



Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü

İşletme Anabilim Dalı

Üretim Yönetimi ve Sayısal Yöntemler Bilim Dalı

**ENTEĞRE LOJİSTİK DESTEK KAPSAMINDA YEDEK PARÇA
ENVANTERİ BELİRLEME PROBLEMİNE BİR MODEL ÖNERİSİ**

Serhat ŞİVETOĞLU

Yüksek Lisans Tezi

Ankara, 2023

ENTEGRE LOJİSTİK DESTEK KAPSAMINDA YEDEK PARÇA ENVANTERİ
BELİRLEME PROBLEMİNE BİR MODEL ÖNERİSİ

Serhat ŞİVETOĞLU

Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü

İşletme Anabilim Dalı

Üretim Yönetimi ve Sayısal Yöntemler Bilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Ankara, 2023

KABUL VE ONAY

Serhat ŐIVETOĐLU tarafından hazırlanan "Entegre Lojistik Destek Kapsamında Güvenilirlik Varsayımları ile Yedek Parça Envanter Belirleme Problemi" baŐlıklı bu alıŐma, 19 Ocak 2023 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Can Deniz KÖKSAL (BaŐkan)

Dr. Öğr. Üyesi Bülent ÇEKİÇ (DanıŐman)

Prof. Dr. Mine ÖMÜRGÖNÜLŞEN (Üye)

Doç. Dr. Mehmet SOYSAL (Üye)

Dr. Öğr. Mustafa ÇİMEN (Üye)

Bu tez çalışmasında Sayın (Unvanı, Adı ve Soyadı) Ortak DanıŐman olarak görev almıştır.

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

Prof.Dr. UĞur ÖMÜRGÖNÜLŞEN

Enstitü Müdürü

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinleri yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H.Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir. ⁽¹⁾
- Enstitü / Fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren ay ertelenmiştir. ⁽²⁾
- Tezimle ilgili gizlilik kararı verilmiştir. ⁽³⁾

20/03/2023

Serhat ŞİVETOĞLU

“*Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge*”

- (1) Madde 6. 1. Lisansüstü teze ilgili patent başvurusu yapılması veya patent alma sürecinin devam etmesi durumunda, tez **danışmanının** önerisi ve **enstitü anabilim dalının** uygun görüşü üzerine **enstitü** veya **fakülte yönetim kurulu** iki yıl süre ile tezin erişime açılmasının ertelenmesine karar verebilir.
- (2) Madde 6. 2. Yeni teknik, materyal ve metotların kullanıldığı, henüz makaleye dönüşmemiş veya patent gibi yöntemlerle korunmamış ve internetten paylaşılması durumunda 3. şahıslara veya kurumlara haksız kazanç imkanı oluşturabilecek bilgi ve bulguları içeren tezler hakkında tez **danışmanının** önerisi ve **enstitü anabilim dalının** uygun görüşü üzerine **enstitü** veya **fakülte yönetim kurulunun** gerekçeli kararı ile altı ayı aşmamak üzere tezin erişime açılması engellenebilir.
- (3) Madde 7. 1. Ulusal çıkarları veya güvenliği ilgilendiren, emniyet, istihbarat, savunma ve güvenlik, sağlık vb. konulara ilişkin lisansüstü tezlerle ilgili gizlilik kararı, **tezin yapıldığı kurum** tarafından verilir *. Kurum ve kuruluşlarla yapılan işbirliği protokolü çerçevesinde hazırlanan lisansüstü tezlere ilişkin gizlilik kararı ise, **ilgili kurum ve kuruluşun önerisi** ile **enstitü** veya **fakültenin** uygun görüşü üzerine **üniversite yönetim kurulu** tarafından verilir. Gizlilik kararı verilen tezler Yükseköğretim Kuruluna bildirilir.

Madde 7.2. Gizlilik kararı verilen tezler gizlilik süresince enstitü veya fakülte tarafından gizlilik kuralları çerçevesinde muhafaza edilir, gizlilik kararının kaldırılması halinde Tez Otomasyon Sistemine yüklenir.

* Tez **danışmanının** önerisi ve **enstitü anabilim dalının** uygun görüşü üzerine **enstitü** veya **fakülte yönetim kurulu** tarafından karar verilir.

ETİK BEYAN

Bu çalışmadaki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, yararlandığım kaynaklara bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu, tezimin kaynak gösterilen durumlar dışında zgn olduğunu, **Dr. Öğr. Üyesi, Bülent ÇEKİÇ** danışmanlığında tarafımdan üretildiğini ve Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Tez Yazım Yönergesine göre yazıldığını beyan ederim.

Serhat şİVETOĞLU

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın bütün süreçlerinde yol ve yöntem göstericiliğiyle, teknik ve bilgi anlamında yaşanan problemlere gösterdiği inovatif yaklaşımıyla, çalışma boyunca yaşanan zorluklara gösterdiği içten, samimi ve iyi niyetli bakış açısıyla sürekli beni destekleyen değerli hocam, tez danışmanım Bülent ÇEKİÇ'e

Çalışmamı değerlendiren, bilgi birikimleri ve tecrübeleri ile beni yönlendiren, daha iyi çıktılar üretmem için beni teşvik eden Tez Savunma Sınavı Jüri üyeleri, Prof. Dr. Can Deniz KÖKSAL'a, Prof. Dr. Mine ÖMÜRGÖNÜLŞEN'e, Doç. Dr. Mehmet SOYSAL'a ve Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ÇİMEN'e

Çalışma süresince bütün bilgi ve birikimleri ile beni sürekli destekleyen, ihtiyaç halinde yardımlarını esirgemeyen Nizameddin ALYAPRAK ve Gizem ÇELİK'e,

Çalışmanın olgunlaşması ve daha verimli sonuçlar vermesi için desteklerini esirgemeyen, Alperen ÖZ, Nihan TUNAR ve Yiğit US'a

Bütün hedeflerimi, uğraşlarımı şekillendiren ve hayatıma anlam katıp, çalışma süresince yaşadığı zorluklara rağmen beni sürekli destekleyen kıymetli eşim Sümeyra Yüksel ŞİVETOĞLU'na

Hayatıma çok yeni katılan ve aldığım tüm kararlarda istemsizce etkisi olan, canım oğlum Mehmethan Ilgaz ŞİVETOĞLU'na

Süreç içerisinde sürekli beni geliştirmeye çalışan, doğrunun ve bilginin peşinden gitmemi sağlayan bütün Hacettepe Üniversitesi hocalarıma,

Çalışma boyunca bana destek ve motivasyon sağlayan bütün dostlarıma teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

ÖZET

ŞİVETOĞLU, Serhat. *Entegre Lojistik Destek Kapsamında Yedek Parça Envanteri Belirleme Problemine Bir Model Önerisi*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 2023.

