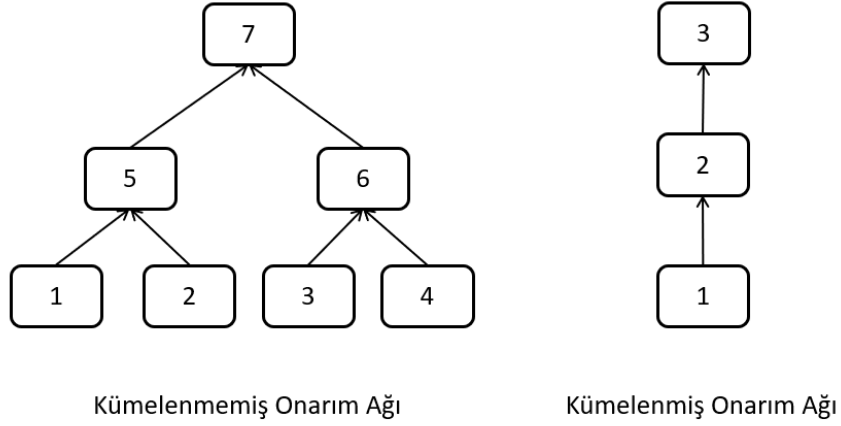
Bir onarım ağı simetrik yapıya sahip olmayabilir. Harekât ve lojistik gereklilikler nedeniyle onarım tesisleri farklı sayıda sistemi desteklemek durumunda kalabilmektedir. Örneğin, yasa dışı göçün daha yoğun olma ihtimali olan bölgede konuşlandırılacak deniz aracı sayısı, diğer bölgelere göre daha fazla olabilir ve dolayısıyla o bölgede yer alan onarım tesisi diğer bölgelerde yer alan onarım tesislerine göre daha fazla deniz aracına destek sağlamak durumunda kalabilir. Gerçek hayatta karşılaşılan bu gibi durumlara çözüm sağlayabilmesi açısından, OSA problemi için en iyi çözümün arandığı çalışmalarda onarım ağının olası asimetrik yapısının dikkate alınması gerekmektedir. Simetrik ve asimetrik onarım ağı arasındaki fark şematik olarak Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Simetrik ve Asimetrik Onarım Ağı

## ii. Kümelenmiş onarım ağı

Kümelenmiş onarım ağında, OSA probleminin çözümünü kolaylaştırmak için onarım ağı içerisinde aynı kademe seviyesinde yer alan tüm tesislerin verileri toplanır ve o kademe seviyesinde tek tesis varmış gibi hareket edilmektedir. Böylece, verilen bir karar o seviyede yer alan tüm tesisler için aynı şekilde uygulanmaktadır. Fakat bu varsayım en iyi çözüme ulaşılabilmesi durumunda neden olabilmektedir. Kümelenmiş onarım ağının simgesel gösterimi Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2. Kümelenmemiş ve Kümelenmiş Onarım Ağı

## iii. Ürün kırılımı

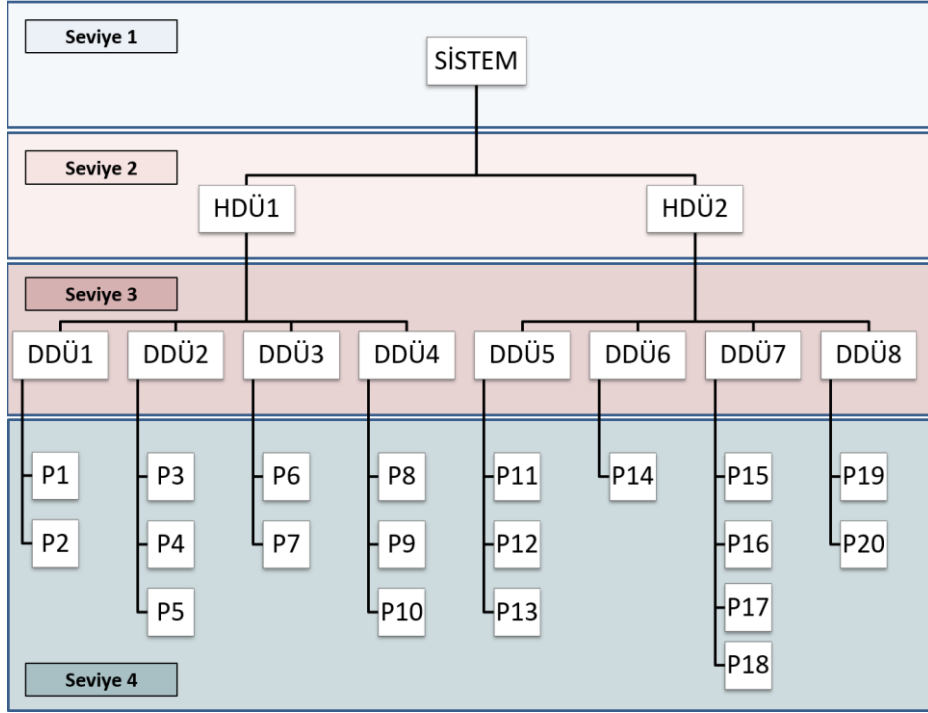
Silah sistemlerinin ürün ağaç yapısı baba oğul ilişkisine sahip çok kademeli ürün kırılımı şeklinde tasarlanmaktadır. Tasarlanan sistemin yapısı karmaşıklıklaştıkça, ağaç yapısında yer alan ürün kırılım seviyesi de artmaktadır. Ürün kırılım seviyesinin artması, OSA probleminin yapısını daha karmaşık hale getirmesi nedeniyle büyük önem taşımaktadır. Genelde silah sistemleri gibi karmaşık sistemler çok seviyeli bir ürün kırılımına sahiptir. Bu gibi sistemler için yapılacak onarım seviyesi analizinde en iyi çözümün bulunabilmesi için kullanılacak modellerin çok seviyeli ürün kırılımı yapısını dikkate alabiliyor olması gerekmektedir. Çok seviyeli ürün kırılımının örnek gösterimi Şekil 2.3’te verilmiştir.

## iv. Onarım kademe seviyesi

Onarım ağı birden fazla kademe seviyesinden oluşmaktadır. Örnek bir onarım ağının gösterimi Şekil 2.2’de verilmiştir. Amerikan ordusunda yapılan bakım onarım faaliyetleri genel olarak kullanıcı (organizational), birlik (intermediate) ve depo (depot) seviyesi olmak



üzere üç seviyeden oluşmaktadır [16]. İngiltere ordusunda ise onarım ağı dört farklı kademe seviyesinden [32] oluşmaktadır.



Şekil 2.3. Çok Seviyeli Ürün Kırılımı

Onarım kademe seviyelerinde icra edilecek bakım faaliyetlerinin kapsamı ihtiyaç duyulan özel ekipmanın, tesislerin, personelin, teknik verilerin vb. özelliklerine göre belirlenmektedir. İdeal bir onarım seviyesi analizinde en iyi çözümün bulunabilmesi için kullanılacak modellerin çoklu onarım kademe seviyesine sahip olan onarım ağlarını da kapsayabilmesi gerekmektedir. Bu nedenle onarım ağında yer alan kademe seviye sayısı OSA problemi açısından büyük önem taşımaktadır.

#### v. Onarım seçenekleri

OSA, ürünün arızalanması durumunda, onarılması ile ilgili kararın verilmesi ve bu işlemlerin hangi onarım kademesinde yapılması gerektiğini belirlemektedir. OSA kapsamında verilen kararlar aşağıda belirtilmiştir.

1. Elden çıkarmak (Discard): Arızalı bileşenin hurdaya ayrılması ve yenisinin tedarik edilmesidir.
2. Onarım (Repair): Arızalı bileşenin bir alt bileşeninin çalışan bir yedeği ile değiştirilmek suretiyle onarılmasıdır.
3. Sevk (Move): Arızalı bileşenin onarım ağında bir üst kademeye sevk edilmesidir. Sevk edilen bileşen için onarım ağının bir üst kademesinde de bir onarım

seçeneğinin seçilmesi gerekmektedir. Onarım ağında yer alan en üst seviye için bir üst seviyeye sevk seçeneği bulunmamaktadır [15].

vi. Kapasite kısıtı

Gerçek hayat problemlerinde kapasite her zaman zorlayıcı bir kısıt olarak karşımıza çıkmaktadır. Onarım ağında yer alan tesislerin de belirli bir kapasitesi bulunmaktadır. Söz konusu kapasite, onarım tesisleri için bünyelerinde bulunan özel destek ve test ekipmanlarının yıllık kullanım kapasitesi, fiziki alan kapasitesi ya da verilen karar için harcayabilecekleri işçilik kapasitesi gibi farklı şekilde tanımlanabilmektedir. Kapasite kısıtlarını göz ardı etmek, gerçek hayat problemlerine cevap veremeyen basitleştirici bir yaklaşımdır. Onarım seviyesi analizinin amaçlarından biri de onarım için kullanılacak gerekli kaynağın nerede konuşlanacağına belirlenmesidir. Gerçek hayat problemlerine cevap verebilmek amacıyla OSA için kullanılacak modelin kaynak kapasite kısıtını dikkate alıyor olması gerekmektedir.

vii. Onarım ağının tam modellenmesi

Silah sistemleri görev şartları ve tasarım özelliklerine göre farklı onarım ağlarına tabi olabilmektedir. Yukarıda da bahsedildiği gibi bazı onarım ağlarının yapısı asimetrik olabilir. Bu gibi durumlarda onarım ağının tam olarak modellenmesi gerekmektedir. Asimetrik yapıya onarım ağlarının tam modellenmesi ile modellenmemesi arasında %7'nin üzerinde bir maliyet farkı bulunabilmektedir [15]. Onarım ağının tam olarak modellenmesi, Şekil 2.1'de belirtilen simetrik ve asimetrik ağlar arasındaki farkın dikkate alınmasını sağlamaktadır.

viii. Farklı hata türleri

Ürün kırılımında bulunan bir bileşen için birden fazla hata türü tanımlanabilmekte ve bu farklı hata türleri için farklı onarım kararlarının alınması gerekebilmektedir. Farklı hata türlerinin dikkate alınabilmesi için modelin değiştirilmesi gerekmez. Bunun yerine modelde bileşen terimi yerine hata türü terimi kullanılabilir. Bu durumda maliyetlerin, hata türleri arasındaki baba-oğul ilişkisinin ve hata türleri ile kullanılan kaynaklar arasındaki ilişkilerin uygun olarak dönüştürülmesi gerekmektedir [15].

ix. Hurda seçeneği için sabit maliyet

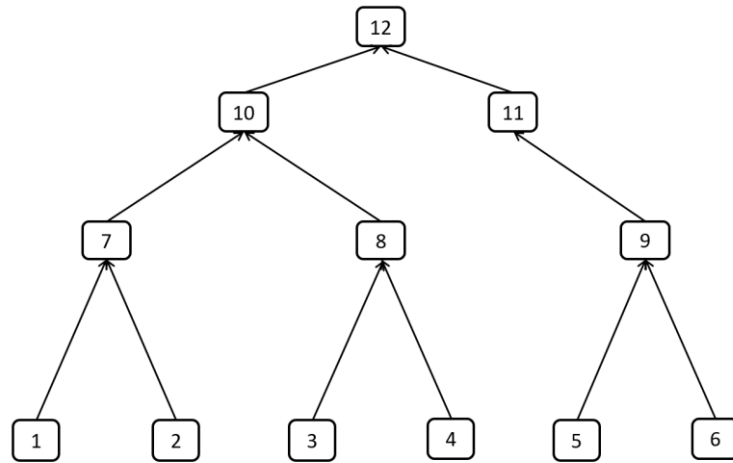
Hurdaya ayırma kararı verilen bir bileşenin hurda işlemlerinin yapılabilmesi için çeşitli maliyetlere katlanması gerekebilmektedir. Özellikle, askeri amaçlar için tasarlanmış ekipmanların elden çıkarılma aşamasında çevre güvenliğinin sağlanması, doğanın

korunması ve ekipmanların askeri yönlerinin kaldırılması gibi konular için sabit maliyet gerektiren ilave önlemler alınabilmektedir. Ömür devri süreçlerinde bu durum genelde ihmal edilmektedir [1]. Onarım seviyesi analizi çalışmalarında hurda işlemleri için yapılan ve sabit maliyet gerektiren bu gibi durumların da dikkate alınması gerekmektedir.

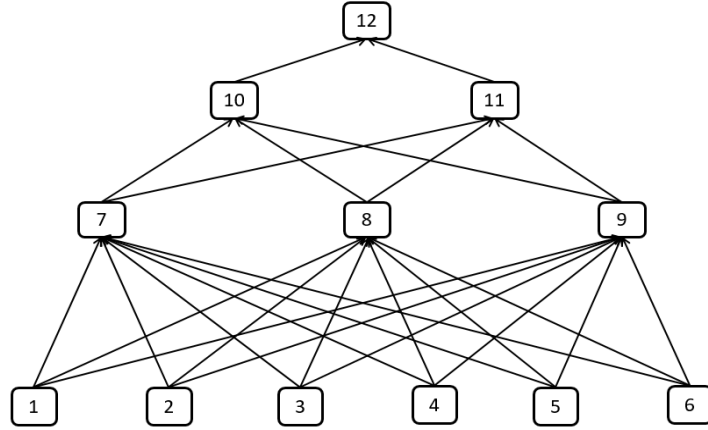
x. Tekli/Çoklu yukarı akış seçeneği

Onarım ağında yer alan tesisler, kademe seviyelerine göre bir üst seviyedeki onarım tesislerine malzeme sevki yapabilmektedir. Bir onarım ağında, alt kademe seviyesindeki bir tesis üst kademe seviyesinden sadece tek bir tesise malzeme sevki yapabiliyorsa, bu onarım ağı tekli yukarı akış (single upstream) seçenekli onarım ağı şeklinde tanımlanmaktadır. Bu durum, aynı onarım kademe seviyesinde yer alan farklı tesisler için mükerrer yatırım harcamalarının yapılmasına neden olabilmektedir. Arızalanan parçaların birden fazla üst kademe onarım tesisine sevk edilebilmesi (multiple upstream) seçeneğinin bulunduğu durumdaki onarım ağları ise çoklu yukarı akış seçenekli onarım ağı olarak adlandırılmaktadır.

Bilindiği gibi çoğu durumda malzeme sevk işlemleri yatırım maliyetlerine oranla çok daha düşük bütçelerle gerçekleşir. Bu durum göz önüne alındığında çoklu yukarı akış seçeneğine sahip onarım ağlarının büyük maliyet avantajı getireceği öngörülmektedir. OSA problemi için kullanılacak modelin çoklu yukarı akış seçenekli onarım ağlarına çözüm getirebilmesi, daha düşük maliyetli çözümler elde edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Tekli ve çoklu yukarı akış seçenekli onarım ağlarının simgesel gösterimi sırasıyla Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.4. Tekli Yukarı Akış Seçenekli Onarım Ağı



Şekil 2.5. Çoklu Yukarı Akış Seçenekli Onarım Ağı

Yukarıda yapılan açıklamalar kapsamında, kaynaklarda var olan modellerin ve bu tez kapsamında önerilen modelin ele aldıkları özelliklere göre karşılaştırmalı gösterimi Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Kaynaklardaki çalışmaların karşılaştırılması

#	Problem Özellikleri	Önerilen Model	Barros [25], Barros ve Riley [26]	Saranga ve Kumar [27]	Brick ve Uchoa [30]	Basten vd. [28]	Basten vd. [15], [29]
1	Asimetrik Onarım Ağı	Evet	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır	Evet
2	Kümelenmiş Onarım Ağı	Hayır	Evet	Evet	Hayır	Evet	Hayır
3	Ürün Kırılımı	Çoklu	İki	Üç	İki	Çoklu	Çoklu
4	Onarım Kademe Seviyesi	Çoklu	İki	Üç	İki	Çoklu	Çoklu
5	Onarım Seçenekleri	S, O, H	S, O, H	S, O, H	O, H	S, O, H	S, O, H
6	Kapasite Kısıtı	Evet	Hayır	Hayır	Evet	Hayır	Evet
7	Onarım Ağının Tam Modellenmesi	Evet	Hayır	Hayır	Evet	Hayır	Evet
8	Farklı Hata Türleri	Hayır	Hayır	Hayır	Evet	Hayır	Hayır
9	Hurda Seçeneği İçin Sabit Maliyet	Evet	Hayır	Evet	Evet	Evet	Evet
10	Tek/Çoklu Yukarı Akış Seçeneği	Çoklu	Tek	Tek	Tek	Tek	Tek

Not: S: Sevki; O: Onarım; H: Hurda.

### **3. ONARIM SEVİYESİ ANALİZİ PROBLEMİ İÇİN ÇOKLU YUKARI AKIŞLI ONARIM AĞI ÖNERİSİ**

OSA problemi için önerilen modelin asimetric onarım ağlarını dikkate alabilmesi, gerçek hayat uygulamalarına daha iyi cevap verebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Literatürde mevcut olan çalışmalar arasında sadece Basten vd. [15] tarafından önerilen model, asimetric onarım ağını ele almıştır. Bunun yanı sıra, OSA problemi için dikkate alınması gereken bir diğer durum, onarım ağlarında çoklu yukarı akış özelliğinin bulunmasıdır. Çoklu yukarı akış özelliği, sabit maliyet yatırımlarının mükerrer olarak yapılmasını önlemesi nedeniyle büyük maliyet avantajları sağlamaktadır. Yapılan tarama sonucunda literatürde çoklu yukarı akış özelliğine cevap verebilen bir çalışmaya rastlanamamıştır. Bu nedenle, OSA problemi için asimetric onarım ağlarını dikkate alan ve eş zamanlı olarak çoklu yukarı akış özelliği taşıyan esnek bir modelin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

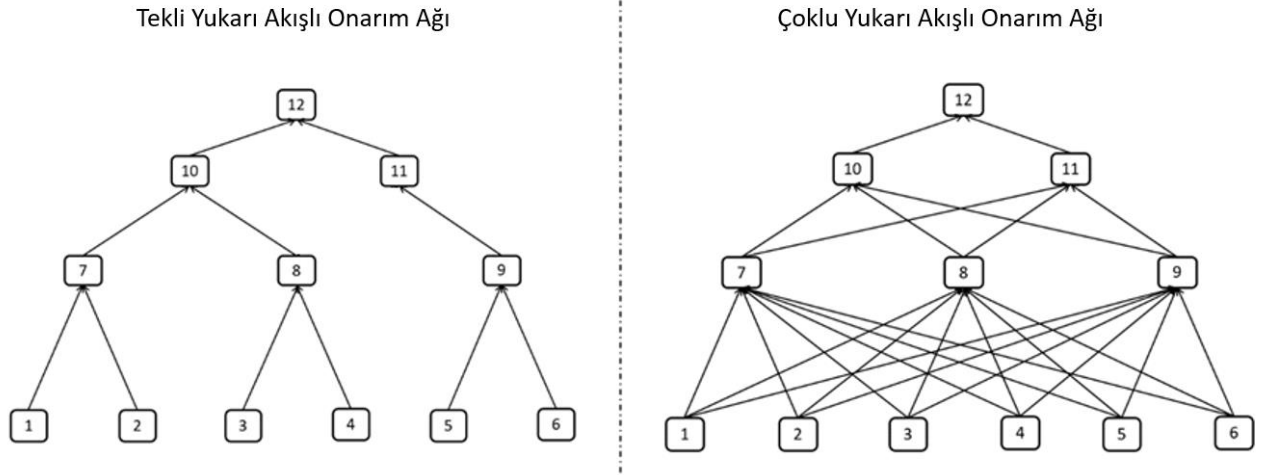
Bu bölümde, tekli yukarı akışlı ve çoklu yukarı akışlı onarım ağı arasındaki fark açıklanmış ve çoklu yukarı akış özelliğinin getireceği avantajların basitleştirilmiş bir şekilde gösterilebilmesi için bir örnek problem çözümüne yer verilmiştir.