Hızla gelişen teknoloji ve değişen siyasi – ekonomik konjektüreller, askeri orduların yapısını ve savaş stratejilerini etkilemektedir. Yaşanan değişimler ordu yapılarının kullanılabilirlik, bakım yapılabilirlik, güvenilirlik unsurlarını etkilemektedir. Değişimin sonuçları entegre lojistik destek kapsamında ele alınmakta ve yedek parça ihtiyacı belirlenme yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışma literatürde yer alan envanter planlama yöntemlerinin askeri sistemlere tam olarak entegre edilememesi sebebiyle gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, güvenilirlik yaklaşımları ile muhtemel oluşabilecek arızaların tahmin edilme durumu göz önünde bulundurularak, arızaların giderilmesi için gerekli yedek parçaların envanter yönetimi problemi için yaklaşık karar tahmin modeli önerilmektedir. Oluşturulan model, arızalı parçaların kesin olarak bilinememesi ve tamir edilemeyecek derecede arızalanacak parçaların hangi sıklıkla oluşacağını belirlenememesi sebebiyle, yaklaşık karar tahmin modeli olarak sunulmaktadır. Ele alınan problemde, arızalı araçların tekrar faal hale getirilebilmesi için, arızalı parçanın onarım veya yenisi ile değiştirme kararı alınmaktadır. Model, entegre lojistik destek ile ilgili kısıtlamaları karşılarken, kullanılabilirlik ve cezai yaptırım parametreleri ile minimum maliyeti yaklaşık olarak öngörmektedir.

Anahtar Sözcükler

Kullanılabilirlik, Yedek Parça, Envanter Yönetimi, Güvenilirlik

ABSTRACT

ŞİVETOĞLU, Serhat. *A Model Proposal For The Spare Parts Inventory Determination Problem Within The Scope Of Integrated Logistics Support*, Master's Thesis, Ankara, 2023.

Rapidly developing technology and changing political-economic conjunctures significantly affect the structure and war strategies of military armies. Experienced changes affect the usability, maintainability, reliability of army structures. The results of the change are handled within the scope of integrated logistics support and appear as a method of determining the spare part requirement. This study was carried out because of the inventory planning methods in the literature could not be fully integrated into military systems. In this study, an approximate decision estimation model is proposed for the inventory management problem of the required spare parts to eliminate the breakdowns, considering the reliability approaches and the determination of possible future failures. The model is presented as an approximate decision estimation model since the damaged parts cannot be determined precisely and the frequency of the irreparably damaged parts cannot be known. In the discussed problem, a decision is made to repair the damaged part or replace it with a new one, in order to bring the defective vehicles back into operation. While the Mathematical Model meets the constraints of integrated logistics support, it aims approximate minimum cost with the parameters of availability and penalty cost.

Keywords:

Availability, Spare Parts, Inventory Management, Reliability

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI	ii
ETİK BEYAN	iii
TEŞEKKÜR	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
TABLO LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ	xii
KISALTMALAR LİSTESİ	xiii
GİRİŞ	1
1. BÖLÜM: KAVRAMLAR VE LİTERATÜR	10
1.1 GÜVENİLİRLİK	10
1.2 KULLANILABİLİRLİK ve ÇEŞİTLERİ	13
1.2.1 Doğal Kullanılabilirlik	13
1.2.2 Başarılan Kullanılabilirlik	14
1.2.3 Operasyonel Kullanılabilirlik	14
1.3 OLASILIK DAĞILIMLARI	15
1.3.1 Weibull Dağılımı	15
1.3.2 Arıza Verileri – Reliasoft Değerlendirmesi	17

1.4 GÜVENİRLİK MERKEZLİ BAKIM	20
1.5 TANIMLAR	25
1.5.1 Arıza.....	25
1.5.2 Bakım	25
1.5.3 Düzeltici Bakım.....	25
1.5.4 Önleyici – Koruyucu Bakım	25
1.5.5 Onarım	26
1.5.6 Onarım Kolaylığı.....	26
1.5.7 Güvenilirlik Merkezli Bakım	26
1.5.8 Ortalama Tamir Süresi	27
1.5.9 Arızalar Arası Ortalama Zaman.....	27
1.5.10 Arızaya Kadar Geçen Sürelerin Ortalaması	27
1.5.11 Özel Takım ve Test Ekipmanları	27
1.5.12 Kademe Yetki Çizelgesi.....	27
1.5.13 Hata Modu Etki Analizi	28
1.5.14 Servis Malzeme Listesi.....	28
1.6 LİTERATÜR TARAMASI	28
2. BÖLÜM: PROBLEMİN TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL	38
2.1 PROBLEMİN TANIMI	38
3. BÖLÜM: SAYISAL ANALİZ	50
3.1 VARSAYIM AÇIKLAMALARI	50

3.2 ÇÖZÜM METODOLOJİSİ.....	52
3.3 ÖRNEK OLAY İNCELENMESİ.....	52
3.3.1 Veri Setinin Tanıtılması	52
3.3.2 Örnek Olay Çözümü ve Analizi.....	59
3.3.3 Sürekli Tamir Edilememe Varsayımının Olmadığı Senaryo Analizi	67
3.3.4 Ceza Maliyeti Varsayımının Olmadığı Senaryo Analizi	68
3.3.5 Varsayımların Karşılaştırılması.....	69
SONUÇ.....	71
KAYNAKÇA	75
EK 1. ORJİNALLİK RAPORU.....	80
EK 2. ETİK KURUL / KOMİSYON İZİNİ YA DA MUAFİYET FORMU.....	81

TABLO LİSTESİ

Tablo 1 Saha Arıza Verileri	18
Tablo 2 Zırhlı Askeri Araç Alt Sistemleri.....	21
Tablo 3 Güvenirlik Merkezli Bakım Parçaları	24
Tablo 4 Literatür Karşılaştırma.....	37
Tablo 5 Notasyon Tablosu	42
Tablo 6 Parça Tanımları	53
Tablo 7 Temel Lojistik Verileri.....	53
Tablo 8 Parça – Weibull Parametreleri	54
Tablo 9 Parça-Arıza Adedi.....	55
Tablo 10 17. Aracın Arıza Dağılımı.....	56
Tablo 11 29. Parçanın Arıza Dağılımı	57
Tablo 12 Satın Alma ve Tamir Maliyetleri	58
Tablo 13 Parçaların Süre Tablosu	58
Tablo 14 Fırsat Maliyeti.....	59
Tablo 15 Kullanılabilirlik Yüzdesi ve Ceza Maliyet İlişkisi.....	59
Tablo 16 Parçaların t Zamanında Envanter İhtimal Göstergesi	61
Tablo 17 Parçaların t Zamanında Verilen Sipariş Adetleri	62
Tablo 18 Parçaların t Zamanında Verilen Sipariş Kararları.....	63

Tablo 19 29. Parça Tamir Kararları.....	64
Tablo 20 29. Parça Yenisi İle Değiştirme Kararları	64
Tablo 21 6.Aracın Kullanılabilirlik Durumu	65
Tablo 22 Ceza Maliyeti – Kullanılabilirlik Yüzdesi İçerisinde Geçen Süre.....	66