#### **3.1. Tekli Yukarı Akışlı ve Çoklu Yukarı Akışlı Onarım Ağı Arasındaki Fark**

Literatürdeki çalışmalarda, OSA problemi için tekli yukarı akış onarım ağları ele alınmıştır. Söz konusu çalışmalarda onarım ağlarını oluşturan tesisler, arızalı bileşenlerin bir üst kademeye sevki için sadece tek bir yukarı akış seçeneğine sahiptir. Bu durumda, arızalı bileşenin bir üst kademeye sevk edilmesi ihtiyacı doğduğunda arızalı bileşenler sadece bağlı oldukları bu üst kademedeki tesise sevk edilebilmektedir. Ancak, bu özellik gerçek hayatta karşılaşılan bazı problemlere çözüm getirmesi açısından yetersiz kalmaktadır. Gerçek hayatta onarım tesisleri, yatırım maliyetlerinin yüksek olması, fiziki alan yetersizliği, personel sayısının ve niteliğinin yetersiz olması gibi kısıtlardan dolayı belirli konularda uzmanlık geliştirmek durumunda kalabilmektedir. Tekli yukarı akış onarım ağı, sabit maliyetlerin tekrarı ve tesisler arasındaki bileşen hareketlerinde esnekliğin sağlanamaması gibi çeşitli dezavantajlara neden olmaktadır.

Bu tez kapsamında önerilen çoklu yukarı akışlı onarım ağında, onarım ağında bulunan tesislerin üst onarım kademesine malzeme sevkleri için birden fazla seçeneği bulunmaktadır. Çoklu yukarı akışlı onarım ağı yaklaşımı, malzeme sevkiyatında artışa sebep olacağı için

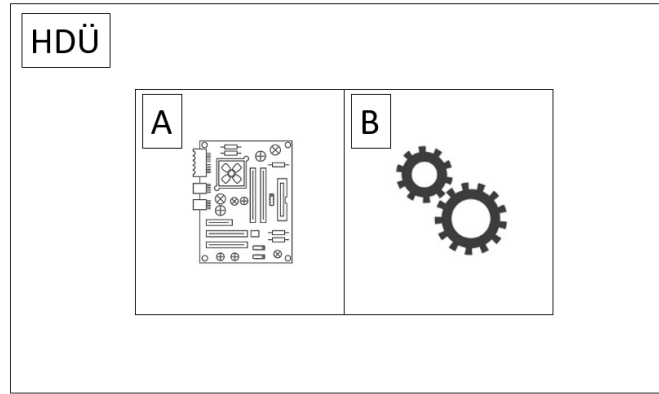
toplam ulaşım maliyetlerinde de artışa neden olabilir; ancak değişken maliyetlerden daha yüksek olarak seyreden sabit maliyet yatırımlarının mükerrer olarak yapılmasını önlemesi nedeniyle toplam maliyet üzerinde önemli seviyede bir tasarruf sağlamaktadır. Tekli yukarı akışlı ve çoklu yukarı akışlı onarım ağları arasındaki fark Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Tekli Yukarı Akışlı ve Çoklu Yukarı Akışlı Onarım Ağı Arasındaki Fark

### 3.2. Örnek Problem

Bu alt bölümde, tekli yukarı akışlı ve çoklu yukarı akışlı onarım ağları arasındaki maliyet farkının daha iyi anlaşılması için bir örnek problem tasarlanmıştır.



Şekil 3.2. Örnek HDÜ

Şekil 3.2’de örnek gösterimi yapılan HDÜ (A) ve (B) olmak üzere iki ana alt bileşenden oluşmaktadır. (A) bileşeni ağırlıklı olarak elektronik parçalardan oluşan bir ekipman iken (B) bileşeni ise mekanik parçalardan oluşan bir bileşendir. Yapı farklılıkları nedeniyle (A) ve (B) ekipmanının onarımı için farklı ham maddeye, farklı tezgahlara ve farklı iş gücü niteliğine ihtiyaç duyulmaktadır.

Söz konusu HDÜ'nün içinde bulunduğu onarım aşında, kaynakların etkin bir şekilde kullanılması maksadıyla onarım tesislerinden (X) onarım tesisi zaman içerisinde elektronik ekipmanlar konusunda uzmanlaşırken, (Y) onarım tesisi mekanik konularda uzmanlaşmış olsun. HDÜ'nün ömür devri süresince, (A) veya (B) bileşenin arızalanması nedeniyle servis dışı kalması durumunda, arızalanan bileşen (X) veya (Y) onarım tesisinden uzmanlık alanına uygun olanına sevk edilecek ve onarım faaliyeti söz konusu tesiste bulunan kabiliyet kullanılarak icra edilecektir. Her iki tesisin aynı kabiliyetlere sahip olmasının istenmesi durumunda ise aynı altyapı yatırımlarının mükerrer olarak diğer tesis için de yapılıyor olması gerekecektir. Böyle bir yatırımın yapılması bütçe, fiziksel alan, iş gücü gibi kaynakların kısıtlı olması nedeniyle çoğu zaman mümkün olmayacaktır. Ayrıca sevk maliyetlerinin sabit yatırım maliyetlerine oranla çok daha düşük olduğu göz önüne alındığında, böyle yatırımların ömür devri maliyetleri açısından maliyet etkin bir karar olmayacağı da görülmektedir.

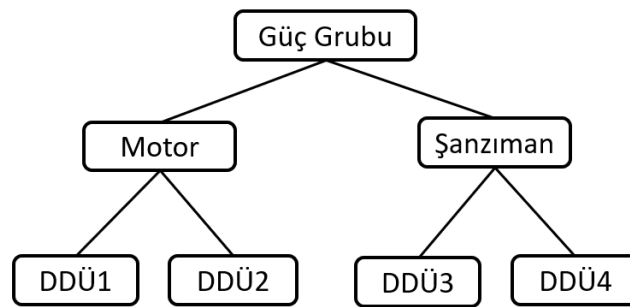
Benzer bir durum gerçek hayat uygulamalarında da yaşanmaktadır. Örneğin; kara sistemlerinden biri olan füze rampaları karşı saldırılardan hızlı bir şekilde kaçabilmek için çoğu zaman hareketli özelliğe sahip olmalıdır. Bu da füze sistemlerinin tekerlekli araçların üzerine monte edilmesini gündeme getirmektedir. Sistemin bütününe dikkate aldığımızda, çok hassas elektronik parçalar ihtiva eden atış kontrol sistemi ile kamyon süspansiyon sistemi gibi mekanik ağırlıklı sistemler bir arada kullanılmaktadır. Atış kontrol sisteminde bulunan hassas bir elektronik kartı onarımı ile süspansiyon sistemindeki bir amortisörün onarımı farklı uzmanlıklar ve altyapı yatırımlarını gerektirmektedir. Bu nedenle, elektronik ekipmanlar ve mekanik parçalar uzmanlık alanlarına uygun olan onarım tesislerine gönderilmektedir.

Bir diğer örnek de deniz sistemlerinden verilebilir. Hava şartlarının daha sert ve yasa dışı faaliyetlerin nispeten düşük olduğu bölgelerde çelik yapıları tercih edilmektedir. Bu tip deniz araçları yapıları nedeniyle ağır deniz şartlarına daha dayanıklı olsa da fiber deniz araçlarına oranla daha düşük süratli olurlar. Diğer taraftan hava şartlarının nispeten daha iyi olduğu ve yüksek oranda yasa dışı faaliyetin gerçekleştiği bölgelerde ise fiber tekneler tercih edilmektedir. Çelik yapıları tercih edildiği bölgeyi (ABC) bölgesi, fiber deniz araçlarının tercih edildiği bölgeyi (DEF) bölgesi olarak adlandıracak olursak, yukarıda bahsedilen durum (ABC) bölgesinde fiber, (DEF) bölgesinde ise çelik deniz araçlarının kullanılmadığı anlamına gelmemektedir. Sayıca az da olsa bu bölgelerde diğer sınıf deniz araçları da bulunmaktadır. Bu iki bölge arasındaki fiziksel

mesafe açısından değerlendirildiğinde, deniz araçlarının sayıları ile orantılı olarak (ABC) bölgesinde yer alan onarım tesisinin çelik deniz araçlarının, (DEF) bölgesinde yer alan onarım tesisinin fiber deniz araçlarının üzerinde uzmanlaşması; (ABC) bölgesinde bulunan fiber deniz araçlarının (DEF) bölgesinde bulunan onarım tesisine, (DEF) bölgesinde yer alan çelik deniz araçlarının (ABC) bölgesine sevk edilmesi daha maliyet etkin bir çözüm olmaktadır.

Basten vd. [15]'nin çalışmasında yukarıda bahsedilen konu dikkate alınmamıştır. Söz konusu çalışmaya göre, arızalanan parça sadece bağlı olduğu tek bir onarım tesisine sevk edilebilmekte ve bu durum tüm tesisler için mükerrer yatırımların yapılmasına neden olmaktadır. Diğer bir deyişle, Şekil 3.2'de verilen örnekte yer alan (A) ve (B) ekipmanı, Basten vd. [15]'nin çalışmasında önerdiği modele göre hangisine bağlı ise ya (X), ya da (Y) tesisinden sadece birine gönderilebilmektedir. Ancak, bu durum sevk maliyetlerinin yatırım maliyetlerine oranla çok düşük olduğu gerçeğini dikkate almamakta ve yatırım maliyetlerini, onarım maliyetlerini artırmakta ve dolayısıyla sistemlerin ömür devri maliyetleri için maliyet etkin olmayan çözümler üretmektedir. Dolayısı ile OSA problemi için geliştirilecek modelin arızalı bileşenlerin bir üst kademe seviyesinde farklı onarım tesislerine sevk edilebilme seçeneklerini kapsayabilmesinin, ömür devri maliyetleri açısından büyük önem taşıdığı görülmektedir. Bu durum aşağıda belirtilen örnek problem ile gösterilmiştir. Bu kapsamda, ilk olarak problemin tanımı yapılmış, daha sonra tekli yukarı akış seçenekli onarım ağında karşılaşılan çözüm ile çoklu yukarı akış seçenekli sahip onarım ağına ait çözümler gösterilerek aralarındaki farklar ortaya konmuştur.

Zırhlı bir muhabere aracına ait güç grubu, motor ve şanzıman olmak üzere iki farklı HDÜ'den oluşmaktadır. Her bir HDÜ de ikişer adet DDÜ'den oluşmaktadır. Güç grubuna ait ürün ağacı Şekil 3.3'te gösterilmiştir.

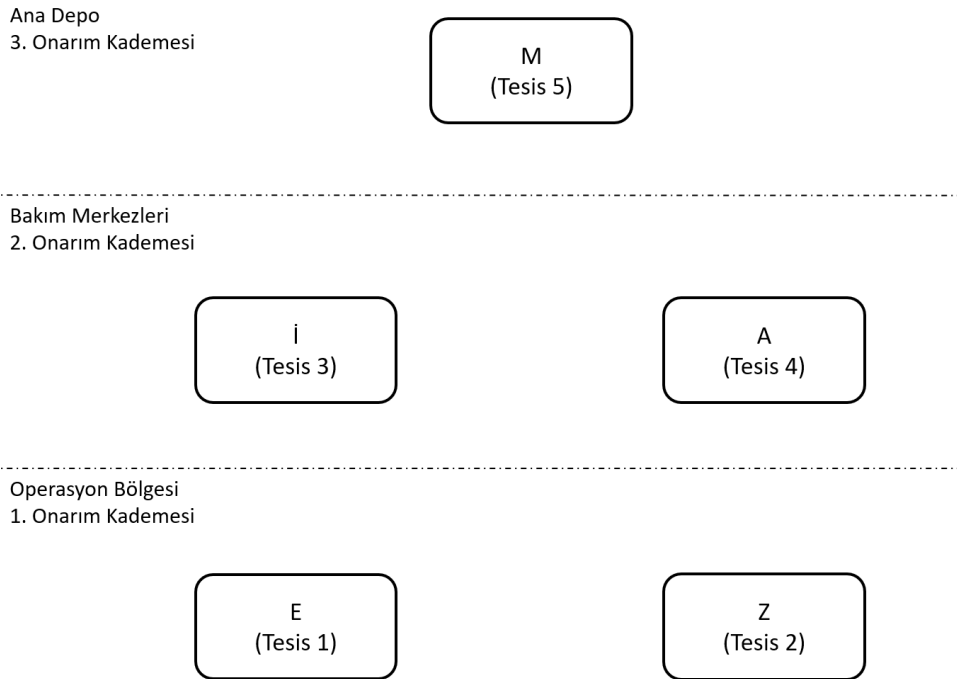


Şekil 3.3. Güç Grubu Ürün Ağacı



Söz konusu zırhlı araçlar (E) ve (Z) olmak üzere iki farklı şehirde konuşlanmış durumdadır. Araçların konuşlu olduğu tesislerde mevcut imkanlar dahilinde güç grubunu araçtan sökme takma işlemleri yapılabilmektedir.

Zırhlı araçların tabi olduğu onarım ağı üç kademededen oluşmaktadır. Araçların konuşlu olduğu (E) ve (Z) bölgesindeki tesisler 1. Onarım Kademesini (Kullanıcı Seviyesi - Operator Level), (İ) ve (A) bölgesinde yer alan Bakım Merkezleri 2. Onarım Kademesini (Birlik Seviyesi - Intermediate Level) ve (M) bölgesinde yer alan Ana Bakım Merkezi 3. Onarım Kademesini (Depo Seviyesi - Depod Level) oluşturmaktadır. Onarım ağının yapısı Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Hesaplamalarda onarım ağında bulunan tesislere ait herhangi bir kapasite kısıtı dikkate alınmamıştır.



Şekil 3.4. Örnek Onarım Ağı

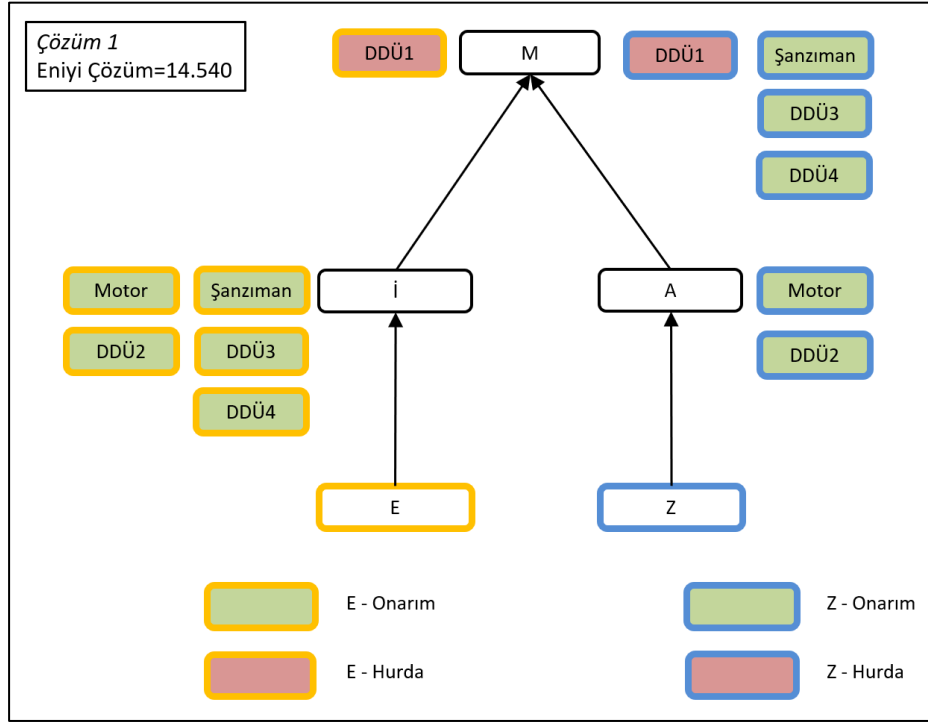
Yapılan onarımlara ilişkin değişken ve sabit olmak üzere iki çeşit maliyet oluşmaktadır. Bu maliyetler onarım kademelerine göre değişiklik göstermektedir. Söz konusu Tablo 3.1'de verilmiştir. Sevk kararı ile ilgili herhangi bir sabit maliyet öngörülmemiştir.

Tablo 3.1. Değişken ve Sabit Maliyetler

Bileşen		Değişken Maliyetler									Sabit Maliyetler									
		Elden Çıkarma (1)			Onarım (2)			Sevk (3)			Elden Çıkarma (1)			Onarım (2)						
		OS1	OS2	OS3	OS1	OS2	OS3	OS2	OS3	OS1	OS2	OS3	OS1	OS2	OS3					
		İ	A	M		İ	A	M	İ	A	M		İ	A	M		İ	A	M	
E	Motor	3500	3325	3430	3150	1750	1400	1400	1225	107	82		350	280	35	245	1523	1348	1348	2146
	DDÜ1	1200	1140	1176	600	600	480	480	420	37	28		120	96	12	84	784	904	904	884
	DDÜ2	1500	1425	1470	1350	750	600	600	525	46	35		150	120	15	105	1135	738	738	904
	Şanzıman	4300	4085	4214	2580	2150	1290	1720	1505	132	101		430	258	516	301	1822	80	878	60
	DDÜ3	800	760	784	480	400	240	320	280	25	19		80	48	96	56	274	21	175	43
	DDÜ4	550	523	539	330	275	165	220	193	17	13		55	33	66	39	188	15	205	8
Z	Motor	3500	3325	3430	3150	1750	1400	1400	1225	116	96		350	280	35	245	1523	1348	1348	2146
	DDÜ1	1200	1140	1176	600	600	480	480	420	40	33		120	96	12	84	933	904	904	884
	DDÜ2	1500	1425	1470	1350	750	600	600	525	50	41		150	120	15	105	932	738	738	904
	Şanzıman	4300	4085	4214	2580	2150	1290	1720	1505	142	117		430	258	516	301	1858	80	878	60
	DDÜ3	800	760	784	480	400	240	320	280	26	22		80	48	96	56	384	21	175	43
	DDÜ4	550	523	539	330	275	165	220	193	18	15		55	33	66	39	216	15	205	8
İ	Motor										244									
	DDÜ1										84									
	DDÜ2										105									
	Şanzıman										300									
	DDÜ3										56									
	DDÜ4										38									
A	Motor										168									
	DDÜ1										58									
	DDÜ2										72									
	Şanzıman										206									
	DDÜ3										38									
	DDÜ4										26									

Not: OS1:Onarım Seviyesi 1; OS2:Onarım Seviyesi 2; OS3:Onarım Seviyesi 3.

Problem ilk olarak tekli yukarı akış seçenekli onarım ağı üzerinde çözülmüştür. Elde edilen çözümün simgesel gösterimi Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Söz konusu gösterimde (E) bölgesinde konuşlu sisteme ait bileşenler sarı, (Z) bölgesinde konuşlu sisteme ait bileşenler ise mavi çerçeve ile işaretlenerek belirtilmiştir. Dolgu rengi olarak belirlenen yeşil ve kırmızı sırasıyla onarım ve hurda onarım seçeneklerini ifade etmektedir. Örneğin, (E) bölgesinde konuşlu olan ve onarım kararı verilen motor, sarı çerçeve ve yeşil dolu rengi ile gösterilmektedir.



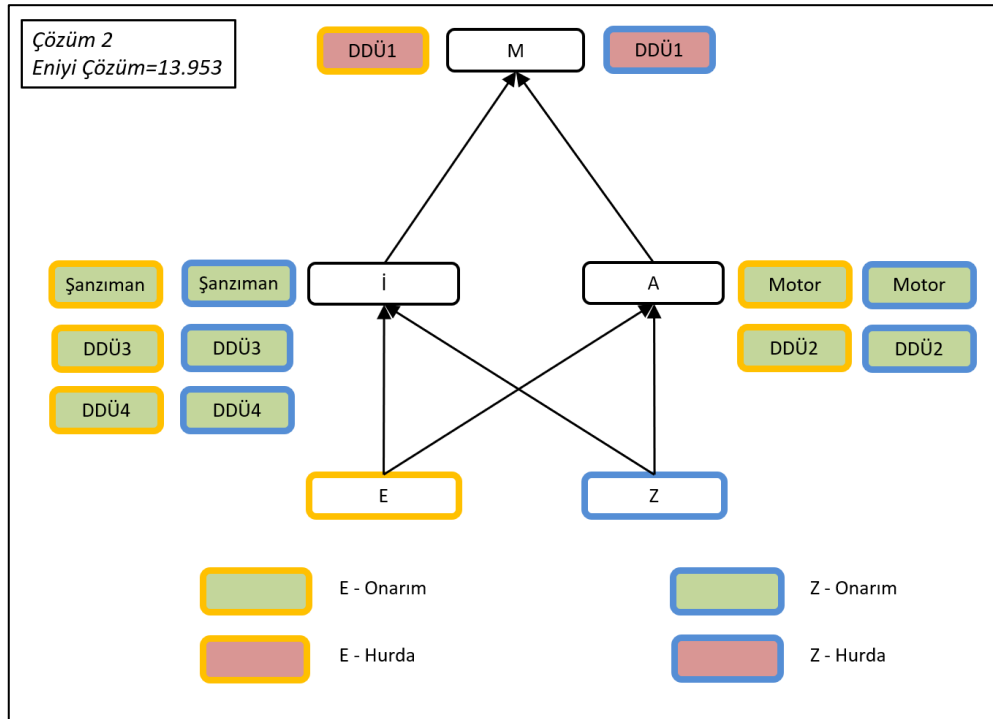
Şekil 3.5. Tekli Yukarı Akış Seçenekli Onarım Ağı Çözümü

Tekli yukarı akış seçenekli onarım ağı üzerinde elde edilen çözümde, (E) bölgesinde konuşlu sisteme ait bileşenlerden motor, şanzıman, DDÜ2, DDÜ3 ve DDÜ4 2. Onarım Kademesinde yer alan (İ) bölgesinde onarılmakta, DDÜ1 ise 3. Onarım Kademesinde yer alan (M) bölgesinde hurdaya ayrılmaktadır. (Z) bölgesinde konuşlu sistem incelendiğinde ise motor ve DDÜ2'ye ilişkin onarım kararı 2. Onarım Kademesinde yer alan (A) bölgesinde olacak şekilde; şanzıman, DDÜ3 ve DDÜ4 onarım kararı ve DDÜ1'in hurdaya ayrılma kararı ise 3. Onarım Kademesinde yer alan (M) Bölgesinde olacak şekilde verilmektedir. Tüm kararlara ilişkin sabit ve değişken maliyetlerin toplamı 14.540 birimlik bir maliyet oluşturmaktadır.

Dikkat edileceği gibi (E) bölgesinde konuşlu sisteme ait bileşenler (İ) ya da (M) bölgesine, (Z) bölgesinde konuşlu sisteme ait bileşenler ise (A) ya da (M) bölgesine sevk

edilmiştir. (İ) ve (A) bölgesindeki onarım seçeneklerine ait sabit ve değişken maliyetlerdeki farklılıklar nedeniyle bileşenler farklı onarım kademe seviyelerinde işlem görmektedir. Örneğin, (E) bölgesindeki şanzıman, DDÜ3 ve DDÜ4 2. Onarım Kademesinde yer alan (İ) bölgesindeki tesiste onarılrken, (Z) bölgesindeki şanzıman, DDÜ3 ve DDÜ4 3. Onarım Kademesinde yer alan (M) bölgesindeki tesiste onarılmaktadır. Bu bileşenler için 2. Onarım Kademesinde ve 3. Onarım Kademesinde farklı maliyetlere katlanması gerekmektedir.

Aynı parametreler kullanılarak problem çoklu yukarı akış seçenekli onarım ağı üzerinde çözülmüş ve edinilen çözüm Şekil 3.6'da verilmiştir. Bu çözümde, (E) bölgesinde konuşlu sisteme ait bileşenlerden şanzıman, DDÜ3 ve DDÜ4 2. Onarım Kademesinde yer alan (İ) bölgesinde, motor ve DDÜ2 2. Onarım Kademesinde yer alan (A) bölgesinde onarılmakta, DDÜ1 ise 3. Onarım Kademesinde yer alan (M) bölgesinde hurdaya ayrılmaktadır. (Z) bölgesinde konuşlu sisteme ait bileşenler için de aynı kararlar verilmektedir. Tüm kararlara ilişkin sabit ve değişken maliyetlerin toplamı 13.953 birimlik bir maliyet oluşturmaktadır.



Şekil 3.6. Çoklu Yukarı Akış Seçenekli Onarım Ağı Çözümü

İki çözüm karşılaştırıldığında tekli yukarı akış seçenekli onarım ağından farklı olarak çoklu yukarı akış seçenekli onarım ağında (E) bölgesinde yer alan bileşenlerin (A) bölgesine, (Z) bölgesinde yer alan bileşenlerin (İ) bölgesine sevk edilebildiği görülmektedir. Her iki

çözümde oluşan kararlara ilişkin bileşen bazında maliyetler Tablo 3.2’de verilmiştir. Yeşil ile işaretlenen sütunlarda maliyet iyileşmesi gözlenmektedir.

Tablo 3.2. Bileşen Bazlı Maliyet Karşılaştırma Tablosu

		<b>Çözüm 1</b> <b>(Tekli Yukarı Akış)</b>	<b>Çözüm 2</b> <b>(Çoklu Yukarı Akış)</b>
<b>E</b>	<b>Motor</b>	2.855	2.830
	<b>DDÜ1</b>	805	770
	<b>DDÜ2</b>	1.384	1.373
	<b>Şanzıman</b>	1.502	1.502
	<b>DDÜ3</b>	286	286
	<b>DDÜ4</b>	197	197
<b>Z</b>	<b>Motor</b>	2.844	2.844
	<b>DDÜ1</b>	775	775
	<b>DDÜ2</b>	1.379	1.379
	<b>Şanzıman</b>	1.888	1.512
	<b>DDÜ3</b>	383	287
	<b>DDÜ4</b>	242	198
		14.540	13.953

### 3.3. Ara Sonuçlar

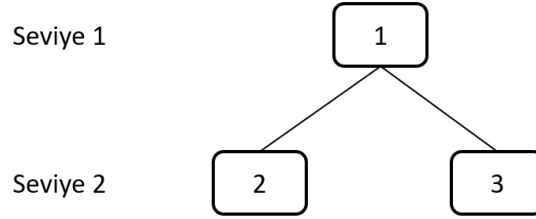
Bir onarım ağında yer alan tesislerde uygulanacak onarım kararları için farklı sabit ve değişken maliyetlere katlanması gerekmektedir. Yukarıda ayrıntılarıyla açıklandığı ve örneklendiği üzere, OSA problemleri kapsamında çoklu yukarı akış seçeneğinin dikkate alınması, sistemlerin ömür devri maliyetleri açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu kapsamda değerlendirildiğinde, onarım maliyetini enküçüklemeyi amaçlayan OSA problemi için önerilen modellerin bu farklılıkları dikkate alan bir yapıya sahip olması büyük önem taşımaktadır. Verilen örnek problemden de anlaşılacağı üzere, çoklu yukarı akış seçenekli onarım ağı dikkate alındığında onarım kararları daha düşük maliyetli olacak şekilde gerçekleşmektedir.

## 4. EN KÜÇÜK MALİYETLİ AKIŞ MODELİNİN ÇOKLU YUKARI AKIŞ MODELİNE DÖNÜŞTÜRÜLMESİ

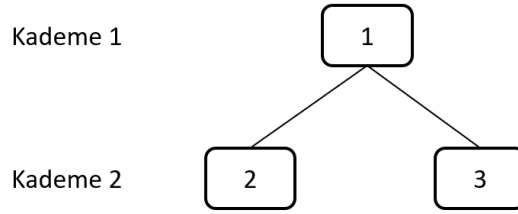
Bu bölümde, öncelikle Basten vd. [15] tarafından önerilen modele yer verilmiş, ardından söz konusu model çoklu yukarı akış modeline dönüştürülmüş ve üretilen kıyaslama problemlerinin çözüm sonuçlarıyla elde edilen ara sonuçlara yer verilmiştir.

### 4.1. En Küçük Maliyetli Akış Modeli

Basten vd. [15] tarafından gerçekleştirilen çalışmada OSA problemi en küçük maliyetli akış modeli dikkate alınarak modellenmiştir. Söz konusu çalışma kapsamında önerilen model tekli yukarı akış seçenekli onarım ağını dikkate almaktadır. Basten vd. [15] tarafından önerilen modelin detaylı anlatımı için toplam 3 bileşenli bir ürün ile 2 seviyeli ve toplam 3 onarım tesisinin bulunduğu bir onarım ağı kullanılmıştır. Söz konusu ağ ve ürün yapısının şematik gösterimi Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Örnek Ürün Yapısı

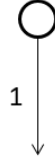


Şekil 3.8. Örnek Onarım Ağı

OSA probleminin en küçük maliyetli akış modeli ile modellenebilmesi için Basten vd. [15] tarafından yapılan çalışma kapsamında dört farklı düğüm tanımlanmıştır. Tanımlanan düğümlerin detayları aşağıda verilmiştir.

i. Kaynak (Source) Düğümü ( $v \in V^s$ )

Belirli bir tesiste konuşlu bir bileşenin arızalanma sayısını gösterir.

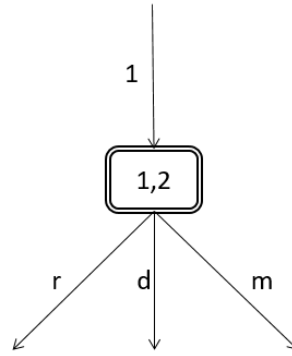


Şekil 3.9. Kaynak Düğümü

(Bileşen 1’de karşılaşılan arızayı temsil etmektedir.)

ii. Karar (Decision) Düğümü ( $v \in V^d$ )

Kaynak düğümünden çıkan ayrıtlar karar düğümüne bağlanır. Bu düğümde arızalı bileşen ile ilgili karar (Elden Çıkarma, Onarım veya Sevk) verilmektedir. Verilecek kararlar ve bu kararlara ilişkin oluşacak değişken ve sabit maliyetler karar düğümünden çıkan ayrıtlar ile ilişkilendirilmiştir.

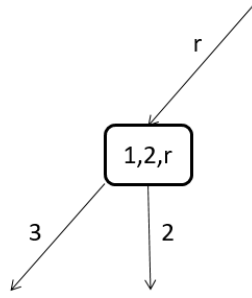


Şekil 3.10. Karar Düğümü

(Bileşen 1’in 2 numaralı onarım tesisinde alacağı kararı temsil etmektedir. “r” onarım kararını, “d” elden çıkarma kararını ve “m” bir üst kademeye sevk kararını temsil etmektedir.)

iii. Dönüşüm (Transformation) Düğümü ( $v \in V^g$ )

Karar düğümünde onarım yapma kararı seçildiği durumlarda, karar düğümünden çıkan ayrıtlar dönüşüm düğümü ile ilişkilendirilmektedir. Bu düğüm arızanın hangi alt bileşenden kaynaklandığının belirlenmesi için kullanılmaktadır. Dönüşüm düğümünden ilgili bileşenin alt bileşen sayısı kadar ayrıtlar çıkmaktadır.

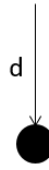


Şekil 3.11. Dönüşüm Dügümü

(Bileşen 1'in 2 numaralı onarım tesisinde onarım kararına ilişkin gösterimdir. 3 ve 2 sırasıyla 1 numaralı bileşenin alt bileşenlerini temsil etmektedir.)

iv. Bitiş (Sink) Dügümü ( $v \in V^t$ )

Bileşen ile ilgili başka bir karar alınmasının gerek kalmadığı durumlarda kullanılmaktadır.



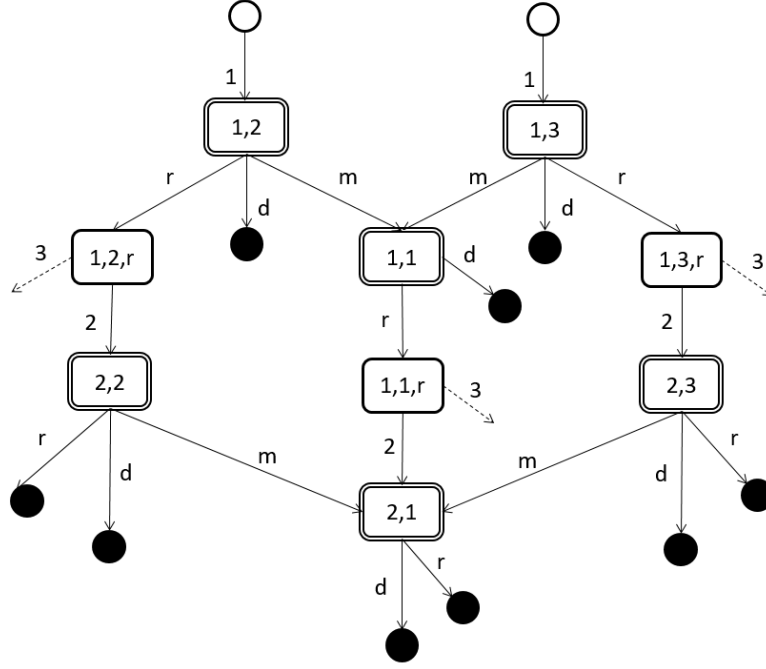
Şekil 3.12. Bitiş Dügümü

(Bileşenin hurdaya ayrıldığını temsil etmektedir.)

Basten vd. [15] tarafından önerilen model kapsamında yukarıda açıklanan düğümlerin onarım ağı üzerindeki örnek gösterimi Şekil 3.13'te gösterilmiştir.

Basten vd. [15] tarafından önerilen modelde F bileşenler kümesini temsil etmektedir.  $f \in F$  bileşenin alt bileşeni  $\Gamma_f$  kümesi ile tanımlanmıştır. Örneğin Şekil 3.7'de  $\Gamma_1 = [2,3]$  olmaktadır. Dönüşüm düğümünden çıkan ve alt bileşenleri tanımlayan  $(v, w)$  ayrıtının arıza yapma oranları  $g_{vw}$  ile tanımlanmıştır. Örneğin  $(v, w)$  ve  $(v, u)$  ayrıtları sırasıyla Şekil 3.7'de belirtilen (2) ve (3) numaralı alt bileşenler ile ilişkilendirilsin. Bileşen (1)'in (2) numaralı bileşen kaynaklı arıza yapma oranı %40, (3) numaralı bileşen kaynaklı arıza yapma oranı %60 olsun. Sırasıyla  $g_{vw}=0,40$  ve  $g_{vu}=0,60$  olacaktır.





Şekil 3.13. Onarım ağı örnek gösterim

Tüm bileşenler için  $d \in D$  olmak üzere üç karar alınabilmektedir. Bunlar elden çıkarma, onarım ve sevk kararlarıdır.  $M$  çok büyük sayıyı temsil etmektedir.  $\Omega_e$  kümesi ise  $(v, w)$  ayrıtı için tanımlanmış kaynakları tanımlamaktadır.

Modelde çok seviyeli onarım ağı ele alınmıştır ve tüm onarım tesisleri  $L$  kümesi ile tanımlanmıştır.  $l$  onarım tesisine arızalı bileşeni gönderebilecek onarım tesislerinin kümesi  $\phi_l$  ile tanımlanmıştır. Örneğin Şekil 3.8’de 1 numaralı tesis için  $\phi_1 = [2,3]$  olmaktadır.

$A$  ayrıtılar kümesi,  $E$  de kaynaklar kümesi olarak tanımlanmıştır.  $c_{vw}^a$  parametresi  $(v, w)$  ayrıtının kullanılması durumunda oluşacak değişken maliyeti,  $c_e$  parametresi de  $e$  kaynağının kullanılması durumunda oluşacak sabit maliyeti göstermektedir.

$X_{vw}$  karar değişkeni  $(v, w)$  ayrıtından geçen akış değerini belirlemektedir.  $Y_e$  0,1 tam sayı karar değişkeni ise  $e$  kaynağının alınması ile ilgili kararı belirlemektedir.

OSA problemi için önerilen en küçük maliyetli akış modeli aşağıda verilmiştir.

$$X_{vw} = s_v \quad \forall (v, w) \in A \mid v \in V^s \quad (1)$$

$$\sum_{u \mid (u,v) \in A} X_{uv} = \sum_{w \mid (v,w) \in A} X_{vw} \quad \forall v \in V^d \quad (2)$$

$$X_{vw} = g_{vw} \cdot \sum_{u \mid (u,v) \in A} X_{uv} \quad \forall (v, w) \in A \mid v \in V^g \quad (3)$$

$$X_{vw} \leq M \cdot Y_e \quad \forall e \in E, \forall (v, w) \in \Omega_e \quad (4)$$

$$X_{vw} \geq 0 \quad \forall (v, w) \in A \quad (5)$$

$$Y_e \in \{0,1\} \quad \forall e \in E \quad (6)$$

k. a.

$$\text{Enk} \sum_{(v,w) \in A} c_{vw}^a \cdot X_{vw} + \sum_{e \in E} c_e Y_e \quad (7)$$

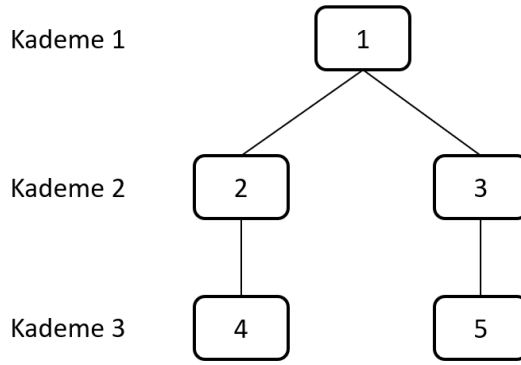
(1) numaralı kısıt kaynak düğümünden çıkan akışın bileşenin yıllık hata miktarına ( $s_v$ ) eşit olmasını sağlamaktadır. (2) numaralı kısıt karar düğümüne giren ve çıkan akışın eşit olmasını garanti etmektedir. (3) numaralı kısıt dönüşüm düğümüne giren toplam akışın çıkan ( $v, w$ ) ayrıtına aktarılmasını sağlamaktadır. (4) numaralı kısıt sadece yeterli kaynağın tahsis edildiği seçeneklerin kullanılmasını sağlamaktadır. (5) numaralı kısıtlar negatif olmama kısıtlarıdır. (6) numaralı kısıtlar karar değişkenlerinin 0-1 değerlerini almasını garanti etmektedir. (7) numaralı amaç fonksiyonu onarım ağı içerisinde verilen onarım kararlarından doğacak toplam değişken ve sabit maliyeti enküçüklemektedir.