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. Kademe Yetki Çizelgesi (KYÇ).....	5
Şekil 2 Olasılık Zaman Grafiği.....	11
Şekil 3 Güvenilirlik, Hata Oranı ilişkisi.....	12
Şekil 4 Weibull Olasılık Eğrileri	16
Şekil 5 Reliasoft – Weibull Değişkenleri -1	19
Şekil 6 Reliasoft – Weibull Değişkenleri -2.....	19

KISALTMALAR LİSTESİ

HMEA	Hata Modu Etki Analizi
KYÇ	Kademe Yetki Çizelgesi
ELD	Entegre Lojistik Destek
PB	Periyodik Bakım
MTTR	Onarımlar Arası Ortalama Süre
STTE	Özel Test ve Destek Ekipmanı
Kalb.	Kalibrasyon
Std.	Standard
EKM	Elektronik Kontrol Modülü
RÖK	Risk Öncelik Katsayısı
OEM	Orijinal Ekipman Üreticisi

GİRİŞ

Günümüz işletmeleri için yüksek oranda kâr ve verimli çalışmak oldukça önemlidir. İşletmeler kâr oranlarını arttırmak için özellikle verimli çalışma yöntemlerinde sürekli yenilikler oluşturmuşlardır. Sanayi devriminden bu yana tasarım ve üretim alanlarında yaşanan gelişmeler, kalite süreçlerinde gerçekleşen standartlaşma eğilimi ve özellikle Endüstri 2.0'dan 4.0'a kadarki yükseliş, işletmelerin verimlilik artışında önemli rol oynamıştır. İşletmelerin kârlılığını arttıran temel kalemler, düşük işçilik ve ham madde maliyeti, düşük enerji sarfiyatı, düşük sabit giderler ve en aza indirilmiş hurda oranı olarak söylenebilir. Bunlara ek olarak üretim hattında meydana gelen duruşlar işletme verimini ve kârlılığını olumsuz yönde etkileyen temel faktördür.

İşletmeler üretim hatlarında yaşanan duruşları en aza indirmek için sanayi devriminden bu yana birçok yöntem geliştirmişlerdir. Gelineen bugünkü noktada ise arıza kaynaklı duruşları azaltmak için yüksek güvenilirlikli makinalar tasarlama ve üretim hattında yüksek güvenilirlikle tasarlanmış makinaları kullanmak tercih edilen bir yöntem olmaktadır. İşletmelerin büyük bir kısmı yüksek güvenilirlikli tasarımları oluşturmak için 1960 yılında ortaya çıkmış Hata Modu Etki Analizi'ni (HMEA) tasarım süreçlerinde aktif olarak kullanmaktadır (Sharma&Srivastava, 2018). Hata Modu Etki Analizi'nin otomotiv sanayinde, havacılık sektöründe ve askeri sistem tasarımı yapan işletmelerde ilgili standartlar gereğince kullanılması zorunludur. Otomotiv sanayinde IATF 16949 standardı ile, havacılık sektöründe AS9100 standardı ile savunma sanayinde ise S3000L ve MIL-STD standartları ile zorunlu tutulmuştur.

Hata Modu Etki Analizi, tasarım süreçlerinde güvenilirliği arttırmak için kullanılırken özellikle seri üretim gerçekleştiren işletmelerde üretim hatlarının verimli çalışmasının artırılmasında kullanılmaktadır. Yüksek güvenilirlikli ürünler tasarlamak için oluşturulan Hata Modu Etki Analizi birçok paydaşın çalışmaya

katılması ile gerçekleştirilmektedir. Saha verileri, işletmenin sahip olduğu “bilgi birikimi”, tasarım ve üretim anlamında gerçekleşen gelişmeler, bu alanda yazılmış akademik çalışmalar dikkate alınarak Tasarım Hata Modu Etki Analizi oluşturulur. Bu çalışmaların gerçekleşmesinde tasarımcıların yanı sıra, kritik tasarım gözden geçirme süreçlerinde veya konsept tasarım inceleme süreçlerinde, üretim, kalite güvence, kalite kontrol, test ve analiz ekipleri de yer alarak yüksek güvenilirlikli ürün tasarımı oluşturulur.

Hata Modu Etki Analizinin sonuçlarından bir tanesi önleyici bakımdır. Periyodik bakımlar, ürünün tasarımında kaynaklı ve belirli aralıklar ihtiyaç duyulan bakım türüdür (Ahmad&Kamaruddin, 2012). Bakım konseptleri gereği işletmelerin bakım yöntemleri ve bakım kademeleri değişkenlik göstermektedir. Ancak önleyici bakım veya periyodik bakım, bütün bakım konseptlerinde zamana, kullanım süresine veya üretim kapasitesine göre tanımlanıp uygulanmaktadır. Örneğin bir aracın periyodik olan motor yağ değişimi periyodu genel olarak bir yıl veya on bin kilometre veya beş yüz motor çalışma saati olarak belirlenebilmektedir. Periyodik bakımların düzgün bir şekilde gerçekleştirilmesi durumunda sistemin daha verimli çalışması, duruşların azalması ve beklenmedik arızaların (düzeltici bakım faaliyetlerinin) azalması beklenmektedir. Periyodik bakımların, belirlenen iş emirlerine uygun, belirli standartlar dahilinde icra edilmesi, ilgili ekipmanın ömür devri boyunca beklenen performansta çalışmasını sağlamaktadır.

Benzer şekilde Hata Modu Etki Analizinin sonuçlarından bir diğeri de düzeltici bakımlardır. Düzeltici bakımlar ekipman veya makinalarda olması beklenen ancak ne zaman olacağı ön görülemeyen arızaları gidermek için icra edilmektedir (Chen&Triverdi, 2001). Hata Modu Etki Analizi çalışmalarında, ekipmanda meydana gelebilecek arızalar ve bu arızalara ait gerçekleşme olasılıkları belirlenmektedir.

Askeri sistemlerde, güvenilirlik hesapları, Hata Modu Etki Analiz çalışmaları ve bakım konseptleri genellikle Entegre Lojistik Destek (ELD) birimi aracılığı ile icra edilmektedir (Bromley&Bottomley, 1994). S3000L ve MIL-STD-1388 standartları

içerisinde ELD faaliyetleri net bir şekilde tanımlanmıştır. Sistem güvenilirliği, etki analizleri, bakım konsepti içeriğinin oluşturulması, periyodik, önleyici bakımların ve esaslarının belirlenmesi, bakım faaliyetlerinin standartlara uygun şekilde icra edilmesi için gerekli dokümantasyon ve eğitim tasarlanması gibi bütün desteklenebilirlik faaliyetleri ELD ekibi tarafından icra edilmektedir (Blanchard 1967).

ELD ekipleri desteklenebilirlik faaliyetlerini icra edebilmek için genellikle dört ana birimden oluşmaktadır:

- Güvenilirlik
- Kullanılabilirlik ve Eğitim
- Bakım Yapılabilirlik ve Eğitim
- Teknik Dokümantasyon

Desteklenebilirlik faaliyetleri kapsamında, Güvenilirlik Ekibi, arıza analizlerinin değerlendirilmesi, Hata Modu Etki Analizlerinin oluşturulması, hata olasılık dağılımlarının belirlenmesi, yedek parça ihtiyaç ön görüşünde bulunulması, güvenilirlik raporunun oluşturulması, dayanıklılık testi sonuç raporunun oluşturulması gibi faaliyetleri icra etmektedir. Kullanılabilirlik ve Eğitim Ekibi, araç kullanım konseptinin değerlendirilmesi, kullanıcı seviyesi bakım ve onarım doküman içeriğinin hazırlanması ve kullanıcı seviyesi eğitici eğitimi içeriğini oluşturarak desteklenebilirlik faaliyetlerini yerine getirmektedir. Bakım Yapılabilirlik ve Eğitim Ekibi, periyodik ve düzeltici bakımların belirlenmesi, düzeltici bakımlar için ihtiyaç duyulan özel ekipman ve test aletlerinin tasarlanması, bakım onarım sürelerinin hesaplanması, periyodik bakım malzemelerinin belirlenmesi (filtre, yağ, sıvı), ihtiyaç halinde eğitim yardımcı malzemelerin tasarımlarının gerçekleştirilmesi, ikinci kademe (birlik seviyesi) ve üçün kademe (fabrika-firma seviyesi) onarım dokümanlarının içeriklerinin oluşturulması ve ikinci – üçüncü kademe bakım onarım eğitici eğitiminin oluşturulması ile desteklenebilirlik faaliyetlerini gerçekleştirmektedir (McLeod 1975). Teknik Dokümantasyon Ekibi ise ELD'nin diğer ekiplerin oluşturdukları içerikleri, S1000D standartına uygun bir şekilde dokümante ederek kayıt altına

alınmasını sağlamaktadır (Shukla vd. 2014). Teknik dokümantasyon ekibinin çıktıları, Kullanıcı Seviyesi El Kitabı, Birlik Seviyesi Bakım Kitabı, Fabrika – Firma Seviyesi Onarım Kitabı, Resimli Parça Kataloğu olarak sınıflandırılmaktadır.

Periyodik bakımların icrası için ortaya çıkan sürelerin azaltılması için kritik tasarımın onaylanma süreci öncesinde çeşitli bakım yapılabilirlik analizleri icra edilir. Bakım yapılabilirlik analizlerinde ele alınan ilk husus periyodik bakımların icra edilmesidir. Bu analizlerde periyodik bakımların verimli bir şekilde icra edilip edilmediğine, kaç teknisyen ile yapılması gerektiğine ve ne kadar süre aldığına karar verilmektedir. Bu analizler sonucunda verimli bir şekilde icra edilemeyen periyodik bakım görevleri için tasarım ekiplerine geri bildirimler verilip tasarım iyileştirmeleri sağlanmaktadır. Örnek olarak, askeri zırhlı araç sisteminde, alternatif güç üretmek için kullanılan yardımcı güç grubu sisteminin periyodik bakımlarından olan motor yağ değişiminin, değişim periyodu oldukça sızdır. Yağ karterlerinin genellikle küçük olması sebebiyle elli ve yüz saat çalışma aralığında yağ değişimi gerekmektedir. Bu dar sıklıkta gerçekleşen bir periyodik bakım görevinin çok kısa ve kolay şekilde icra edilebilir olması gerekmektedir. Aksi durumda araçların duruş süreleri çok yüksek olmaktadır.

Düzeltilici bakımlarda, periyodik bakımlara benzer şekilde bakım yapılabilirlik analizleri kapsamında değerlendirilmektedir. Düzeltici bakımların, periyodik bakımlardan temel farkı, bakım faaliyetinin ne zaman icra edileceğinin tam olarak bilinmemesidir (Stenström vd. 2015). Güvenilirlik çalışmaları ve arıza olasılık dağılımları yardımı ile düzeltici bakımların ne zaman gerçekleşebileceği tahmin edilebilmektedir. Örnek olarak, askeri zırhlı araç sisteminde, enerji üretmek için kullanılan alternatörün arızalanması sonrası aracın tanımlanmış olan görev profilini yerine getirmesi için arızalı alternatörün yenisini ile değiştirilmesi gerekmektedir. Belirtilen değişim işlemi düzeltici bakım kapsamında değerlendirilmektedir. Arızalı alternatörün bir üst kademede onarılması, örnek olarak regülatör arızasının giderilmesi veya statorun değiştirilmesi de düzeltici bakım kapsamında değerlendirilmektedir.

Askeri araç kullanımlarında verim ifadesi genellikle kullanılabilirlik terimi ile ifade edilmektedir. Kullanılabilirlik, bir sistemin belirlenen görev profilinde, belirlenen çevresel şartlarda göreve hazır olarak bekleme durumudur (Macheret 2005). Kullanılabilirliğin önemi günümüz dünyasında her geçen gün artmaktadır. Savaş stratejilerinin değişmesi, bilinen cephe savaşlarının ortadan kalması, hibrid savaş terimi ile savaş stratejilerine hem konvensiyonel hem düzensiz savaşın birlikte yer aldığı savaşların eklenmesi, aynı zamanda savaş dışı birçok kavramın, diplomasi, hukuk, siber savaş vb, savaşları etkilemesi, günümüz dünyasında kullanılabilirlik veya herhangi bir tehdite her an hazır olmak devletlerin öncelikleri arasında gelmektedir.

Askeri sistemlerde kullanılabilirliğin artması için gerekli tasarım iyileştirmelerinin yanı sıra bakım konseptlerinin de faydalı bir şekilde oluşturulması ve kullanılması gerekmektedir. Bakım konsepti, Bakım Kademe Yetkileri veya Kademe Yetki Çizelgesi (KYÇ) olarak ifade edilmektedir. KYÇ içerisinde, askeri araçta bulunan alt parçalara uygulanacak bakım çeşitleri gösterilmektedir (Basten vd. 2012). Bakım çeşitleri, günlük, haftalık, aylık, üç aylık, 1 yıllık, 2 yıllık vb. olarak belirtilmektedir. KYÇ içerisinde askeri araçta bulunan alt parçalara hangi bakım yöntemi ile yaklaşılacağı yer almaktadır (Bıçakçı vd. 2022). Bakım yöntemleri, gözle kontrol, muayene, değişim, tamir, yenileştirme, test- ayar ve yok etme – kayıt silme olarak belirtilmektedir.