#### **4.2. En Küçük Maliyetli Akış Modelinin Çoklu Yukarı Akış Modeline Dönüştürülmesi İçin Yapılan İşlemler**

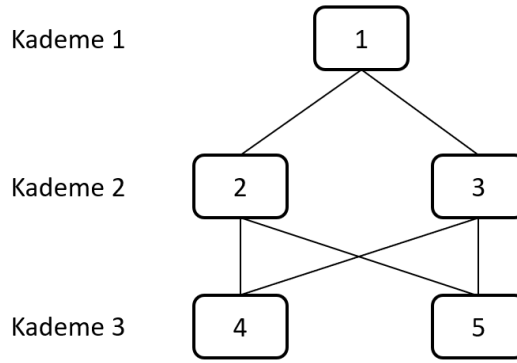
Kaynaklarda OSA problemi için yer alan çalışmalar arasında çok seviyeli onarım ağları için çoklu yukarı akış seçeneğini dikkate alan bir çalışma bulunmamaktadır. Brick ve Uchoa [30] tarafından önerilen modelde, arızalı bileşenler belirli bir hiyerarşik yapı benimsenmeden onarım ağında yer alan tüm tesislere gönderilebilmektedir. Bu özelliği sayesinde onarım ağı üzerinde yer alan tüm onarım tesisleri potansiyel bir çözüm noktası olmaktadır. Bu sayede model daha düşük maliyetli çözümler üretebilmektedir. Söz konusu modelde OSA problemi için önerilen diğer modellerden farklı olarak “Elden Çıkarma” ve “Onarım” olmak üzere sadece iki seçenek bulunmaktadır. Kaynaklarda var olan diğer modellerde bulunan “Sevk” seçeneğinin Brick ve Uchoa [30] tarafından önerilen modelde yer almaması modelin sadece tek seviyeli onarım ağları için kullanılabilmesine neden olmaktadır. Ancak, gerçek hayat problemlerinde tek seviyeli bir onarım ağı ile nadiren karşılaşılmaktadır. Bütün dünya ordularında onarım tesisleri yeteneklerine göre seviyelendirilmekte ve onarım ağı bu yetenek seviyelerine göre belirlenmiş kademelerden oluşmaktadır. Mevcut hali ile Brick ve Uchoa [30] tarafından önerilen model, onarım ağı içerisinde yer alan onarım seviyelerini dikkate almaması nedeniyle gerçek hayat uygulamaları için yetersiz kalmaktadır.

Basten vd. [15] tarafından önerilen en küçük maliyetli akış modelinin çoklu yukarı akış modeline dönüştürülmesi için yapılan işlemlerin gösterilebilmesi için Şekil 3.7’de

verilen örnek onarım ağı yapısı tekli yukarı akış seçenekli onarım ağı için Şekil 4.1’de, çoklu yukarı akış seçenekli onarım ağı için Şekil 4.2’de gösterildiği şekilde genişletilmiştir.

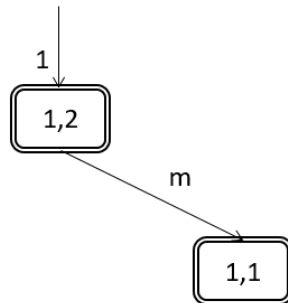


Şekil 4.1. Tekli Yukarı Akış Seçenekli Onarım Ağı – Genişletilmiş Örnek



Şekil 4.2. Çoklu Yukarı Akış Seçenekli Onarım Ağı – Genişletilmiş Örnek

Alt bölüm 4.1’de belirtildiği gibi, Basten vd. [15] modelinde karar düğümünde sevk kararı verilmesi durumunda karar düğümünden sevk kararına ilişkin çıkan ayırıt bir üst onarım kademesinde bağlı olduğu tesisin karar düğümüne bağlanmaktadır. Örnek gösterim Şekil 4.3’te verilmiştir.

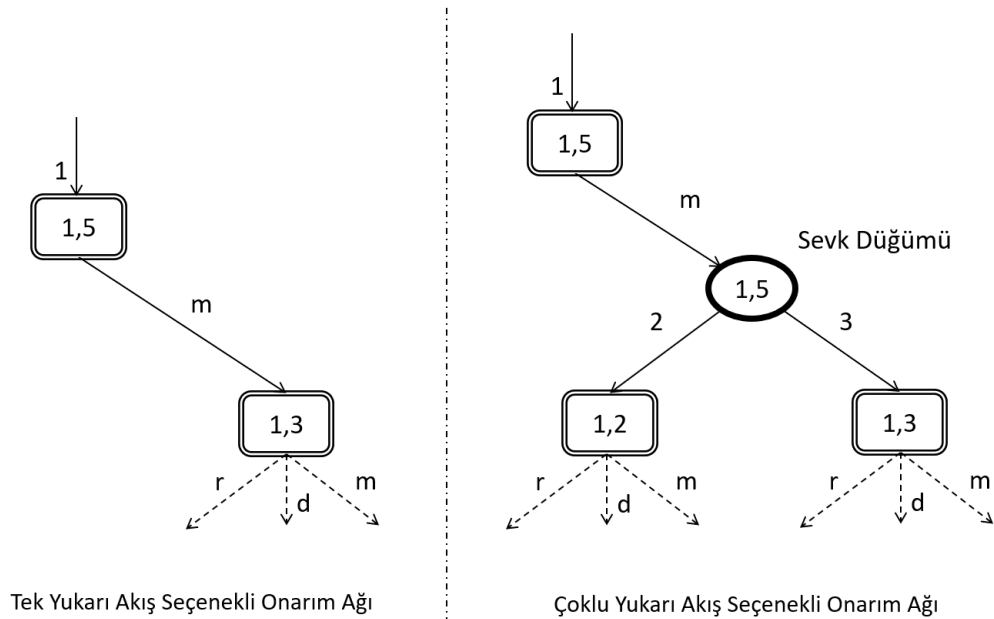


Şekil 4.3. Tekli Yukarı Akış Seçeneğine Sahip Onarım Ağında Sevk Kararı

Basten vd. [15] tarafından önerilen modelin ele aldığı Şekil 4.3'te verilen ayrıt ve düğüm yapısı gereği onarım ağında bir üst kademeye yapılacak malzeme hareketleri malzemenin bulunduğu tesisten sadece bağlı olduğu tek bir üst onarım tesisine yapılabilmektedir. Bu hareketi gösteren ayrıt karar düğümünden çıkarak bir üst kademedeki karar düğümüne gidecek şekilde oluşturulmaktadır.

Çoklu yukarı akış seçenekli onarım ağında, arızalı bileşenlerin üst kademede yer alan birden fazla onarım tesisine sevk edilebiliyor olması gerekmektedir. Örneğin, Şekil 4.1'de verilen tekli yukarı akış seçenekli onarım ağında 5 numaralı tesiste arızalanan bir bileşen sadece 3 numaralı tesise sevk edilebiliyorken, Şekil 4.2'de verilen çoklu yukarı akış seçenekli onarım ağında ise arızalı bileşen 5 numaralı tesisten 2 ve 3 numaralı tesislere sevk edilebilmektedir.

Bir üst kademeye yapılacak malzeme hareketlerinin yukarı yönlü birden fazla tesise yapılabilmesi için Basten vd. [15] tarafından önerilen ve alt bölüm 4.1'de açıklanan mevcut dört düğüme ilave olarak yeni bir düğümün tanımlanması ihtiyacı doğmaktadır. Bu tez kapsamında Basten vd. [15] tarafından önerilenlere ilave olarak yeni bir düğüm tanımlanmış ve "Sevk (Move) Düğümü" şeklinde isimlendirilmiştir. Yeni düğümün tanımlanması ile ayrıt ve düğüm arasındaki ilişki yapısında değişiklik yapılarak karar düğümünden çıkan sevk hareketini gösteren ayrıtlar tanımlanan sevk düğümü ile ilişkilendirilmiştir. Basten vd. [15] tarafından önerilen model yapısı ile bu tez çalışması kapsamında önerilen yeni model yapısı arasındaki sevk hareketinin karşılaştırılması Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. İki Model Arasında Sevk Hareketinin Karşılaştırılması

Alt bölüm 4.1’de belirtildiği gibi Basten vd. [15] tarafından yapılan çalışmada, onarım ağında yer alan tesisler L kümesi ile tanımlanmıştır. Yeni durumda ise çoklu yukarı akış seçeneğine sahip onarım ağında alt kademedeki tesisten malzeme sevki yapılabilecek üst kademedeki tesislerin de tanımlanması gerekmektedir. Bu durumda, l onarım tesisine arızalı bileşeni gönderebilecek onarım tesislerinin kümesi  $\beta_l$  ile tanımlanmıştır. Örneğin Şekil 4.2’de  $\beta_5 = [2,3]$  olmaktadır. Diğer bir deyişle, 5 numaralı tesisten bir üst kademedeki yer alan 2 ve 3 numaralı tesislere malzeme sevki yapılabilmektedir.

Basten vd. [15] tarafından önerilen modelde değişken ve sabit maliyetler karar düğümünden çıkan hurda, onarım ve sevk ayrıtları ile ilişkilidir. Yeni önerilen durumda ise hurda ve onarım kararı için oluşacak değişken ve sabit maliyetler yine aynı şekilde karar düğümlerinden çıkan ayrıtlara tanımlı iken sevk kararı için oluşan değişken ve sabit maliyetler sevk düğümünden çıkan ayrıtlara tanımlanmıştır.

Yeni duruma ilişkin yapılan tanımlamalara ilave olarak sevk düğümüne giren akışın çıkış ayrıtlarına aktarılmasını sağlayacak aşağıda belirtilen (8) numaralı kısıt modele eklenmiştir.

$$\sum_{u|(u,v) \in A} X_{uv} = \sum_{w|(v,w) \in A} X_{vw} \quad \forall v \in V^m \quad (8)$$

### 4.3. Bazı Kıyaslama Problemlerinin Çözümü

Basten vd. [15] tarafından önerilen en küçük maliyetli akış modelinin çoklu yukarı akış modeline dönüştürülmesi sonrasında, çoklu yukarı akış seçenekli onarım ağı ile tekli yukarı akış seçenekli onarım ağı arasındaki olası maliyet farkının ortaya konması için kıyaslama problemleri üretilmiş ve üretilen problemler her iki onarım ağı yapısı için çözülmüştür. Problemlere ilişkin ürün kırılımı, toplam bileşen sayısı, onarım ağındaki kademe sayısı, toplam tesis sayısı, problemin en iyi çözümleri, iyileşme oranları ve çözüm süreleri Tablo 4.1’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar kapsamında tüm problemler için çoklu yukarı akış modelinin daha iyi çözüm değerlerine ulaştığı görülmüştür. Ayrıca, problem yapısı karmaşıklıkça iyileşme oranının yükseldiği gözlenmiştir.

Tablo 4.1. Bileşen Bazlı Maliyet Karşılaştırma Tablosu

Problem	Ürün Kırılımı	Toplam Bileşen Sayısı	Onarım Ağı Kademe Sayısı	Toplam Tesisi Sayısı	En İyi Çözüm Değeri		Çözüm Süresi (sn)		En İyi Çözüm İyileşme Oranı
					Tekli	Çoklu	Tekli	Çoklu	
1	3	9	3	7	101.000	92.000	0,09	0,13	8,90%
2	3	9	3	7	266.000	237.075	0,14	0,41	10,90%
3	3	9	3	12	59.985	49.955	0,59	0,53	16,70%
4	3	10	3	7	111.000	101.000	0,09	0,08	9,00%
5	3	10	3	12	58.770	50.185	0,3	0,44	14,60%

#### 4.4. En Küçük Maliyetli Akış Modeline Yönelik Yapılan Eleştiri ve Değerlendirmeler

Bir önceki alt bölümde, Basten vd. [15] modelinin çoklu yukarı akış seçenekli onarım ağına uyarlanabilmesi için yapılan işlemler tartışılmış ve örnek problem çözümlerine yer verilmiştir. Bu alt bölümde ise, modelin bazı eksiklikleri ve yetersiz kaldığı durumlar üzerinde durulmuştur.

##### 4.4.1. Modelleme güçlükleri

Basten vd. [15] tarafından önerilen modelde “Kaynak”, “Karar”, “Dönüşüm” ve “Bitiş” olmak üzere dört farklı düğüm tanımlanmıştır. Söz konusu modelin çoklu yukarı akış modeline dönüştürülebilmesi için ilave olarak “Sevk” düğümü tanımlanmış ve model içerisindeki düğüm çeşitliliği beşe çıkmıştır. Modelin yapısı gereği düğümler arasında yer alan ayrıtların da düğümlerin çeşitliliğine göre farklı bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Buna ilave olarak modelde parametre olarak hesaplamaya dahil edilen değişken ve sabit maliyetler sadece karar ve sevk düğümünden çıkan ayrıtlara tanımlanmaktadır. Bu gibi durumlar çözüm aranan problemin boyutu büyüdükçe karşılaşılan modelleme güçlüğü nedeniyle modelin kullanılabilirliğini azaltmaktadır. Bu nedenle, Basten vd. [15] tarafından önerilen modelin çoklu yukarı akış modeline dönüştürülmesinden sonra gerçek hayat problemlerinde kullanılabilirliğinin önemli ölçüde azalacağı öngörülmektedir.

##### 4.4.2. Bileşen bazında onarım zamanı kısıtı getirilmesi

Bu tez çalışması kapsamında amaçlanan hedeflerden biri de onarım maliyetlerinin yanında bileşen bazında onarım sürelerinin de OSA problemi kapsamında değerlendirmeye alınabilmesidir. OSA problemi için kullanılacak modelde onarım sürelerinin toplam değer olarak kısıtlanabilmesi hem üretici açısından hem de kullanıcı açısından önemli bir

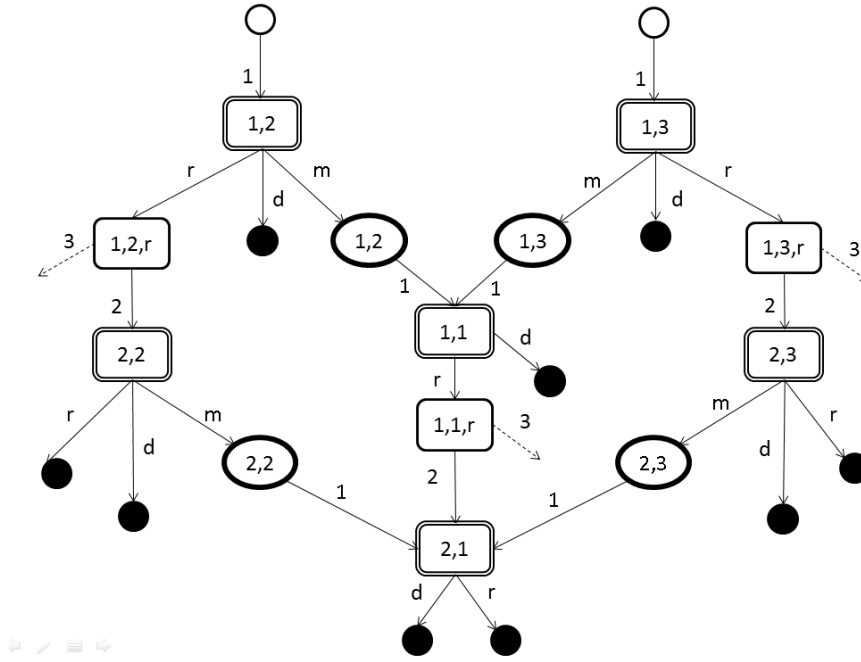
kazanımdır. Ancak, gerçek hayatta yürütülen lojistik destek sözleşmelerinde onarım süreleri bileşen ve bileşende karşılaşılan hata bazında düzenlenmektedir. Bu nedenle, OSA problemi için önerilecek modelin onarım süresini bileşen bazında hesaplamaya dahil edebilmesi gerekmektedir. Mevcut yapısı gereği, Basten vd. [15] tarafından önerilen model onarım sürelerini ancak toplam süre olarak değerlendirmeye alabildiği için bu açıdan yetersiz kalmaktadır.

Toplam onarım süresi ile bileşen bazlı onarım süresi arasındaki farkın daha kolay anlaşılabilmesi için bir örneğe yer verelim. Çoklu yukarı akış özelliğine sahip bir onarım ağında birbirinden farklı konumlarda konuşlanmış toplam 4 adet silah sisteminin bulunduğunu varsayalım. Söz konusu bu silah sistemlerinin (A) bileşeni için toplam onarım süresi bir üst değer ile kısıtlansın ve bu değer her bir bileşen için 18 gün olacak şekilde toplam 72 olarak belirlensin. Problemin çoklu yukarı akış modeli ile ulaşılan en iyi çözümünde aynı özelliklerde olan 4 adet (A) bileşenin onarım süreleri sırasıyla 4, 6, 58 ve 4 şeklinde oluşabilmektedir. Çözüm incelendiğinde, (A) bileşenleri için harcanan toplam onarım süresinin kısıt olarak belirlenen 72 günlük toplam süreyi sağladığı görülmektedir. Ancak, üçüncü sırada yer alan (A) bileşenin onarım süresi 58 gün olarak meydana gelmiştir. Diğer bir deyişle, bileşen bazında 18 gün olarak hedeflenen onarım süresi söz konusu (A) bileşeni için 58 gün olacak ve bileşen bu süre boyunca arızalı kalacaktır ki bu durum gerçek hayatta karşılaşılmak istenen bir durum değildir. Bu örnekten de anlaşılabilceği üzere, onarım sürelerinin bileşen bazında kısıtlanamıyor olması etkin olmayan sonuçlar doğurabilmektedir.

Yukarıda da bahsedildiği gibi, Basten vd. [15] tarafından önerilen modelinin yapısı bileşen bazlı onarım süresi kısıtlaması için yetersiz kalmaktadır. Bu durumun daha iyi açıklanabilmesi için sırasıyla Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de belirtilen örnek ürün yapısı ve onarım ağı kullanılmış ve modelin çoklu yukarı akış modeline dönüştürülmesi için alt bölüm 4.1’de açıklanan sevk düğümü modele eklenmiştir. Onarım ağının sevk düğümü eklenmiş hali Şekil 4.5’te verilmiştir.

Şekilden 4.5’ten anlaşılabilceği gibi, toplam iki adet silah sistemi 2 ve 3 numaralı tesiste birer adet olacak şekilde konuşlanmıştır. Silah sistemlerinin ürün kırılımında toplam 3 adet bileşen bulunmaktadır. Bu bileşenlerden birini seçelim ve seçtiğimiz bileşen (2) numaralı olsun. Bu durumda hem 2 numaralı tesiste hem de 3 numaralı tesiste bileşen (2) bulunacaktır. Basten vd. [15] modelinde kullanılan  $X_{vw}$  karar değişkeni (v, w) ayrıtından geçen akış değerini belirlemektedir ve arızalanan bileşenin hangi silah sistemine ait olduğu

bilgisini tutmamaktadır. Bu durum bileşen ile ilgili verilecek kararların gruplanmasına imkân vermemektedir. Örneğin bileşen (2)'nin 1 numaralı tesiste onarılması bileşen (2) için 2 ve 3 numaralı tesiste alınacak sevk kararlarına bağlıdır. Diğer bir deyişle, 1 numaralı tesise kaç adet bileşen (2)'nin sevk edileceği problem çözülmeden bilinmemektedir. Böyle bir durumda karar değişkenlerinin ne şekilde gruplandırılacağı ve sağ taraf sabiti olarak eklenmesi gereken bileşen bazlı onarım süresinin ne kadar olması gerektiği belirlenmemektedir.



Şekil 4.5. Sevk Seçeneği Eklenmiş Örnek En Küçük Maliyetli Akış Problemi

#### 4.5. Ara Sonuçlar

Yukarıda yapılan değerlendirmelerde belirtildiği gibi Basten vd. [15] tarafından önerilen modelin mevcut yapısı kullanıcıya modelleme gücünü getirmekte ve bu nedenle gerçek hayat problemleri için kullanılmasını zorlaştırmaktadır. Bunun yanında, modelde kullanılan  $X_{vw}$  karar değişkeni arızalanan bileşenin hangi silah sistemine ait olduğu bilgisini tutmamaktadır ve bu nedenle karar değişkeninin mevcut yapısı korunduğu takdirde model bileşen bazlı onarım süresi kısıtı eklenememektedir. Dolayısıyla, bu tez çalışmasının hedeflerinden biri olan onarım maliyetlerinin yanında bileşen bazında onarım sürelerinin de OSA problemi kapsamında değerlendirmeye alınabilmesi için Basten vd. [15] tarafından önerilen modelin kullanılamayacağı değerlendirilmiş ve belirtilen amaç için yeni bir modelin geliştirilmesi ihtiyacı ortaya konmuştur.