Sistem Adı	Parça - Komple	Bakım Görevi	Kademeler				
			Kullanıcı Bakımı			Birlik Bakımı	Fabrika Bakımı
			Kullanıcı/ Mürettebat	Uzman	Tekns.		
GÜÇ GRUBU MONTAJI	MOTOR KOMPLESİ	Faal Tutma/ Kontrol	X				
		Günlük					
		Çıkış (Atış Öncesi)	X				
		Yol (Atış Esnası)	X				
		Dönüş (Atış Sonrası)	X				
		Haftalık Bakım	X				
		3 Aylık Bakım			X		
		Yıllık Bakım				X	
		İki Yıllık Bakım				X	
		Muayene					X
		Onarım					X
		Değişim					X
		Test / Ayar					X
		Yenileştirme					X
Kayıt Silme ve Son İşlem					X		

Şekil 1: Kademe Yetki Çizelgesi (KYÇ)

KYÇ askeri sistemler içerisinde, askeri sistemin sahip olduğu özelliklere, askeri sistemin envanter durumuna, ekonomik güce, ülkenin bulunduğu coğrafyaya göre değişiklikler göstermektedir. Türk Silahlı Kuvvetleri kademe yetki çizelgesi incelendiğinde karşımıza üç kademeli bir bakım sistemi çıkmaktadır. Birinci

kademe, kullanıcı ve kullanıcı bakım teknisyenlerinin icra ettiği bakımlardır. Birinci kademe bakım kapsamında, aracın çıkış, dönüş (günlük), haftalık ve aylık bakımlar yer almaktadır. Bu kademede icra edilen bakımlarda genellikle özel ekipman ihtiyacı yer almamaktadır. Birinci kademede gerçekleştirilen bakımların büyük çoğunluğu periyodik bakımlardan oluşmaktadır. İkinci kademe, birlik seviyesi bakım kademesidir. Bu kademede arızalı parçalarının değişim işlemleri ve belirlenmiş olan kalibrasyon işlemleri gerçekleştirilmektedir. Arızalı parçaların değişimi için ihtiyaç duyulan özel ekipmanlar birlik kademesinde yer almaktadır. Üçüncü kademe ise fabrika – firma seviyesidir. Bu kademede ise arızalı parçaların onarım işlemleri ve kullanım ömrü dolmuş parçaların elden çıkarılma işlemleri gerçekleştirilmektedir.

Türk Silahlı Kuvvetlerinin bakım konsepti gereği sadece ikinci ve üçüncü kademelerde arızalı parçaların değişimi yer aldığı için yedek parça stok tutma işlemi bu kademeleri kapsamaktadır. İkinci kademede sadece arızalı parçaların yenisi ile değişim işlemi yapıldığından, bu kademede onarım işlemleri gerçekleştirilmemektedir. Bu sebeple ikinci kademe de sadece araca takılabilecek parçalar yedek olarak tutulmaktadır. Üçüncü kademe de ise değişim işleminin yanı sıra onarım işlerinin de olmasından dolayı bu kademe de hem araca takılacak parçalar yedek tutulurken hem de parçanın onarılması için ihtiyaç duyulacak alt parçaların yedekleri tutulmaktadır.

Paletli zırhlı bir araçta mobilite, beka, güvenlik bileşenlerinin birbirlerine entegre ve uyumlu bir şekilde çalışabilmesi gerekmektedir. Paletli zırhlı bir araçta yaklaşık elli beş adet alt sistem bulunmaktadır. Örnek olarak, Güç grubu sistemi, güç aktarma sistemi, aydınlatma sistemi, yangın bastırma sistemi, zırh sistemi, sürücü koltuğu sistemi, gövde sistemi vb. Belirtilen alt sistemlerin araç gövdesine entegrasyonu için gerekli alt parçalar ve bazı komplelerin kendi alt parçaları düşünüldüğünde sistemde yaklaşık beş binin üzerinde parça yer almaktadır. Bütün sistemlerin en alt kırılımına kadar inildiğinde ise, pul, civata, rondela dahil, elli binin üzerinde parça olduğu varsayılabilir. Oldukça yüksek sayıda alt parçanın yer aldığı sistemlerde verimli bir yedek planlaması yapmak için saha verileri

kullanılarak bir güvenilirlik analizi yapmak lojistik faaliyetleri için zorunluluk haline gelmektedir.

Bakım kademe sistemlerinde planlı bir yedek çalışmasının yapılabilmesi için hangi parçaların tamir edilmesi gerektiği hangi parçaların ise tamir edilemeyen – edilmeyen parçalar olarak sınıflandırılması gerekmektedir (Dekker vd. 2013). Parçaların tamir edilip edilmeme durumu, parçaya ait tamir için gerekli alt parça ihtiyacını belirlemektedir. Parçaların tamir edilme ve edilmeme durumunu genel olarak parçanın tasarım safhasındaki yöntemler belirlemektedir. Ancak bazı istisnai durumlarda tamir edilebilen parçalar tamir edilemeyen parçalar kategorisine alınabilir. Tamir edilebilen parçaların tamir edilemeyen kategorisine alınmasının temel sebepleri, parça onarım süresinin çok uzun olması, parça maliyetinin çok ucuz olması, parça tedarik süresinin çok kısa olması olarak söylenebilir. Örnek olarak, arızalı kablajların onarım durumu gösterilebilir. Kısa metrajlı kablajların maliyetleri göreceli olarak oldukça düşüktür. Uzun metrajlı kablajların ise maliyetleri daha yüksektir. Bu durumda eğer kısa metrajlı kablaj arızalanırsa tamir edilmeden hurdalanabilir. Uzun metrajlı kablaj arızalanırsa maliyet sebebiyle tamir edilebilir. Başka bir örnek ise motor yakıt enjektörlerinden verilebilir. Motor yakıt enjektörlerinin tamir işlemi ve sonrasında gerçekleştirilen doğrulama ve kalibrasyon işlemleri oldukça uzun sürmektedir. Bu durumda tamir edilebilir kategorisinde yer alması gereken enjektörler, onarım süresi sebebiyle tamir edilemez kategorisinde tutulabilir. Bu durumda enjektör onarımı gerçekleştirilmeyeceği için yedek alt parça ihtiyacı ortadan kalkmıştır.

Tamir edilebilir parçalar kategorisinde bulunan parçalar için alt parça yedek planlaması yapılabilir. Ancak bir parçanın tamir edilebilir olması, o parça özelinde oluşan bütün arızaların onarılabileceği anlamı taşımamaktadır. Bu durumda tamir edilebilir parçalar kategorisinde yer alan parçalar içinde minimum adette yedek parça tutma kararı alınabilir. Bu durumun önüne geçmek için detaylı bir çalışma yapılarak, parçaya ait bilinen – beklenen arıza listesi çıkartılmalı ve hangi arızaların tamir edilebileceği hangilerinin ise tamir edilemeyeceği belirlenip, gerekli alt parçaların yedekleri stoklanabilir. Örnek olarak karter sisteminde meydana gelen yağ kaçağının kök sebebi karter üzerinde yer alan contanın

ömrünün bitmesi ise contanın değiştirilmesi ile arıza giderilebilir. Ancak yağ kaçağının kök sebebi karter üzerinde herhangi bir nedenden dolayı oluşan çatlama, kırık ise karter değiştirmeden yağ kaçağı önlenemez. Bu durumda yağ karteri duruma göre hem tamir edilebilir kategoride yer almaktadır hem de tamir edilemeyen kategoride yer almaktadır.

Yedek parça envanter yönetim kararlarının alınmasında birçok parametre önemli rol oynamaktadır. Hangi parametrelerin ön plana çıkıp envanter yönetim kararı alınacağı genellikle yapılan sözleşmelerde belirlenmektedir. Yüklenici ve kullanıcı arasında gerçekleşen sözleşmelerde, kullanıcının ihtiyacına ve lojistik yönetim, planlama şekline ve bakım kademelerine göre farklı yedek belirleme yöntemleri belirlenmektedir (Ducros ve Pamphile 2019). Örnek olarak, yedek parça statüsünde yer alan parçaların hepsinden yüzde beş yedek tutulması imzalanan sözleşmede yedek parça yönetimi olarak belirlenebilir. Diğer örnekler ise, aracın hareket kabiliyetini ve güvenlik faktörlerini etkileyen, motor, transmisyon, dişli kutuları, yangın bastırma sistemine ait alt parçalar, su tahliye sistemine ait sintine pompası vb. gibi parçalardan yüzde on yedek tutulması diğer parçalardan ise yüzde üç yedek parça tutulması - filonun kullanılabilirliğini yüzde doksan beş seviyesinde tutmayı sağlayacak kadar yedek parça stoklanması - filo güvenilirliğini belirlenen seviyenin üzerinden tutmayı sağlayacak kadar yedek parça tutulması veya tamamen ekonomik bütçe kısıtına dayalı, kullanıcının belirleyeceği parçalardan yine kullanıcının belirleyeceği sayıda yedek tutulmasıdır.

Bu çalışmanın amacı, gerçek hayatta yaşanan envanter yönetimine, güvenilirlik ve kullanılabilirlik kısıtları dahil edilmiş bir karar tahmin modeli sunmaktır. Yedek parça envanter yönetiminde kullanılabilirlik kısıtlı, cezai yaptırımı olan ve hata dağılımlarının güvenilirlik esaslı öngörüldüğü matematiksel bir model bulunamamıştır. Bu çalışmada zamana bağlı hata fonksiyonu ile meydana geleceği ön görülen duruşların, yedek parça stoğu temin edilerek veya arızalı parçaların onarımı ile giderilmesi durumlarında meydana gelecek zararın minimize edilmesine destekleyen yaklaşık karar tahmin modeli amaçlanmıştır. Problemden çözümünde kullanılan matematiksel model, oluşacak arızaların

güvenilirlik verileri ile tahmin edilmesi ve arızalanacak parçaların tamir veya değişime uygunluk varsayımları sebebiyle optimum çözüm bulma yöntemine ve karar verme sürecine destek vermektedir.

Tezin içeriği aşağıdaki gibi özetlenebilir;

Birinci bölümde, güvenilirlik ve kullanılabilirlik tanımlarına dair bilgiler yer alacaktır. Güvenilirlik hesaplamasında kullanılan dağılımlar bu bölümde açıklanacaktır. Bu bölüm içerisinde askeri sistemlerde yedek parça envanter yönetimine ilişkin literatür araştırma sonuçları hakkında bilgi verilecektir.

İkinci bölümde, bu çalışmada oluşturulan matematiksel modele ait açıklamalar yapılacaktır. Problem tanımının açıklanmasının ardından zamana bağlı hata denklemi ile hataların ön görülmesi açıklanacaktır. Daha sonra, envanter yönetimi ile ilgili matematiksel model ve notasyon Tablosu gösterilecektir.

Üçüncü bölümde, matematiksel modelin çözümü ile alınan sonuçlar paylaşılacaktır.

Sonuç bölümünde çalışmanın amacı ve oluşturulan yaklaşık karar tahmin modelin sonuçlarının bir özeti yer alacaktır. Geliştirilen matematiksel model hakkında değerlendirme yer alacaktır.

1. BÖLÜM

KAVRAMLAR VE LİTERATÜR

Kavramlar ve literatür bölümü içerisinde, çalışmanın ana hatlarını oluşturan lojistik ve güvenilirlik kavramları ile ilgili detaylı açıklamalar yer almaktadır. Ek olarak, matematiksel modelin temelini oluşturan güvenilirlik varsayımlarının dağılımları ve fonksiyonları sunulmaktadır. Bölümün son kısmında ise çalışma ile ilgili gerçekleştiren literatür taramasının sonuçları ve özet bir karşılaştırma tablosu yer almaktadır.

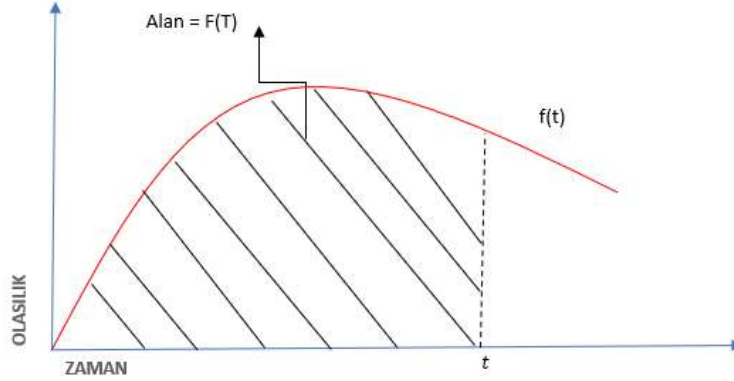
1.1 GÜVENİLİRLİK

Güvenilirlik analizleri günümüz dünyasında askeri sistemlerin ömür devri yönetimi kapsamında ele alınan ilk konudur. Askeri araç tedarik sözleşmelerinde, hizmet alımı veya lojistik destek sözleşmelerinde güvenilirlik maddesi yer almaktadır. Bu sözleşmelerde gerek sistem bazlı gerekse alt sistem bazlı güvenilirlik oranları belirtilmekte ve sistemlerin kullanılmasında güvenilirlik değerlerinin karşılanması beklenmektedir. Genel yaklaşım olarak, aracın veya ürünün bütününe kapsayan güvenilirlik değeri konu olan sözleşmelerde talep edilmektedir.

Güvenilirlik analizi, bir aracın, bir sistemin veya bu sisteme ait alt parçalarının belirlenen bir zaman aralığında ve belirli kullanım koşullarında, kendisinden beklenen fonksiyonu, herhangi bir kayıp olmadan gerçekleştirebilme olasılığıdır (Azid vd. 2019). Güvenilirlik hesaplanmasında yer alan olasılık ifadesinden sebeple, ilgili parçanın veya sistemin hatasız çalışma – çalışmama durumunun net bir şekilde ortaya koyulamayacağı anlaşılmaktadır. Bu durumda güvenilirlik analizleri olasılık dağılımları dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Gerçek uygulamalarda sistemlerin arıza zamanları sürekli değişkenlik göstermektedir. Bu

değişkenliklere göre sisteme ait olasılık dağılımı karakterize edilmektedir. Güvenilirlik analizlerinde en sık kullanılan olasılık dağılımları, normal dağılım, üstel dağılım, poisson dağılımı ve weibull dağılımıdır.