## 5. ONARIM SEVİYESİ ANALİZİ PROBLEMİ İÇİN YENİ KARAR MODELİ VE SAYISAL ANALİZLER

Bu bölümde, çoklu yukarı akış seçenekli onarım ağı için önerilen yeni karar modelinin kaynaklarda var olan modellerden ayrışımı tartışılmış, karar modelinin detayları açıklanmış, kaynaklarda var olan modeller üzerinde yapılan sayısal analizler incelenmiş ve önerilen yeni karar modeli üzerinde yapılan sayısal analizlerin sonuçlarına yer verilmiştir.

### 5.1. Yeni Karar Modelinin Diğer Modellerden Ayrışımı

Bu tez çalışmasında önerilen yeni karar modelinin kaynaklarda var olan ve OSA probleminin temel yapısını tartışan diğer çalışmalardan ayrışımı bölüm 2.2’de belirtilen özelliklere göre aşağıda açıklanmıştır.

#### i. Asimetrik onarım ağı

Yeni karar modeli onarım ağının olası asimetrik yapısını dikkate alabilmektedir. Kaynaklarda asimetrik onarım ağını dikkate alabilen çok az sayıda çalışma bulunmaktadır. Söz konusu çalışmalar, Basten vd. [15], [29] tarafından gerçekleştirilen çalışmalardır.

#### ii. Kümelenmiş onarım ağı

Kümelenmiş onarım ağlarında verilen bir onarım kararı o seviyede yer alan tüm tesisler için aynı şekilde uygulanmaktadır. Problemin yapısını basitleştirmek için yapılan bu varsayım gerçek hayatta karşılaşılan OSA probleminin en iyi çözümüne ulaşılmasını engellemektedir. Yeni karar modeli, aynı onarım kademe seviyesinde bulunan her bir tesis için farklı onarım kararlarının alınmasına imkân verecek şekilde modellenmiştir. Kaynaklarda Basten vd. [15], [29] ve Brick ve Uchoa [30] tarafından yapılan çalışmalarda onarım ağı kümelenmemiştir.

#### iii. Ürün kırılımı

OSA probleminin uygulandığı sistemler çok seviyeli ürün kırılımına sahiptir. Gerçek hayat problemlerine cevap verebilmesi açısından, OSA problemi için kullanılacak karar modelinin çoklu ürün kırılımına cevap verebilmesi büyük önem taşımaktadır. Problemin yapısını karmaşıklaştıran bu özellik kaynaklarda Basten vd. [15], [28] ve [29] tarafından çoklu olarak ele alınmıştır. Bu çalışmalar dışında kalan çalışmalarda ise ürün kırılım seviyesi iki veya üç seviye olacak şekilde sınırlanmıştır. Yeni karar modelinde, ürün kırılım yapısı çoklu olarak ele alınmıştır.

#### iv. Onarım kademe seviyesi

OSA probleminin ele alındığı onarım ağları birden fazla kademe seviyesinden oluşmaktadır. Bu kademe seviyeleri kullanıcı bakım politikaları, sistemin teknik ve harekât özellikleri gibi ölçütlere göre değişkenlik göstermektedir. OSA problemi için kullanılacak modelin çoklu onarım kademe seviyesine sahip olan onarım ağlarını da kapsayabilmesi gerekmektedir. Kaynaklarda Basten vd. [15], [28] ve [29] tarafından yapılan çalışmalarda onarım ağı kademe seviyesi çoklu olarak ele alınmıştır. Bu çalışmalar dışında kalan çalışmalarda ise onarım kademe seviyesi bir, iki veya üç seviye olacak şekilde sınırlanmıştır. Yeni karar modelinde, onarım kademe seviyesi çoklu olarak değerlendirilmiştir.

#### v. Onarım seçenekleri

OSA probleminde (1) Elden Çıkarma, (2) Onarım ve (3) Sevk kararları verilmektedir. Kaynaklarda Brick ve Uchoa [30] tarafından yapılan çalışma dışında kalan çalışmalarda bu üç karar dikkate alınmıştır. Brick ve Uchoa [30] tarafından yapılan çalışmada ise sevk onarım seçeneği kullanılamamaktadır. Bu da modelin birden fazla onarım kademe seviyesi olan onarım ağları için kullanılamamasına neden olmaktadır. Yeni karar modelinde, yukarıda belirtilen üç onarım seçeneği de dikkate alınmıştır.

#### vi. Kapasite kısıtı

Onarım seçeneklerinin uygulandığı onarım tesislerinin özel destek ve test ekipmanı kullanımı, fiziki alan ve işçilik gibi konularda belirli kapasiteleri bulunmaktadır. OSA probleminde kullanılacak karar modelinin kapasite kısıtlarını dikkate alabiliyor olması gerçek hayat problemlerine cevap verebilmesi açısından önemlidir. Kaynaklarda Basten vd. [15], [29] ve Brick ve Uchoa [30] tarafından yapılan çalışmalarda kapasite kısıt dikkate alınmıştır. Yeni karar modelinde de kapasite kısıtı değerlendirmeye alınmıştır.

#### vii. Onarım ağının tam modellenmesi

OSA problemlerinde onarım ağlarının tam olarak modellenmesi %7'nin üzerinde maliyet farkına neden olabilmektedir [15]. Yeni karar modelinde, onarım ağının yapısı tam olarak modellenmiştir. Kaynaklarda Basten vd. [15], [29] ve Brick ve Uchoa [30] tarafından yapılan çalışmalarda da onarım ağı tam olarak modellenmiştir.

### viii. Farklı hata türleri

Kaynaklarda sadece Brick ve Uchoa [30] tarafından yapılan çalışmada farklı hata türleri ele alınmıştır. Basten vd. [29] tarafından yapılan çalışmada farklı hata türleri potansiyel uzantı olarak açıklanmış ve farklı hata türlerinin dikkate alınabilmesi için modelin yapısının değiştirilmesinin gerekmediği belirtilmiştir. Bu nedenle, farklı hata türleri söz konusu çalışmanın sayısal analiz bölümünde ele alınmamıştır. Yeni karar modelinin mevcut yapısında farklı hata türleri değerlendirilmeye alınmamıştır. Ancak ihtiyaç duyulması durumunda, karar değişkenine ilave edilecek bir indis yardımıyla değerlendirmeye alınması mümkündür.

### ix. Hurda seçeneği için sabit maliyet

Bir bileşenin hurda işlemlerinin yapılabilmesi için çevre güvenliğinin sağlanması, doğanın korunması ve ekipmanların askeri yönlerinin kaldırılması gibi nedenlerden dolayı bazı sabit maliyet gerektiren harcamaların yapılması gerekmektedir. Kaynaklarda Saranga ve Dinesh Kumar [27], Brick ve Uchoa [30], Basten vd. [15], [28] ve [29] tarafından yapılan çalışmalarda hurda seçeneği için katlanılan sabit maliyetler dikkate alınmıştır. Yeni karar modelinde de bu konu değerlendirilmiştir.

### x. Tekli/Çoklu yukarı akış seçeneği

Onarım ağlarında tekli ve çoklu yukarı akış seçeneği alt bölüm 2.2’de detaylı olarak açıklanmıştır. Kaynaklarda çoklu yukarı akış seçeneğini ele alan herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Yeni karar modelinde ise çoklu yukarı akış seçeneği her tesis arasındaki malzeme hareket yolları belirlenerek dikkate alınmış olup bu özellik sayesinde gerçek hayat problemleri için esnek ve maliyet etkin çözümler elde edilebilmektedir.

## **5.2. Yeni Karar Modeli**

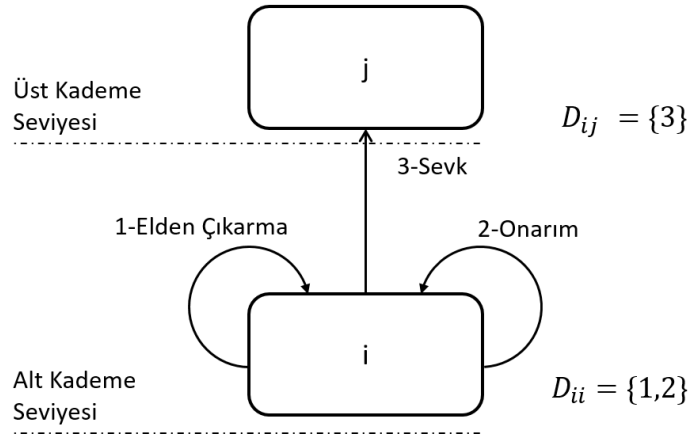
Bu tez çalışması kapsamında önerilen matematiksel modelde sistemlerin konuşlu olduğu tesisler  $N$  kümesi ile tanımlanmıştır. Sistemler çoklu ürün ağacı yapısına sahiptirler.  $S$  kümesi bir sistemde herhangi bir onarım kararı verilecek bileşenleri tanımlamaktadır. Sistem ürün yapısı içerisinde, HDÜ’lerin DDÜ’ları; DDÜ’lerin de alt parçaları içerdiği varsayılmıştır.  $Q_{(s)}$  kümesi  $s \in S$  bileşenin bir seviye alt kırılımında bulunan bileşenleri içermektedir.

Sistemlerin içinde bulunduğu onarım ağı için  $E$  kademe seviyesine sahip çok kademeli bir onarım ağı öngörülmüştür. Onarım ağındaki her tesis birden çok yukarı akış seçeneğine

sahip olabilir (Şekil 2.5). Diğer bir deyişle, alt onarım kademe seviyesinde bulunan tesisten önceden tanımlanmış üst onarım kademe seviyesinde bulunan tesislere erişim mümkündür. Onarım ağındaki tesisler  $I$  kümesi ile tanımlanmıştır.  $I_L$  kümesi en üst kademe seviyesinde yer alan tesisler dışında kalan tesisleri içermektedir.

Onarımlara ilişkin kararlar  $D$  kümesi ile tanımlanmıştır. Onarım kararları  $d \in D$  (1) Elden Çıkarma (bileşen elden çıkarılır ve yeni bir bileşen tedarik edilir), (2) Onarım (bileşen onarılır ve sisteme monte edilir) ve (3) Sevk (bileşen yeni bir onarım kararı için üst kademedeki bir tesise taşınır) olarak belirlenmiştir.

$i \in I$  tesisinin ayrıt ile ilişkilendirildiği tesisler  $J_i$  kümesi ile gösterilmektedir.  $i \in I$  tesisinden  $j \in J_i$  tesisine tanımlanmış kararlar  $(i, j)$  ayrıtı ile gösterilmiş olup  $i$  den  $j$ 'ye alınabilecek kararlar  $D_{ij}$  kümesi ile tanımlanmıştır. Örnek düğüm ve ayrıtı gösterimi Şekil 5.1'de verilmiştir. (1) Elden çıkarma ve (2) Onarım kararlarına karşılık gelen ayrıtılar döngü ayrıtı ile temsil edilir. Örnekte,  $i$  tesisi kendi ve üst kademe seviyesinde yer alan  $j$  tesisi olmak üzere iki tesis ile ilişkilidir. Bu durumda,  $i$  tesisi ile ilişkili düğümler kümesi  $J_i = \{i, j\}$  olur ve alınabilecek kararlar  $D_{ii} = \{1,2\}$  ve  $D_{ij} = \{3\}$  olarak tanımlanır. Onarımlarda kullanılan kaynaklar ise  $R$  kümesi ile tanımlanmıştır.



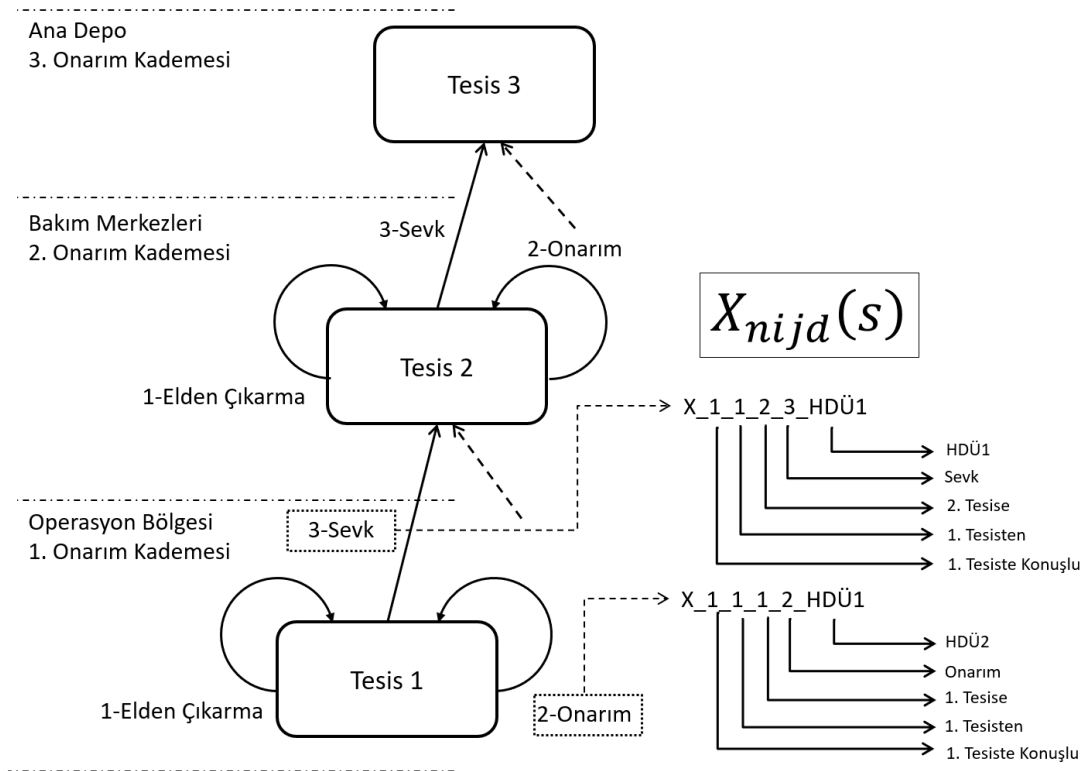
Şekil 5.1. Örnek Düğüm ve Ayrıtı Gösterimi

$n \in N$ 'de konşlu bir sistemin  $s \in S$  bileşeni için  $i \in I$  den  $j \in J_i$ 'ye  $(i, j)$  ayrıtı ile ilişkilendirilmiş  $d$  onarım seçeneğinin seçilmesi durumunda oluşan değişken maliyet  $c_{nijd}(s)$  ile gösterilmiştir. Bu değişken maliyetler işçilik saatleri, kullanılan yedek parçalar ve ulaşım maliyetleri gibi maliyetlerden oluşmaktadır.  $i \in I$  tesisinde  $d$  onarım seçeneğinin seçilmesi durumunda kullanılacak  $r \in R$  kaynağı için oluşan sabit maliyet  $f_{rid}$  ile gösterilmiştir. Sabit maliyetler yedek parça depolama maliyeti ve test ekipmanı maliyeti gibi

maliyetlerden oluşmaktadır.  $s \in S$  bileşeninin yıllık ortalama arıza yapma sayısı  $\lambda_s$  ile tanımlanmıştır.  $C_{ri}$  parametresi  $i \in I$  tesisinin toplam  $r \in R$  kaynağı kapasitesini ifade etmektedir.  $s \in S$  bileşeni için  $i \in I$  den  $j \in J_i$ 'ye  $(i, j)$  ayrıtı ile ilişkilendirilmiş,  $d$  onarım seçeneğinin gerçekleştirilebilmesi için ihtiyaç duyulan kaynak miktarı da  $u_{rijd}(s)$  ile tanımlanmıştır.

Önerilen modelde iki farklı karar değişkeni kullanılmaktadır. Söz konusu karar değişkenlerine ait açıklamalar aşağıda belirtilmiştir.

$X_{nijd}(s)$  karar değişkeni,  $n \in N$  tesisinde konuşlu sistemin  $s \in S$  bileşeni için  $i \in I$ 'den  $j \in J_i$ 'ye ilişkili  $d$  onarım seçeneği seçilirse 1 değerini, diğer durumlarda 0 değerini almaktadır.  $Y_{rid}(s)$  karar değişkeni,  $d$  onarım seçeneği için  $i \in I$  tesisinde kullanılacak  $r \in R$  kaynak miktarını belirlemektedir.  $X_{nijd}(s)$  karar değişkeninin örnek gösterimi Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.2. Karar Değişkeninin Örnek Gösterimi

Yukarıdaki tanımlara bağlı olarak önerilen karar modeli aşağıda verilmiştir:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \sum_{d \in D_{ij}} X_{nijd}(s) = 1 \quad \forall n \in N, \forall s \in S \quad (9)$$

$$X_{nij,sevk}(s) \leq \sum_{k \in J_j} \sum_{d \in D_{jk}} X_{njkd}(s) \quad \forall i \in I, \forall j \in J_i, (i \neq j), \forall n \in N, \forall s \in S \quad (10)$$

$$X_{nii,onarım}(s) \leq \sum_{j \in J_i} \sum_{d \in D_{ij}} X_{nijd}(q) \quad \forall i \in I, \forall n \in N, \forall s \in S, \forall q \in Q(s) \quad (11)$$

$$X_{nii,elden çıkarma}(s) \leq X_{nii,elden çıkarma}(q) \quad \forall i \in I, \forall n \in N, \forall s \in S, \forall q \in Q(s) \quad (12)$$

$$X_{nij,sevk}(s) \leq X_{nij,sevk}(q) \quad \forall i \in I, \forall j \in J_i, (i \neq j), \forall n \in N, \forall s \in S, \forall q \in Q(s) \quad (13)$$

$$\sum_{d \in D} Y_{rid} \leq C_{ri} \quad \forall r \in R, \forall i \in I \quad (14)$$

$$\sum_{j \in J_i} u_{rijd}(s) X_{nijd}(s) \leq Y_{rid} \quad \forall r \in R, \forall i \in I, \forall d \in D_{ij}, \forall n \in N, \forall s \in S \quad (15)$$

$$Y_{rid} \geq 0 \quad \forall r \in R, \forall i \in I, \forall d \in D \quad (16)$$

$$X_{nijd}(s) \in \{0,1\} \quad \forall n \in N, \forall i \in I, \forall j \in J_i, \forall d \in D_{ij}, \forall s \in S \quad (17)$$

k. a.

$$\text{Enk} \sum_{n \in N} \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \sum_{d \in D_{ij}} c_{nijd}(s) X_{nijd}(s) \lambda_s + \sum_{r \in R} \sum_{i \in I} \sum_{d \in D} f_{rid} Y_{rid} \quad (18)$$

(9) numaralı kısıtlar onarım ağının birinci seviyesinde her bir bileşen için sadece bir onarım seçeneğinin seçilmesini sağlamaktadır. (10) numaralı kısıtlar s bileşeni için üst kademeye “Sevk” kararının verilmesi durumunda üst kademede de bir onarım kararı verilmesini garanti etmektedir. (11) numaralı kısıtlar bir bileşen için “Onarım” kararı verilmesi durumunda aynı kademe seviyesinde o bileşenin tüm alt parçaları için bir onarım kararı alınmasını sağlamaktadır. (12) numaralı kısıtlar bir bileşen için “Elden Çıkarma” kararı verilmesi durumunda aynı kademe seviyesinde o bileşenin tüm alt parçaları için “Elden Çıkarma” kararının alınmasını sağlamaktadır. Benzer şekilde (13) numaralı kısıtlar bir bileşen için “Sevk” kararı verilmesi durumunda aynı kademe seviyesinde o bileşenin tüm alt parçaları için bir “Sevk” kararının alınmasını garanti etmektedir. (14) numaralı kısıtlar i tesisinde kullanılacak kaynakların o tesis için belirlenmiş kapasiteleri aşmasını engellemektedir. (15) numaralı kısıtlar verilen onarım kararı için yeterli kaynağın ilgili tesise planlanmasını garanti etmektedir. (16) numaralı kısıtlar sabit maliyet karar değişkeninin negatif değer almasını engellemektedir. (17) numaralı kısıtlar söz konusu karar değişkenlerinin alabileceği değerleri 0-1 ile sınırlamaktadır. Modelin (18) numaralı amaç fonksiyonu, verilen kısıtlar altında onarım ağı içerisinde belirlenecek onarım kararlarından doğacak toplam değişken ve sabit maliyeti enküçükmektedir.