Güvenilirlik fonksiyonu bir sistemde belirlenmiş bir parçanın belirlenen bir zamana kadar fonksiyonelliğinde herhangi bir kayıp olmadan kullanılması olarak ifade edilmektedir (Gavrilov&Gavrilova, 2005). Olasılık fonksiyonu ise belirlenen bir zamandaki arızanın olasılığını göstermektedir. Kümülatif yoğunluk fonksiyonu ise sistemin kullanımından başlayan ve belirlenen zamana kadarki arıza olasılıklarını göstermektedir.



Şekil 2: Olasılık Zaman Grafiği

$f(t)$ = Olasılık yoğunluk fonksiyonu

$F(t)$ = Kümülatif yoğunluk fonksiyonu

Kümülatif yoğunluk fonksiyonu sistemde yer alan arıza olasılığını gösterdiğinden bu fonksiyon, hata oranı fonksiyonu olarak da ifade edilmektedir. Hata oranı fonksiyonu, belirlenen zamana kadar ortaya çıkabilecek hata olasılığını 1.1'de ki gibi göstermektedir.

$$F(t) = \int_0^t f(x)dx, \quad t > 0 \quad (1.1)$$

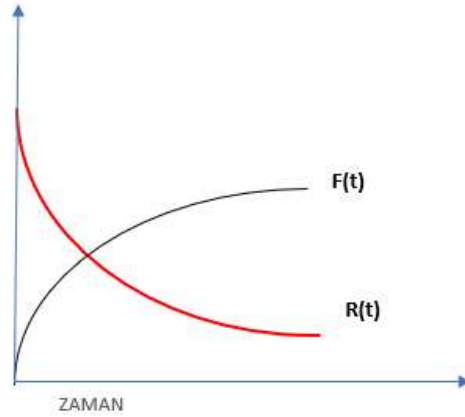
Güvenilirlik fonksiyonu ise hata oranı fonksiyonun tamamlayıcısı gibi düşünülebilir. Güvenilirlik fonksiyonu belirlenen zamana kadar fonksiyon kayıpsız çalışma olasılığını göstermektedir.

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(x)dx, \quad t > 0 \quad (1.2)$$

Hata oranı fonksiyonu ile güvenilirlik fonksiyonu arasındaki ilişki 1.3'de ki gibi ifade edilmektedir.

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (1.3)$$

Güvenilirlik fonksiyonu zamanla azalırken, hata oranı fonksiyonu ise zamanla artmaktadır. Hata oranı fonksiyonu ve güvenilirlik fonksiyonu arasındaki ilişki Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3: Güvenilirlik, Hata Oranı ilişkisi

Sistemde bulunan parçaların arızalanıp yenisi ile değiştirilmesi durumunun yanında arızalı parçaların tamir edilip sistemde yeniden kullanılma durumları da mevcuttur. Sistemde yer alan parça arızalandığı zaman onarılamıyor ise bu parçanın yenisi ile değiştirilmesi gerekmektedir. Tamir edilemeyen parçalar için belirlenen arızaya kadarki ortalama zaman 1.4'de ki gibi ifade edilmektedir.

$$\text{Arızaya Kadar Geçen Ortalama Süre} = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (1.4)$$

$$\text{Arızaya Kadar Geçen Ortalama Süre} = \int_t^{\infty} R(t) dt \quad (1.5)$$

Tamir edilebilen parçalar için ise arızalar arasındaki ortalama zaman ifadesi kullanılmaktadır (Krasich, 2009). Bu ifade, arızalanan bir ürünün tamir edilip, sisteme entegre edilmesinden sonra, bir sonraki arızaya kadar geçen sürelerin ortalamasını ifade etmektedir. Arızalı parçaların onarılması için harcanan süre, ortalama tamir süresi olarak ifade edilmektedir. (Alavian vd. 2020). Arızalar arasındaki ortalama zaman değeri içerisinde onarım için harcanan süre yer almamaktadır. Onarım için gereken ortalama süre içerisinde ise arızalı parçanın sistemden demonte edilmesi ve tamirden sonra tekrar sisteme montajlanma süreleri yer almaktadır.

1.2 KULLANILABİLİRLİK VE ÇEŞİTLERİ

Kullanılabilirlik, bir sistemin veya sisteme ait bir parçanın belirlenen bir zaman aralığında veya belirlenen bir periyotta, önceden belirlenmiş kullanım koşullarına uygun bir ortamda ve belirlenen periyodik bakımların yapıldığı durumlarda, kendisine tanımlanan işlevi yerine getirme yeteneğidir (Baradby,2005).

Kullanılabilirlik kavramının oluşturulma amacı, kullanılan sistemin arıza durumlarında tamir edilebileceği ve belirlenen süre içerisinde daima kullanılacağı konseptlerde, bir güvenilirlik göstergesi olarak kullanılmak ve ihtiyaç duyulan üretim, bakım onarım ve yedek parça planlarının yapılmasını sağlamaktır.

Kullanılabilirlik genel olarak üç farklı şekilde tanımlanır;

- Doğal Kullanılabilirlik
- Başarılan Kullanılabilirlik
- Operasyonel Kullanılabilirlik

1.2.1 Doğal Kullanılabilirlik

Doğal kullanılabilirlik, bir sistem veya sisteme ait parçanın, belirlenmiş kullanım koşullarında ve parçanın veya sistemin herhangi bir arıza durumunda ihtiyaç duyabileceği, bakım ekipmanlarının, yağlar ve sıvıların, özel test ekipmanlarının, bakım yapacak yetkili personelin ve bakım için gerekli yedek parçaların hazır ve herhangi bir gecikme olmadan kullanılabilmesi, durumlarda hesaplanan çalışabilme olasılığıdır (Slovaca, 2016).

$$A = \frac{\text{Arızalar Arası Ortalama Zaman}}{\text{Onarımlar Arası Ortalama Zaman} + \text{Arızalar Arası Ortalama Zaman}} \quad (1.6)$$

Doğal kullanılabilirlik arızalar arası geçen süreye ve arızaların onarılması için ihtiyaç duyulan süreler baz alınarak hesaplanmaktadır. Bu hesaplamada bakım faaliyetleri için ihtiyaç duyulan ekipman, yedek parça, sarf malzeme, personel gibi unsurlar yer almamaktadır. Doğal kullanılabilirlik, temelinde parçanın veya sistemin tasarımı ile ilgilidir. Ekipman tasarımından kaynaklanmayan bütün duruşları kullanılabilirlik hesaplamasının içerisine dahil etmemektedir (Slovaca, 2016). Bu sebeple lojistik faaliyetlerde kullanılan bir kullanılabilirlik göstergesi olmaktan çok tasarım yaklaşım ve çözümlerinde kullanılan bir kullanılabilirlik göstergesidir.

1.2.2 Başarılan Kullanılabilirlik

Başarılan kullanılabilirlik, bir sistem veya sisteme ait parçanın, belirlenmiş kullanım koşullarında ve parçanın veya sistemin herhangi bir arıza durumunda ihtiyaç duyabileceği, bakım ekipmanlarının, bakım yapacak yetkili personelin ve bakım için gerekli yedek parçaların hazır ve herhangi bir gecikme olmadan kullanılabilmesi, durumlarda hesaplanan çalışabilme olasılığıdır (Katukoori, 2005).