### **5.3. Literatürdeki Modeller İçin Yapılan Sayısal Analizler**

Bu kısımda, kaynaklarda OSA probleminin temel yapısına yönelik çalışmalarda var olan modeller üzerinde yapılmış olan sayısal analizlerin detayları açıklanmıştır.

#### **5.3.1. Baros [25] modeli**

Baros [25] tarafından yapılan çalışmada herhangi bir sayısal analiz yapılmamıştır. Önerilen modelin uygulaması verilen bir örnek problem üzerinden tartışılmıştır.

#### **5.3.2. Baros ve Riley [26] modeli**

Baros ve Riley [26] tarafından yapılan çalışmada detaylı bir sayısal analiz yapılmamıştır. Çalışmada, yazarlar tarafından önerilen algoritmanın bir uygulamasına yer verilmiştir.

#### **5.3.3. Saranga ve Kumar [27] modeli**

Saranga ve Kumar [27] tarafından yapılan çalışmada çok kapsamlı bir sayısal analiz yapılmamıştır. Önerilen model toplam 10 adet HDÜ ve 22 adet DDÜ'den oluşan bir sistem yapısı kullanılarak oluşturulmuş bir örnek problem üzerinden genetik algoritma kullanılarak çözülmüştür. Örnek problem için belirlenmiş parametre değerlerine çalışma kapsamında yer verilmiştir.

#### **5.3.4. Brick ve Uchoa [30] modeli**

Brick ve Uchoa [30] çalışmalarında önermiş oldukları modele ait sayısal analizleri gerçek hayat problemlerine uygun olarak ürettikleri 15 kıyaslama problemi üzerinden gerçekleştirmişlerdir. Ürettikleri problemlerin yapılarına ait bilgiler Tablo 5.1'de özetlenmiştir. Söz konusu tabloda, [S] sistemlerin konuşlu oldukları tesis sayısını, [J<sub>o</sub>] organik onarım tesisi olarak tanımlanan kullanıcı kurumun kendi tesis sayısını, [J<sub>i</sub>] üçüncü parti onarım tesislerini, [Q1] sistemlerdeki toplam HDÜ sayısını, [Q2] sistemdeki toplam DDÜ sayısını, [T] farklı hata türlerini ve [R] kullanılan farklı kaynak miktarını ifade etmektedir.

Tablo 5.1. Sayısal Analizlerde Kullanılan Problem Büyüklükleri (Brick ve Uchoa [30])

Problem	[S]	[K]	[J <sub>o</sub> ]	[J <sub>i</sub> ]	[Q1]	[Q2]	[T]	[R]
1	1	15	4	2	10	14	36	9
2	1	15	8	2	10	14	36	9
3	2	16	8	2	16	32	74	9
4	3	16	8	2	26	45	113	9
5	4	16	10	3	32	55	126	9
6	5	20	15	3	53	100	206	9
7	1	23	12	3	53	100	206	9
8	6	23	15	3	56	106	215	14
9	6	23	12	3	56	106	215	14
10	7	23	6	1	59	116	256	14
11	8	23	10	1	66	132	296	14
12	8	23	12	3	66	132	296	20
13	9	23	12	3	70	140	310	20
14	9	23	3	3	70	140	310	20
15	2	23	20	6	14	22	58	20

Çalışmada belirtilen her bir problem için farklı bakım politikaları belirlenerek toplam 22 adet problem çözülmüştür. Yapılan sayısal analizler sonucunda, önerilen modelin çalışma kapsamında ele alınan problemleri makul zamanlarda çözebildiği gösterilmiştir.

### 5.3.5. Basten vd. [28] modeli

Basten vd. [28] tarafından yapılan çalışmada OSA için kıyaslama problemleri üretilmiş ve sayısal analizler bu problemler üzerinden yapılmıştır. Yazarlar, OSA problemi için makul bir sistem yapısının parça seviyesinde 800 parçadan ve HDÜ ve DDÜ seviyesinde toplam 200 bileşenden olmak üzere toplam 1000 parçadan oluşabileceğini ifade etmişlerdir. Yapılan sayısal analizlerde, önerdikleri modellerinin performansını Barros [25] ve Saranga ve Kumar [27] tarafından önerilen modellerin performansı ile karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma yaparken her defasında tek bir parametreyi değiştirmişlerdir. Bileşen sayısı, ürün kırılım seviyesi, onarım kademesi sayısı, bir sistemin en fazla kaç tane sabit maliyet kümesine üye olabileceği ve maksimum sabit maliyet kümesi parametrelerine değişken değerler vermişlerdir.

Bunlara ilave olarak, parametre değerleri olarak belirledikleri değerler değişken maliyetler için 50-1000 birim, sabit maliyetler için 500-10.000 birim ve arızalanma oranları için 0.05-5 birim arasında gerçekleşmiştir.



### 5.3.6. Basten vd. [15] modeli

Basten vd. [15] tarafından yapılan çalışmada, Basten vd. [28] çalışmasında uygulanmış sayısal analizlere benzer bir yöntem benimsenmiştir. Yazarlar, yapmış oldukları sayısal analizlerde OSA problemi için geliştirmiş oldukları en küçük maliyetli akış modelini Basten vd. [28]'de önerilen model ile çözüm süresi açısından karşılaştırmışlar ve onarım ağının tam olarak modellenmesinin getirmiş olduğu maliyet avantajını araştırmışlardır. En küçük maliyetli akış modelinin çözüm süresi performansına yönelik yaptıkları analizlerde sistemdeki bileşen sayısı, ürün ağacı seviyesi, onarım kademesi sayısı ve bileşenlerin maksimum kaynak kullanımına yönelik parametre değerlerini belirlemişlerdir. Söz konusu parametre değerlerinin detayları Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Sayısal Analizlerde Kullanılan Parametre Değerleri – 1 (Basten vd. [15])

Bileşen Sayısı	Ürün Ağacı Seviyesi	Onarım Kademesi Sayısı	Maksimum Kaynak Kullanım
500			
1000	2	2	1
2000	3	3	2
5000			

Bu kapsamda, her bir kombinasyon için 25 farklı problem oluşturmuş ve toplam ( $4*2*2*2*25$ ) 800 problem çözülmüştür. Yapılan sayısal analizler sonucunda, OSA problemi için geliştirilen en küçük maliyetli akış modelinin örnek problemleri çok daha hızlı bir şekilde çözdüğünü gösterilmiştir.

Onarım ağının tam olarak modellenmesinin getirmiş olduğu avantajlara yönelik yapılan sayısal analizlerde yedi farklı deneysel faktör belirlenmiştir. Bu faktörler ikinci seviye depo sayısı, onarım ağının solunda kalan sistem sayısı, onarım ağının sağında kalan sistem sayısı, bağlı sevk maliyetleri, bağlı onarım maliyetleri, toplam kaynak miktarı ve bir bileşenin ihtiyaç duyduğu kaynak miktarı olarak belirlenmiştir. Toplam 228 kombinasyon üzerinden ve her bir kombinasyon için 10 problem olacak şekilde analizler yapılmıştır. Problemler oluşturulurken kullanılan parametre değerleri Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Sayısal Analizlerde Kullanılan Parametre Değerleri – 2 (Basten vd. [15])

Bileşen Sayısı	1. Seviye	25
	2. Seviye	125
	3. Seviye	625
Alt Sistem Arızalanma Oranı		[0,01;1]
Alt Sistem Kaynaklı Arızalanma Oranı		[0,5/alt parça sayısı;1,25/alt parça sayısı]
Bileşen Fiyatı		[1.000;100.000]
Onarım Maliyeti (bileşen fiyatına göre oranı)		[0,1;0,4]
Hurda Maliyeti (bileşen fiyatına göre oranı)		[0,75;1,25]
Sevk Maliyeti (bileşen fiyatına göre oranı)		0,01
Kaynak Maliyeti		[10.000;1.000.000]
Kaynak Sayısı		10 ve 25
Bileşenlerin Kaynak İhtiyaçları (0-1-2)		0,7-0,2-0,1 ve 0,25-0,5-0,25

Yapılan sayısal analizler sonucunda, onarım ağının tam olarak modellenmesinin toplam onarım maliyetlerinde %7'yi aşan maliyet avantajı sağladığı gösterilmiştir.

### 5.3.7. Basten vd. [29] modeli

Basten vd. [29] çalışmalarında yapmış oldukları sayısal analizlerde onarım ağında gerçekleşen başarısız onarımların, hata bulunmama durumlarının ve sonsuz kaynak kullanımının OSA problemi kapsamında toplam maliyet, onarım stratejileri ve çözüm süreleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir.

Bu kapsamda ikinci seviye bakım tesisi sayısı (2 veya 5), bakım tesislerine bağlı sistem sayısı (2 veya 5), kaynak sayısı (10 veya 25) ve bileşenlerin kaynak ihtiyacı olmak üzere dört deneysel faktör belirlenmiştir. Analizler kapsamında problemlerin oluşturulması için Basten vd. [15] çalışmasında belirlenen ve Tablo 5.3'te verilen parametre değerleri kullanılmıştır. Toplamda dört deneysel faktör ( $2*2*2*2$ ) için 10'ar adet problem oluşturularak 160 problem çözülmüştür.

## 5.4. Yeni Karar Modeli Üzerinde Yapılan Sayısal Analizler

Bu kısımda, tez kapsamında önerilen modelin performansına yönelik yapılan sayısal analizlerin detayları açıklanmıştır.

### 5.4.1. Varsayımlar

Önerilen karar modeli asimetrik onarım ağlarında arızalı parçaların birden fazla üst kademe onarım tesisine sevk edilebilmesine olanak sağlamaktadır. Sevk maliyetleri gibi değişken maliyetlerin yatırım maliyetleri gibi sabit maliyetlere kıyasla çok daha düşük

olduğu göz önüne alındığında, çoklu yukarı akış seçeneği sayesinde önermiş olduğumuz modelin sabit maliyetleri ve dolayısı ile toplam onarım maliyetlerini azaltarak ömür devri maliyeti açısından daha maliyet etkin sonuçlar vermesi beklenmektedir. Alt bölüm 3.2 ve alt bölüm 4.3’de çoklu yukarı akış seçenekli onarım ağlarında gerçekleştirilecek olası maliyet kazanımı yapılan örnek problem çözümleri ile gösterilmiştir.

Kaynaklarda var olan OSA probleminin temel yapısını inceleyen çalışmalar incelendiğinde, en kapsamlı sayısal analizlerin Basten vd. [15] tarafından yapıldığı ve Basten vd. [29] tarafından da benzer bir yaklaşımın benimsendiği görülmektedir. Yeni karar modelinin çözebileceği problem boyutunun belirlenebilmesi ve çoklu yukarı akış seçeneğinin olası maliyet avantajının gösterilebilmesi açısından, yapılacak sayısal analizlerde Basten vd. [15] tarafından önerilen problem yapısına benzer bir yapının benimsenmesinin uygun olacağı değerlendirilmiştir.

Sayısal analizler için üretilen kıyaslama problemlerinin yapısı ve yapılan varsayımlar aşağıda sıralanmıştır. Problemler oluşturulurken kullanılan parametre değerleri Tablo 5.4’te verilmiştir.

1. Ürün ağacı HDÜ, DDÜ ve alt parçalar olmak üzere üç seviyeden oluşmaktadır.
2. Toplam bileşen sayısı 500, 1000, 1500, 1750, 2000 ve 5000 olarak belirlenmiştir.
3. Onarım kademesi sayısı operasyon bölgesi, birlik seviyesi ve fabrika seviyesi olmak üzere üç kademedir.
4. Onarım ağında bir adet depo seviyesi bakım tesisinin bulunduğu varsayılmıştır.
5. Birlik seviyesi tesis sayısı ve sistem sayısı 2 ve 5 olmak üzere iki değer alabilmektedir (en fazla 5 birlik seviyesi tesis ve 25 sistem).
6. Sevk maliyetleri tesisler arasındaki mesafelerle uyumlu olacak şekilde hesaplanmıştır.
7. Her bir onarım kararı için tek bir kaynak kullanıldığı varsayılmıştır.
8. Kaynak kapasitesinin sınırsız olduğu varsayılmıştır.
9. Toplam bileşen sayısı (500, 1000, 1500, 1750, 2000, 5000), birlik seviyesi tesis sayısı (2 veya 5) ve sistem sayısı (2 veya 5) olmak üzere üç deneysel faktör belirlenmiştir.
10. Her bir kombinasyon için 50 adet kıyaslama problemi oluşturulmuştur.
11. Maliyetlerin karşılaştırılabilmesi için, çoklu yukarı akış modeli için oluşturulan her bir problem için aynı parametre değerlerine sahip tekli yukarı akış problemi oluşturulmuştur.

Tablo 5.4. Sayısal Analizlerde Kullanılan Parametre Değerleri

Toplam Bileşen Sayısı	500, 1000, 1500, 1750, 2000, 5000
Alt Sistem Arızalanma Oranı	[0,01;1]
Bileşen Fiyatı	[1.000;100.000]
Onarım Maliyeti (bileşen fiyatına göre oranı)	[0,1;0,4]
Hurda Maliyeti (bileşen fiyatına göre oranı)	[0,75;1,25]
Sevk Maliyeti (bileşen fiyatına ve tesisler arasındaki mesafeye göre oransal)	0,01*km
Kaynak Maliyeti	[10.000;1.000.000]

#### 5.4.2. Kıyaslama Problemlerinin Çözümü

Kıyaslama problemleri C++ dilinde kodlanmıştır. Çoklu yukarı akış seçenekli onarım ağı için kıyaslama problemleri oluşturulurken parametreler Tablo 5.4'te belirtilen değerlere uygun olarak belirlenmiştir. Çoklu yukarı akış seçenekli onarım ağı ile tekli yukarı akış seçenekli onarım ağının getirmiş olduğu çözüm değerleri arasında karşılaştırmanın yapılabilmesi için, çoklu yukarı akış seçenekli onarım ağı için belirlenen parametre değerleri tekli yukarı akış seçenekli onarım ağı kıyaslama problemlerinde de aynı şekilde tutulmuştur.

Modellerin çözümünde CPLEX 12.4 kullanılmıştır. Çözümler Intel Xeon Phi 7290 1.5 GHz Processor 384 GB Ram özelliklerine sahip bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiştir. Çözüm süresi üst sınırı 14400 saniye olarak belirlenmiştir.

Kıyaslama problemleri isimlendirilirken sırasıyla çoklu ya da tekli yukarı akış seçenekli olup olmaması, onarım ağının yapısı ve toplam bileşen sayısı kullanılmıştır. Örneğin; çoklu yukarı akış seçenekli onarım ağı, sistem sayısı 5, birlik seviyesi tesis sayısı 2 ve depo seviyesi tesis sayısı 1 olan onarım ağında toplam 2000 bileşenli bir sistem için oluşturulan problem multi\_521\_2000 şeklinde ifade edilmiştir.

Her bir parametre kombinasyonu için 100 adet (50 adet çoklu ve 50 adet tekli) problem olmak üzere toplamda 2400 kıyaslama problemi üretilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, tesis sayısının artması ile problemin çözümünün zorlaştığı görülmüştür. Toplam tesis sayısının 13'ün üzerine çıktığı (onarım ağı yapısı 251 ve 551) problemlere 14400 saniye süre sınırında çözüm bulunamamıştır. Bu nedenle, analizler sonucunda çözülen problem sayısı 1200 olarak gerçekleşmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.5'te verilmiştir.

Tablo 5.5. Çözümü Araştırılan Kıyaslama Problemleri Tablosu

Kıyaslama Problemi Kombinasyonu	Ortalama Çözüm Süresi (Çoklu)	Ortalama Çözüm Süresi (Tekli)	Ortalama Maliyet İyileşmesi	Maliyet İyileşmesi Standart Sapma Oranı	Gerçekleşen En Yüksek Maliyet İyileşmesi
221_500	124.7	3.9	3.65	0.90	5.48
221_1000	304.2	8.31	3.83	0.94	5.60
221_1500	596.62	11.94	4.01	0.63	5.96
221_1750	598.82	19.26	4.01	0.43	4.82
221_2000	676.84	19.48	3.69	0.49	4.61
221_5000	3210.37	55.87	3.30	1.60	4.11
521_500	922.54	7.34	6.04	1.54	9.73
521_1000	2126.85	16.87	6.06	1.29	8.99
521_1500	2387.37	28.17	6.09	0.93	8.45
521_1750	2288.02	33.28	6.03	0.79	8.27
521_2000	4959.67	39.58	6.01	0.85	7.60
521_5000	9352.41	41.05	5.50	0.53	6.46

### 5.5. Ara Sonuçlar

Gerçek hayat uygulamalarında entegre lojistik destek mühendisleri, lojistik destek analizi faaliyetleri yürütmektedirler. Bu analizlerin sonucunda sistem ürün kırılımında bulunan bazı bileşenler aday bileşen olarak belirlenmektedir. OSA problemi sadece bu belirlenen aday bileşenler için çözülmektedir. Günümüzde karmaşık sistemlerde dahi makul aday bileşen sayısı yaklaşık 1000 bileşen olarak karşımıza çıkmaktadır [28]. Yapılan sayısal analizler sonucunda üst sınır olarak belirlenen süre içerisinde toplam 13 tesis ve 5000 bileşenden oluşan örnekler çözülebilmektedir. Bu durum önerilen karar modelinin çözüm kapasitesinin makul büyüklükteki problemler için yeterli olduğunu göstermektedir.

Yapılan analizler sonucunda OSA probleminin çözümünde tekli yukarı akış seçeneği onarım ağı yerine çoklu yukarı akış seçeneği onarım ağının ele alınması durumunda önemli bir maliyet avantajının olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre, toplam 1200 problemin çözümünde ortalama %4,85'lik bir maliyet tasarrufunun sağlandığı gözlenmiştir.

Tablo 5.5'te verilen tabloda belirtilen Ortalama Maliyet İyileşmesi sütunu, bir parametre kombinasyonu için oluşturulan 50 kıyaslama probleminin çözümü sonucunda elde edilen maliyet iyileşme ortalamasıdır. Gerçekleşen En Yüksek Maliyet İyileşmesi, 50 kıyaslama problemi içerisinde gerçekleşen en yüksek maliyet iyileşmesini göstermektedir. Örneğin, 521\_500 kombinasyonu için ortalama maliyet iyileşmesi %6,04 olarak, gerçekleşen en yüksek maliyet iyileşmesi de %9,73 olarak hesaplanmıştır. Gerçekleşen bu maliyet iyileşme yüzdesi, sistemlerin ömür devri maliyetlerinin oldukça yüksek olması

nedeniyle önemli miktarda tasarruf anlamına gelmektedir. Örneğin, söz konusu problem için ömür devri maliyetinde gerçekleşecek %9,73'lük bir iyileşme, yıllık 2.017.985,43 USD tutarında bir tasarrufa karşılık gelmektedir.

Bunların yanı sıra, onarım ağının yapısı karmaşıklaştıkça çözüm süresinin arttığı, diğer yandan, maliyette gerçekleşen tasarrufun yükseldiği gözlenmiştir. Normal şartlarda OSA problemi günlük olarak çözülmeyen stratejik düzeyde bir problemdir. Gerçek hayat uygulamalarında ihtiyaç duyulması durumunda, daha karmaşık problemlerin çözümü için zaman kısıtlaması genişletilerek yeni karar modeli ile çözüm aranabileceği değerlendirilmektedir.

## 6. ONARIM SEVİYESİ ANALİZİ PROBLEMİNDE ELE ALINAN UZANTILAR

Bu bölümde, OSA problemi kapsamında onarım süresinin ve farklı sevk türlerinin dikkate alınmasına yönelik önerilen yeni karar modeli üzerinde yapılan çalışmaların detaylarına yer verilmiştir.

### 6.1. Onarım Süresi ve Farklı Sevk Türlerinin Onarım Seviyesi Analizi Problemi Üzerindeki Etkisi

Kaynaklarda OSA problemlerini ele alan çalışmalar, arızalı bileşenin elden çıkarılmasına ya da onarılmasına ilişkin kararı verirken, aynı zamanda verilen bu kararın nerede yapılacağını da belirler. Söz konusu çalışmalarda, yoğunlukla toplam maliyetin enküçüklenmesi amaçlanmaktadır. Ancak onarım maliyetlerinin yanında sistemlerin yüksek hazır bulunma oranına sahip olması da karar vericiler açısından büyük önem taşımaktadır. Arızanın giderilmesi için harcanacak toplam onarım süresi arttıkça sistemin hazır bulunma oranı azalmaktadır. Elden çıkarma kararı verilen malzemelerin yerine yenilerinin tedarik edilme süresi ya da yeni malzemenin ambardan çekilme süresi, onarımı yapılacak malzemelerin onarım süreleri, malzemelerin işlem göreceği tesislere sevk edilme süreleri gibi süreler sistemin hazır bulunma oranını doğrudan etkilemektedir. Hazır bulunma oranının düşük olduğu durumlarda, harekât gereksinimleri karşılamak için daha fazla sayıda sisteme ihtiyaç duyulmakta ve bu durum toplam satın alma maliyetlerinde artışa neden olmaktadır. Diğer bir deyişle, envanterde yer alan ancak arızaları nedeniyle servis dışı kalan sistemlerin sahadaki eksiklerini kapatmak için ilave harcamalar yapılması gerekmektedir. Onarım süresi ile onarım maliyeti arasındaki söz konusu ödünleşme nedeniyle, onarım süresinin enküçüklenmesi, yüksek hazır bulunma oranının gerekli olduğu bu tür sistemler için değerlendirilmesi gereken ikinci bir amaç fonksiyonu olarak ortaya çıkmaktadır.

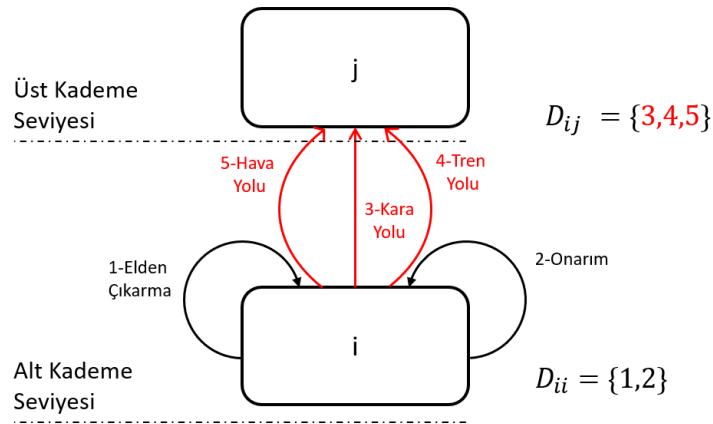
Uçak, gemi, tank gibi stratejik önem taşıyan, yüksek maliyetli ve karmaşık ürün yapısına sahip silah sistemlerin harekât ve bütçe ihtiyaçları, içinde bulunulan koşullara göre değişiklik gösterebilir. Sistemlerin hazır bulunma oranı üzerinde çok önemli etkisi bulunan onarım süresi ile onarım maliyeti arasındaki ödünleşmenin ne ölçüde gerçekleşeceğini bilmeden karar vermek karar vericileri hatalı sonuçlara yönlendirebilir. Bu nedenle, onarım süresi ile onarım maliyeti arasındaki ödünleşmeyi ortaya koyan bir Pareto eğrisi karar vericiler için önemli kararlar öncesinde bir karar destek aracı olarak kullanılabilir.

Bunun yanında, farklı ulaşım türlerinin sevk maliyetleri ve onarım süreleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu da açıktır. Örneğin, arızalı bir bileşenin sistemin bulunduğu bölgeden ilgili onarım tesisine sevki için hava yolu ve deniz yolu olmak üzere iki taşıma seçeneğimiz olduğunu varsayalım. Denizyolu ile yapılacak sevkiyatlar havayolu ile yapılacak sevkiyatlara oranla daha uygun maliyetler ile yapılabilir ancak süre açısından değerlendirildiğinde havayolu ile yapılacak sevkiyattan çok daha uzun süre alacaktır. Harekât gereklilikleri açısından zamanın kısıtlı olduğu durumlarda sevkiyat için havayolu ulaşımı tercih edilmelidir. Farklı ulaşım türleri arasında oluşan bu zaman farkı, tesisler arasında yapılacak malzeme sevk sürelerini ve dolayısıyla arızalı parçaların toplam onarım süresini doğrudan etkilemektedir. Öte yandan, farklı sevk türleri arasındaki maliyet farkı onarım maliyeti üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Bildiğimiz kadarıyla, OSA problemine yönelik kaynaklarda var olan çalışmalarda onarım süresini ve farklı sevk türlerini birlikte dikkate alan bir çalışma bulunmamaktadır.

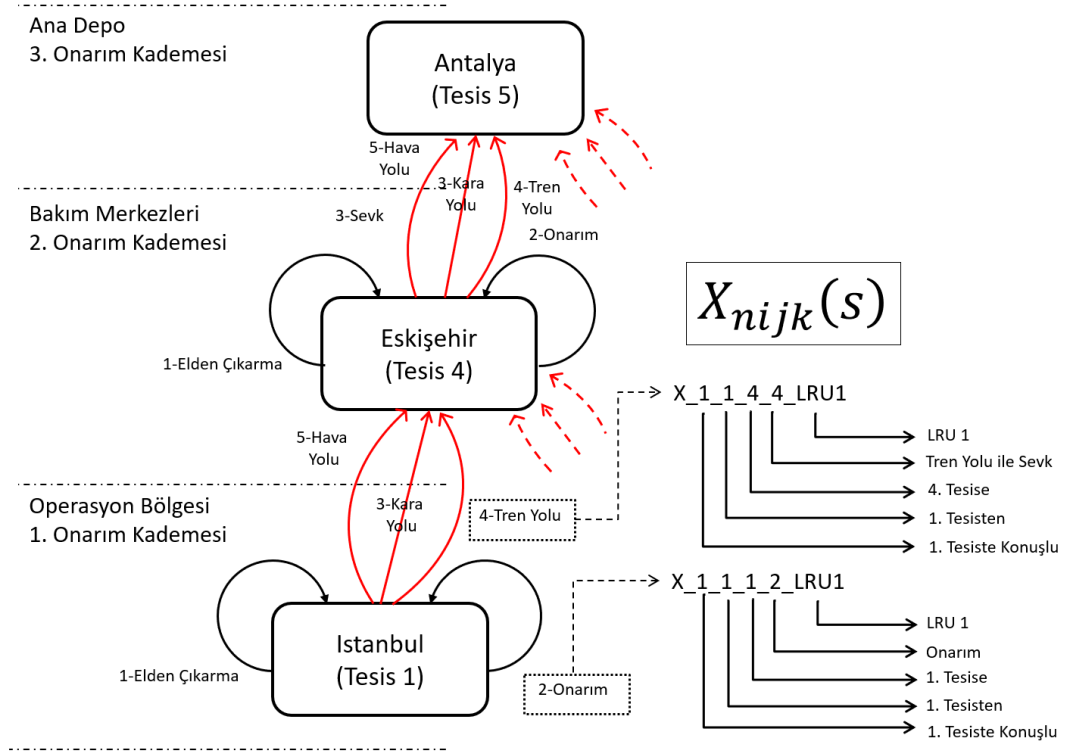
## 6.2. Farklı Sevk Türlerinin Yeni Karar Modeline Eklenmesi

Onarımlara ilişkin kararlar  $D$  kümesi ile tanımlanmıştır. Onarım kararları  $d \in D$  (1) Elden Çıkarma, (2) Onarım ve (3) Sevk olarak tanımlanmıştır. Şekil 5.2’de örnek gösterimi yapılan karar değişkeni yapısı gereği yeni onarım seçeneklerinin modele eklenmesine olanak sağlamaktadır. Bu kapsamda, farklı sevk türleri  $D$  kümesi içerisinde farklı bir onarım seçeneği olarak tanımlanabilmektedir. Böylelikle  $D$  kümesi (1) Elden Çıkarma, (2) Onarım, (3) Kara Yolu Sevk, (4) Tren Yolu Sevk ve (5) Hava Yolu Sevk olacak şekilde yeniden tanımlanarak, Şekil 5.1’de verilen düğüm ayrıt yapısı ile Şekil 5.2’de verilen karar değişkeninin yapısı sırası ile Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de belirtildiği gibi yeniden düzenlenmiştir.



Şekil 6.1. Farklı Sevk Türleri ile Örnek Düğüm ve Ayrıt Gösterimi





Şekil 6.2. Farklı Sevk Türleri ile Karar Değişkeninin Örnek Gösterimi

### 6.3. Eş Zamanlı Olarak Onarım Süresinin Enküçüklenmesi

Onarım süresinin enküçüklenmesinin ikinci bir amaç fonksiyonu olarak karar modeline eklenebilmesi için, bileşen bazında gerçekleşecek onarım süreleri için yeni bir karar değişkeninin belirlenmesine ihtiyaç duyulmuştur. Bu kapsamda  $n \in N$ 'de konuşlu bir sistemin  $s \in S$  bileşeni için  $i \in I$  den  $j \in J_i$ 'ye  $(i, j)$  ayrıtı ile ilişkilendirilmiş  $d$  onarım seçeneğinin seçilmesi durumunda oluşan onarım süresi  $G_{nijd}(s)$  ile gösterilmiş ve aşağıda verilen (19) numaralı amaç fonksiyonu ikinci amaç fonksiyonu olarak modele eklenmiştir.

$$Enk \sum_{n \in N} \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \sum_{d \in D_{ij}} G_{nijd}(s) \cdot X_{nijd}(s) \cdot \lambda_s \quad (19)$$

Bu tez çalışmasının hedeflerinden biri de malzemelerin onarım maliyetlerinin yanında tedarik ve teslim sürelerini kapsayan onarım sürelerinin OSA hesaplamalarına dahil edilmesidir. Bunun gerçekleştirilebilmesi için onarım süresini bileşen bazında hesaplamaya dahil edilmesinin önemi alt bölüm 4.4.2'de belirtilmiştir. Bu amaçla aşağıda belirtilen (20) numaralı bileşen bazlı onarım süresi kısıtı modele eklenmiştir.

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \sum_{d \in D_{ij}} G_{nijd}(q) \cdot X_{nijd}(q) \cdot \lambda_q \leq Z(s) \quad \forall n \in N, \forall q \in Q(s) \quad (20)$$

Karar modeline eklenen (19) numaralı amaç fonksiyonu ve (20) numaralı bileşen bazlı onarım süresi kısıtı sayesinde, sistemin toplam onarım süresi enküçüklenirken seçilecek bir bileşen için gerçekleşecek onarım süresi de bir üst sınır olarak belirlenebilir.

Onarım maliyetlerinin ve onarım sürelerinin eş zamanlı olarak enküçüklenmesi için önerilen çok amaçlı modelin çözümü epsilon kısıt yöntemi kullanılarak örnek bir problem üzerinden çözülmüş ve Pareto eğrisi oluşturulmuştur. Söz konusu çalışmaya ait detaylara sonraki kısımda yer verilmiştir.

#### 6.4. Epsilon Kısıt Yöntemi

Çok amaçlı problemlerin çözümü için kaynaklarda var olan çözüm yöntemleri arasından en çok tercih edilen yöntemlerden biri de epsilon kısıt yöntemidir. Epsilon kısıt yöntemi, sadece bir amaç fonksiyonu kalacak şekilde diğer amaç fonksiyonlarını kısıt olarak modele ekleyerek çok amaçlı karar modelini tek amaçlı karar modeline dönüştürür. Ardından, kısıt olarak eklenen amaç fonksiyonlarının üst sınırları epsilon değeri ile belirlenir ve epsilon değeri değiştirilerek Pareto eğrisi oluşturulur [33].

İki amaçlı problemler,  $X$  uygun çözüm alanını olmak üzere,

$x \in X$  kısıtları altında,

$$\text{enk } f(x) = (f_1(x), f_2(x)) \quad (21)$$

şeklinde ifade edilir. İki amaçlı problemler için uygulanacak epsilon kısıt yönteminde ikinci amaç fonksiyonunun kısıta dönüştürülerek modele eklendiği problem  $P_1(\epsilon_2)$  olarak, ilk amaç fonksiyonunun kısıta dönüştürülerek modele eklendiği problem  $P_2(\epsilon_1)$  olarak tanımlansın.  $P_1(\epsilon_2)$  ve  $P_2(\epsilon_1)$  problemleri sırasıyla,

$$x \in X, \quad (22)$$

$$f_2(x) \leq \epsilon_2, \quad (23)$$

*kısıtları altında*

$$\text{enk } f_1(x) \quad (24)$$

$$x \in X, \quad (25)$$

$$f_1(x) \leq \epsilon_1, \quad (26)$$

*kısıtları altında*

$$\text{enk } f_2(x) \quad (27)$$

olacaktır.

Epsilon kısıt yönteminin uygulanabilmesi için ideal nokta ve nadir nokta olmak üzere iki noktanın tanımlanması gerekmektedir.  $f_i(x)$  amaç fonksiyonunun çözümü  $z_i$  ile

gösterilsin. Bu durumda  $z_1$  ilk amaç fonksiyonunun çözümünü,  $z_2$  de ikinci amaç fonksiyonunun çözümünü simgelemektedir. Her bir amaç fonksiyonunun alacağı en iyi değerler ideal noktayı oluşturmaktadır. İki amaçlı problem için ideal nokta,

$$z^I = (z_1^I, z_2^I) \quad (28)$$

$$z_1^I = \min_{z \in X} z_1, \quad z_2^I = \min_{z \in X} z_2 \quad (29)$$

olarak tanımlanır.

Her bir amaç fonksiyonunun uygun çözüm alanı içerisinde alabileceği en kötü değerler de nadir noktayı oluşturmaktadır. İki amaçlı problem için nadir nokta,

$$z^N = (z_1^N, z_2^N) \quad (30)$$

$$z_1^N = \min_{z \in X} \{z_1 : z_2 = z_2^I\}, \quad z_2^N = \min_{z \in X} \{z_2 : z_1 = z_1^I\} \quad (31)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

Epsilon kısıt yöntemi ile Pareto eğrisinin hesaplanabilmesi için aşağıda belirtilen algoritma adımlarının takip edilmesi gerekmektedir [33].

1.  $i = 1$  ve  $j = 2$  ya da  $j = 1$  ve  $i = 2$  değerlerini ver.
2. İdeal ve nadir noktaları hesapla.
3.  $z_i^I$  ve  $z_j^N$  noktalarını Pareto kümesine ekle ve  $\epsilon_j = z_j^N - \Delta$ , ( $\Delta = 1$ ) olarak belirle.
4.  $\epsilon_j \leq z_j^I$  olduğu sürece  $P_i(\epsilon_j)$  problemini çöz, elde ettiğin  $z_i^*$  ve  $z_j^*$  en iyi çözümleri Pareto kümesine ekle ve  $\epsilon_j = z_j^* - \Delta$  olarak belirle.

### 6.5. Epsilon Kısıt Yönteminin Çoklu Yukarı Akış Modeli İçin Uygulanması

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen çok amaçlı karar modelinin epsilon kısıt yöntemi ile çözümünün gösterilmesi için Tablo 6.1'de belirtilen parametre değerlerine sahip bir örnek problem kullanılmıştır.

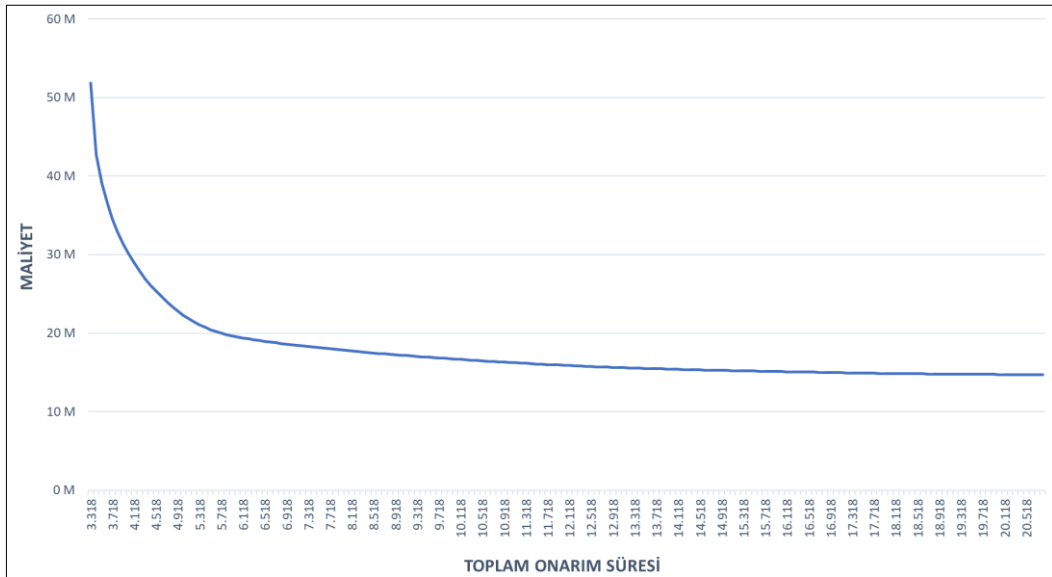
Tablo 6.1. Sayısal Analizlerde Kullanılan Parametre Değerleri

Bileşen Sayısı	1. Seviye	5
	2. Seviye	25
	3. Seviye	470
Alt Sistem Arızalanma Oranı		[0,01;1]
Bileşen Fiyatı		[1.000;100.000]
Onarım Maliyeti (bileşen fiyatına göre oranı)		[0,1;0,4]
Hurda Maliyeti (bileşen fiyatına göre oranı)		[0,75;1,25]
Sevk Maliyeti (bileşen fiyatına ve tesisler arasındaki mesafeye göre oransal)		0,01*km
Kaynak Maliyeti		[10.000;1.000.000]

Problem yukarıda belirtilen algoritma adımlarına uygun bir şekilde çözülmüştür. İlk adım olarak amaç fonksiyonları  $z_1$  onarım zamanının enküçüklenmesi amaç fonksiyonunu,  $z_2$  de onarım maliyetlerinin en küçüklenmesi amaç fonksiyonunu olacak şekilde tanımlanmıştır ( $j = 1$  ve  $i = 2$ ). Daha sonra ideal ve nadir noktaların hesaplanması aşamasına geçilmiştir. Modelin CPLEX çözücüsü kullanılarak yapılan çözümü sonucunda  $z_1^I = \min_{z \in X} z_1 = 3.318$  ve  $z_2^I = \min_{z \in X} z_2 = 14.726.741$  olarak bulunmuştur. Böylelikle ideal nokta  $z^I = (z_1^I, z_2^I) = (3.318, 14.726.741)$  olarak hesaplanmıştır. İdeal noktanın tespit edilmesinden sonra nadir nokta hesaplanmıştır. Onarım zamanı için  $z_1^N = \min_{z \in X} \{z_1 : z_2 = z_2^I\} = 20.818$ , onarım maliyetleri için  $z_2^N = \min_{z \in X} \{z_2 : z_1 = z_1^I\} = 51.870.235$  olarak bulunmuştur. Nadir nokta  $z^N = (z_1^N, z_2^N) = (20.818, 51.870.235)$  olarak kaydedilmiştir.

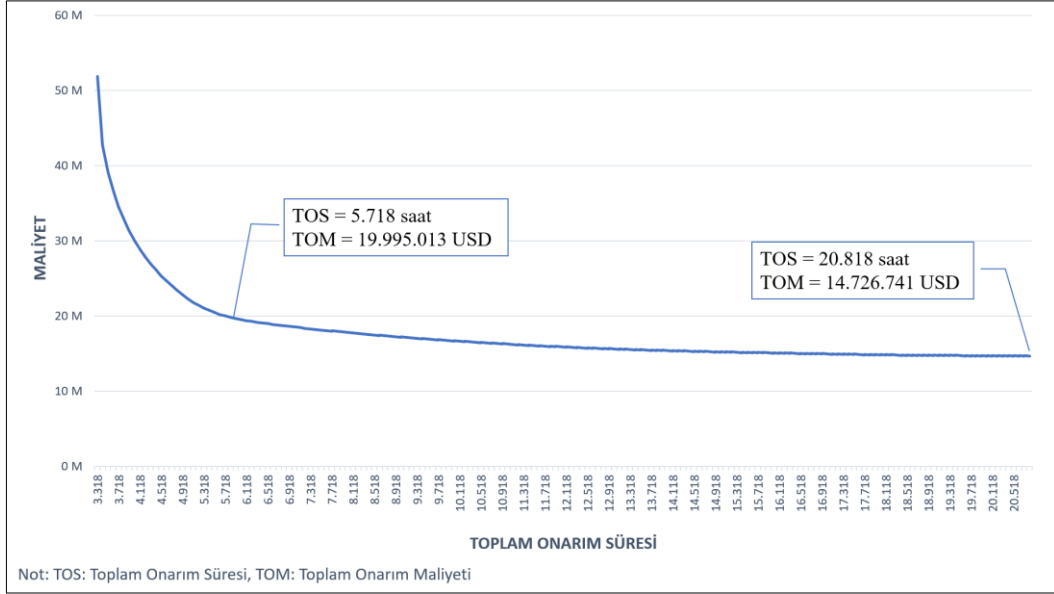
Üçüncü adımda  $z_2^I = 14.726.741$  ve  $z_1^N = 20.818$  noktalarını Pareto eğrisini oluşturan kümeye eklenmiş ve  $\Delta = 100$  olacak şekilde  $\epsilon_1 = z_1^N - \Delta = 20.818 - 100 = 20.718$  olarak hesaplanmıştır. Son adım olarak  $\epsilon_1 \leq z_1^I = 3.318$  koşulu sağlandığı sürece problem çözülmüş, elde edilen  $z_1^*$  ve  $z_2^*$  değerleri Pareto eğrisini oluşturan kümeye eklenmiş ve  $\epsilon_1 = z_1^* - 1$  olacak şekilde güncellenmiştir.

Çalışma kapsamında toplam 176 problem çözülmüş ve çözümlere ait Pareto eğrisi Şekil 6.3'te verilmiştir. Yapılan çözümler sonucunda toplam onarım süresi ve maliyet arasındaki ödünleşme grafiksel olarak ortaya konmuştur.



Şekil 6.3. Örnek Problemin Pareto Eğrisi

Şekil 6.4'te görüldüğü gibi toplam onarım maliyetlerinde oluşacak yaklaşık 5 Milyon USD'lik bir maliyet farkı ile toplam onarım süresi 20.818 saatten 5.718 saate düşürülebilmektedir. Bu noktadan sonra toplam onarım süresinde yapılacak iyileştirmeler için katlanılması gereken maliyetler ise çok hızlı bir şekilde artmaktadır. Bu bilginin ortaya sayısal olarak ortaya konmuş olması karar vericiler açısından büyük önem taşımaktadır.



Şekil 6.4. Toplam Onarım Süresi ve Toplam Onarım Maliyeti Arasındaki Fark

## 6.6. Ara Sonuçlar

Bu bölümde, OSA problemi kapsamında ömür devri süresince sistemin maruz kalacağı toplam onarım süresini ve onarım maliyetlerini eş zamanlı olarak enküçüklemeyi amaçlayan çok amaçlı bir karar modeli önerilmiştir. Yanı sıra, önerilen karar modeli farklı sevk türlerini de dikkate alabilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu sayede farklı ulaşım seçeneklerinin maliyet ve zaman etkisi OSA problemi kapsamında hesaba katılabilmektedir. Özellikle farklı sevk türlerinin karar modeline eklenmesi ile onarım kararlarına ilişkin süreler daha büyük önem kazanmıştır. Onarım süreleri ile ilgili kısıtların gevşek olduğu problemlerin çözümlerinde kararların en ucuz fakat en uzun sevk süresine sahip sevk türünü benimseyecek şekilde ortaya çıktığı gözlenmiştir.

Önerilen çok amaçlı modelin çözümünün gösterimi için makul büyüklükte bir örnek problem oluşturulmuştur. Söz konusu örnek problemin çözümü için kaynaklarda sıkça yararlanılan çözüm yöntemlerinden biri olan epsilon kısıt yöntemi kullanılmıştır. Problem toplam 176 kez çözümlenerek Pareto eğrisini oluşturan değerler belirlenmiştir. Oluşturulan Pareto eğrisi sayesinde, farklı sevk türlerinin seçilmesi ile değişiklik gösteren toplam onarım süresinin onarım maliyetlerine olan etkisi açıkça gösterilmiştir.

Önerilen çok amaçlı modelin bir diğ er avantajı, sistemin toplam onarım süresi enküçüklenirken seçilecek bir bileş en için gerçekleş ecek onarım süresinin de bir üst sınır olarak belirlenebiliyor olmasıdır. Gerçek hayat uygulamalarında, genel olarak arızalı bir bileş enin belirli bir süre içinde onarılması gerekmektedir. Önerilen çok amaçlı model sayesinde karar vericiler onarım süresi ve onarım maliyetleri arasında bir denge kurabilecek ve aynı zamanda bileş en bazlı zaman gereksinimlerini de karşılayabileceklerdir.

## 7. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, karmaşık ürün yapısına sahip ve yüksek maliyetli savunma sanayi sistemlerini veya diğer sektörlerdeki benzer yapıdaki ürünleri kapsayacak şekilde, ömür devri maliyetini enküçüklemeyi amaçlayan OSA problemine yönelik olarak literatürde mevcut olan çalışmalar irdelenmiş ve gerçek hayat uygulamalarına uygun olarak esnek yapıya sahip yeni modelleme ve çözüm yaklaşımları geliştirilmiştir.

Literatürde mevcut olan çalışmalarda, onarım ağlarını oluşturan tesislerin, arızalı bileşenlerin bir üst kademeye sevk edilebilmeleri için sadece tek bir yukarı akış seçeneğine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum OSA problemi kapsamında daha fazla sabit maliyet oluşturan kararların verilmesine ve dolayısı ile bu kararların gerçekleştirilebilmesi için mükerrer yatırımların yapılmasına neden olabilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında, söz konusu mükerrer maliyetlerin önüne geçilebilmesi için onarım ağlarında çoklu yukarı akış seçeneğini benimseyen bir onarım ağı yapısı önerilmiştir. Bu yeni yaklaşım ile onarım ağında bulunan tesisler, üst onarım kademesine malzeme sevkiyatlarını birden fazla tesise yapabilmektedir.

Literatürdeki çalışmalar arasında, OSA problemine yönelik en kapsamlı modelin Basten vd. [15] tarafından önerildiği görülmektedir. Bu kapsamda, söz konusu modelin yukarıda bahsedilen çoklu yukarı akış seçenekli onarım ağlarına uyarlanabilmesi için tez kapsamında yeni modelleme önerileri geliştirilmiş ve yapılan uyarlamalar sonucunda çoklu yukarı akış seçeneğinin avantajları örnek problemler üzerinde gösterilmiştir. Ancak, ilerleyen aşamalarda Basten vd. [15] tarafından önerilen model yapısının tezin amaçları açısından yetersiz kaldığı görülmüş ve bu nedenle yeni bir karar modeli geliştirilmiştir.

Önerilen yeni karar modelinin performansının değerlendirilebilmesi amacıyla detaylı sayısal analizler yapılmış ve sonuçta toplam 13 tesis ve 5000 bileşenden oluşan örneklerin makul süreler içerisinde çözülebildiği görülmüştür. OSA problemi, ürün kırılımında aday bileşenler olarak belirlenen bileşenleri kapsayacak şekilde çözülmektedir ve bu bileşen sayısı karmaşık sistemlerde dahi yaklaşık 1000 bileşen olarak karşımıza çıkmaktadır [28]. Böylelikle, önerilen karar modelinin performansının gerçek hayata uygun büyüklükteki problemlerin çözümü için yeterli olduğu görülmüştür.

Buna ilave olarak, yapılan analizler sonucunda OSA probleminin çözümünde tekli yukarı akış seçenekli onarım ağı yerine çoklu yukarı akış seçenekli onarım ağının ele alınması durumunda önemli bir maliyet avantajının olduğu ortaya konmuştur. Toplam

1.200 probleminin çözümü sonucunda elde edilen sonuçlara göre ömür devri süresince gerçekleştirilecek toplam onarım maliyetlerinde ortalama %4,85'lik bir tasarrufun sağlanabileceği gösterilmiştir. Ayrıca, problemin yapısına göre değişiklik göstermekle birlikte gerçekleşen en yüksek maliyet iyileşmesinin %9,73 oranına kadar çıkabildiği görülmüştür. Gerçekleşen bu iyileşmenin, sistemlerin ömür devri maliyetlerinin oldukça yüksek olması nedeniyle önemli miktarda tasarruf anlamına gelmektedir. Söz konusu %9,73'lük iyileşme, verilen parametre değerleri altında ömür devri maliyetlerinde yıllık 2.017.985,43 USD tutarında bir tasarrufa karşılık gelmektedir. Bunların yanında, çözüm aranan onarım ağının yapısı karmaşıklaştıkça çözüm süresinin arttığı, diğer taraftan ise gerçekleşen tasarrufun yükseldiği gözlenmiştir.

Onarım ağları için önerilen çoklu yukarı akış yaklaşımına ilave olarak, bu tez çalışması kapsamında, ömür devri süresince sistemlerin maruz kalacağı toplam onarım süresini ve onarım maliyetlerini eş zamanlı olarak enküçüklemeyi amaçlayan çok amaçlı bir karar modeli önerilmiştir. Geliştirilen söz konusu karar modeli aynı zamanda farklı sevk türlerini de dikkate alabilmektedir. Bu sayede, farklı ulaşım seçeneklerinin maliyet ve zaman etkisi OSA problemi kapsamında hesaba katılabilmektedir.

Önerilen çok amaçlı modelin çözümünün gösterimi için makul büyüklükte bir örnek problem oluşturulmuştur. Söz konusu problemin çözümü için kaynaklarda sıkça kullanılan çözüm yöntemlerinden biri olan epsilon kısıt yöntemi kullanılmıştır. Problem toplam 176 kez çözümlenerek Pareto eğrisi oluşturulmuş ve bu sayede önerilen modelin onarım süresi ile onarım maliyetleri arasındaki ödünleşmeyi göstermek için kullanılabileceği gösterilmiştir.

Gerçek hayat uygulamalarında, arızalı bir bileşenin belirli bir süre içinde onarılması istenmektedir. Buna yönelik olarak, önerilen çok amaçlı model ile toplam onarım süresi enküçüklenirken seçilecek bir bileşen için gerçekleştirilecek onarım süresine bir üst sınır tanımlanabilmektedir. Bu yaklaşım sayesinde, karar vericiler için büyük önem taşıyan onarım süresi ve onarım maliyetleri arasındaki ödünleşmenin ortaya konabileceği ve aynı zamanda bileşen bazlı zaman kısıtlamalarının da hesaplamaya dahil edilebileceği gösterilmiştir.

Gelecek çalışmalara yönelik olarak, çoklu yukarı akış yaklaşımında kapasite kısıtlamasının maliyet üzerindeki etkisi analiz edilebilir. Çok amaçlı modele yedek parça maliyetlerini enküçüklemek gibi başka amaç fonksiyonları ekleyerek etkilerinin incelenmesi diğer bir araştırma alanı olabilir. Ayrıca, matematiksel modelin yetersiz kalabileceği boyutta



problemler için kabul edilebilir bir sürede yaklaşık çözümler üretebilen yeni sezgisel algoritmalar geliştirilebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] *NATO Guidance on Integrated Logistics Support for Multinational Armament Programmes*, ALP-10, (NSA), NATO Standardization Agency, 2011.
- [2] G. D. Berkowitz, J. N. Gupta, J. T. Simpson ve J. B. McWilliams, "Defining and implementing performance based logistics in government," *Defense Acquisition Review Journal*, pp. 255-267, 2005.
- [3] M. D. Shields ve S. M. Young, "Managing product life cycle costs: an organizational model," *Journal of Cost Management*, vol. 5, no. 3, pp. 39-52, 1991.
- [4] *International Procedure Specification for Logistics Support Analysis*, S3000L, AeroSpace and Defense Industries Association of Europe, 2014.
- [5] *International Specification for Developing and Continuously Improving Preventive Maintenance*, S4000P, AeroSpace and Defense Industries Association of Europe, 2018.
- [6] B. G. Ferrin ve R. E. Plank, "Total Cost of Ownership Models: An Exploratory Study," *Journal of Supply Chain Management*, vol. 38, no. 3, pp. 18-29, Apr. 2006, doi: 10.1111/j.1745-493X.2002.tb00132.x
- [7] *Logistics Support Analysis*, MIL-STD-1388-1A, USA Department of Defense, Washington, 1983.
- [8] *Integrated Logistics Support*, Def Stan 00-60, UK Ministry of Defence, 1998.
- [9] R. Basten, "Designing logistics support systems - Level of repair analysis and spare parts inventories," Ph.D. dissertation, Beta Research School, University of Twente, Enschede, Holland, Netherlands, 2009.
- [10] *Acquisition and Management of Integrated Logistics Support for Systems and Equipment*, DOD D 5000.39, US Military and Government Specs & Standards, 1983.
- [11] B. S. Blanchard ve W. J. Fabrycky, *Systems Engineering and Analysis*. United States: Prentice Hall, 1998.
- [12] P. Koudal, "The service revolution in global manufacturing industries," in *Deloitte Research*, Deloitte, New York, USA: Deloitte, 2006, pp. 1-21. [Online]. Available: <http://www.researchgate.net>

- [13] D. Murthy, O. Solem ve T. Roren, “Product warranty logistics: Issues and challenges,” *European Journal of Operational Research*, vol. 156, no. 1, pp. 110-126, July 2004, doi: 10.1016/S0377-2217(02)00912-8
- [14] R. Oliva ve R. Kallenberg, “Managing the transition from products to services,” *International Journal of Service Industry Management*, vol. 14, no. 2, p. 160–172, May 2003, doi: 10.1108/09564230310474138
- [15] R. Basten, M. van der Heijden ve J. Schutten, “A minimum cost flow model for level of repair analysis,” *International Journal of Production Economics*, vol. 133, no. 1, pp. 233-242, Sep. 2011a, doi: 10.1016/j.ijpe.2010.03.025
- [16] *Level of Repair Analysis*, MIL-HDBK-1390, Department of Defense - United States of America, 2015.
- [17] P. Alfredsson, “Optimization of multi-echelon repairable item inventory systems with simultaneous location of repair facilities,” *European Journal of Operational Research*, vol. 99, no. 3, pp. 584-595, June 1997, doi: 10.1016/S0377-2217(96)00322-0
- [18] R. Basten, M. van der Heijden ve J. Schutten, “Joint optimization of level of repair analysis and spare parts stocks,” *European Journal of Operational Research*, vol. 222, no. 3, pp. 474-483, Nov. 2012, doi: 10.1016/j.ejor.2012.05.045
- [19] D. Cranshaw, R. Pall ve S. Wesolkowski, “On the application of a multi-objective genetic algorithm to the LORA-spares problem,” *Operations Research Proceedings*, Hannover, Germany, Sep. 5-7, 2012.
- [20] R. Basten, M. van der Heijden, J. Schutten ve E. Kutanoglu, “An approximate approach for the joint problem of level of repair analysis and spare parts stocking,” *Ann Oper Res*, vol. 224, no. 1, p. 121–145, Jan. 2015, doi: 10.1007/s10479-012-1188-0
- [21] W. Liu, K. Liu ve T. Deng, “Modelling, analysis and improvement of an integrated chance-constrained model for level of repair analysis and spare parts supply control,” *International Journal of Production Research*, vol. 58, no. 10, pp. 3090-3109, June 2019, doi: 10.1080/00207543.2019.1629669

- [22] B. Ghaddar, N. Sakr ve Y. Asiedu, "Spare parts stocking analysis using genetic programming," *European Journal of Operational Research*, vol. 252, no. 1, pp. 136-144, July 2016, doi: 10.1016/j.ejor.2015.12.041
- [23] M. Rawat, B. K. Lad ve A. Sharma, "Simulation-based joint optimization of fleet system modularity and level of repair decisions considering different failure rates of components," *Grey Systems: Theory and Application*, vol. 10, no. 3, pp. 377-390, June 2020, doi: 10.1108/GS-12-2019-0066
- [24] M. Rawat, B. K. Lad, "Joint optimization of reliability design and level of repair analysis considering time dependent failure rate of fleet system," *Int J Performability Eng*, vol. 16, no. 6, pp. 821-833, June 2020, doi: 10.23940/ijpe.20.06.p1.821833
- [25] L. Barros, "The optimization of repair decision using life-cycle cost parameters," *IMA Journal of Management Mathematics*, vol. 9, no. 4, pp. 403-413, Oct. 1998, doi: 10.1093/imaman/9.4.403
- [26] L. Barros ve M. Riley, "Combinatorial approach to level of repair analysis," *European Journal of Operational Research*, vol. 129, pp. 242-251, Mar. 2001, doi: 10.1016/S0377-2217(00)00221-6
- [27] H. Saranga ve U. Kumar, "Optimization of aircraft maintenance/support infrastructure using genetic algorithms—level of repair analysis," *Ann Oper Res*, vol. 143, no. 1, pp. 91-106, Mar. 2006, doi: 10.1007/s10479-006-7374-1
- [28] R. Basten, J.M.J. Schutten ve M. van der Heijden, "An efficient model formulation for level of repair analysis," *Ann Oper Res*, vol. 172, no. 1, pp. 119-142, Jan. 2009, doi: 10.1007/s10479-009-0516-5
- [29] R. Basten, M. van der Heijden ve J.M.J. Schutten, "Practical extensions to a minimum cost flow model for level of repair analysis," *European Journal of Operational Research*, vol. 211, no. 2, pp. 333-342, June 2011b, doi: 10.1016/j.ejor.2010.11.015
- [30] E. S. Brick ve E. Uchoa, "A facility location and installation of resources model for level of repair analysis," *European Journal of Operational Research*, vol. 192, no. 2, pp. 479-486, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.ejor.2007.08.043

- [31] T. Bouachera, M. Kishk ve P. Laurie, "Level of repair analysis based on genetic algorithm with tabu search," *Proceedings of the World Congress on Engineering*, London, U.K, vol III, WCE 2010, June 30 - July 2, 2010.
- [32] *Defence Logistics Support Chain Manual Volume 7 Supportability Engineering*, JSP-886, UK Ministry of Defence, 2014.
- [33] J.-F. Bérubé, M. Gendreau ve J.-Y. Potvin, "An exact  $\epsilon$ -constraint method for bi-objective combinatorial optimization problems: Application to the traveling salesman problem with profits," *European Journal of Operational Research*, vol. 194, no. 1, pp. 39-50, Apr. 2009, doi: 10.1016/j.ejor.2007.12.014