Başarılan kullanılabilirlik, bakım faaliyetleri arasında geçen zamana periyodik bakım ve düzeltici bakım süreleri dahildir ve ortalama aktif bakım süresi dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Başarılan kullanılabilirlik denkleminde anlaşılacağı üzere, önleyici bakım veya periyodik bakım çeşitli sebepler ile çok sık gerçekleştirilirse veya periyodik bakımların icra edilme süreleri uzun ise kullanılabilirlik üzerinde olumsuz bir etki yapmaktadır. Ekipman ömrünü uzatmak, parçaların ansızın arızalanmasının önüne geçmek için gerçekleştirilen sık yağlamalar ve kontroller kullanılabilirlik parametresini düşürmektedir.

1.2.3 Operasyonel Kullanılabilirlik

Operasyonel kullanılabilirlik, bir sistem veya sisteme ait parçanın, belirlenmiş kullanım koşullarında ve belirlenmiş kullanım şartları içerisinde ve gerçek

çevresel koşullarda hesaplanan kullanılabilirlik olasılığıdır. Başka bir ifade ile operasyonel kullanılabilirlik, gerçek ortalama ölçüdür. Kullanım esnasında oluşabilecek bütün aksaklıkları içermektedir (Katukoori, 2005).

Operasyonel kullanılabilirlik hesaplanmasında, başarılı kullanılabilirlik içerisinde yer alan bakım zamanı, lojistik faaliyet süreleri ve çeşitli sebepler ile oluşan bütün bekleme süreleri dahildir. Operasyonel kullanılabilirlik kavramı, sistemin veya sisteme ait parçanın kullanıma hazır olma kavramı ile aynıdır.

$$A = \frac{\text{Kullanılabilir Süre}}{\text{Operasyonel Süre}} \quad (1.7)$$

1.3 OLASILIK DAĞILIMLARI

Güvenilirlik analizlerinde en sık kullanılan olasılık dağılımları, normal, üstel, poisson ve weibull dağılımıdır. Tez içerisinde hata olasılık dağılımları Weibull Dağılımı ile değerlendirilecektir. Zamana bağlı hata fonksiyonu, Weibull parametreleri ile oluşturulacaktır.

1.3.1 Weibull Dağılımı

Güvenilirlik analizlerinde olasılık dağılımı olarak en çok kullanılan dağılım olarak karşımıza Weibull dağılımı çıkmaktadır. Bunun temel sebebi ise Weibull dağılımının, hata zamanlarının sabit, artan ve azalan olduğu bütün durumlarda kullanılabilir olmasıdır (Lai vd. 2006). Weibull olasılık dağılımının matematiksel ifadesi 1.8'de gösterilmektedir.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T-\delta}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{T-\delta}{\eta} \right)^{\beta}} \quad f(t) \geq 0, T \geq 0 \text{ veya } \delta, \beta > 0, \eta > 0, -\infty < \delta < \infty \quad (1.8)$$

Weibull dağılımına göre güvenilirlik fonksiyonu;

$$R(t) = e^{-\left(\frac{T-\delta}{\eta} \right)^{\beta}} \quad (1.9)$$

Weibull dağılımına göre hata oranı fonksiyonu;

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (1.10)$$

Weibull dağılımında kullanılan parametreler;

β = Şekil parametresi

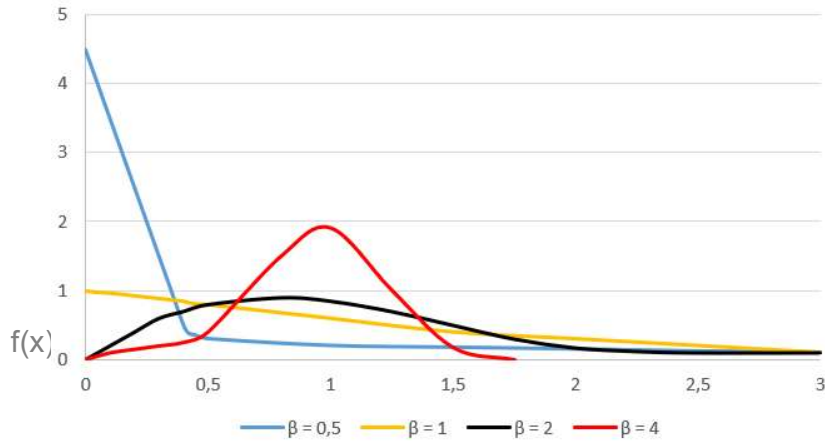
η = Ölçek parametresi

δ = Konum parametresi

$0 < \beta < 1$ aralığı için, zaman arttıkça, olasılık yoğunluğu sıfıra doğru gitmektedir. Zaman sıfıra yakınlaştıkça olasılık yoğunluğu sonsuzla gitmektedir. Bu dağılım şekli ekipmanın ilk kullanım zamanında gözlemlenen arıza yoğunluğuna benzemektedir. Bu sebeple tasarım sonrası icra edilen güvenilirlik analizleri için uygun bir model olmaktadır.

$\beta = 1$ değerinde, olasılık yoğunluğunun üstel bir şekilde azaldığını göstermektedir. Bu dağılım şekli ekipmanın olgunluk zamanındaki arıza yoğunluğu için uygun bir dağılım oluşturmaktadır.

$\beta > 1$ değeri için, yoğunluk fonksiyonu sıfırdan başlamakta ve artmaktadır. Zaman arttıkça yoğunluk fonksiyonu sıfıra doğru gitmektedir. Bu dağılım, ekipmanın yaşlanmaya başladığı son döneminde sahip olduğu arıza dağılımlarına benzemektedir.



Karakteristik Ömür

Şekil 4: Weibull Olasılık Eğrileri

1.3.2 Arıza Verileri – Reliasoft Değerlendirmesi

Güvenilirlik çalışmalarında parçaların ömürlerinin ve karakteristik özelliklerinin belirlenmesinde birçok parametre kullanılmaktadır. Hazır olarak tedarik edilen bir parça ise üreticiden alınan parçaya ait bilgiler, tasarlanan bir parça ise tasarım bilgileri, üretim şekli ve üretiminde kullanılan teknikler, HMEA çıktıları, hızlandırılmış ömür testleri parçanın ömrünü tahmin etmek için kullanılan parametrelerdir. Ancak bu parametrelerden en kritik olanı, sahip olunan saha verileridir. Sahadan alınan arıza verileri, araçlarda meydana gelen arızaların kayıt altına alınması ile oluştuğundan, tahmine ve ön görüye dayanmayan gerçek bilgilerdir.

Sahadan alınan arıza kayıtlarını, güvenilirlik merkezli bakımlarda kullanmak, arıza kayıtlarının dağılımları incelenerek gelecek dönem muhtemel arıza ön görülerinde bulunmak daha gerçekçi ön görüler sunmaktadır. Sahadan alınan arıza kayıtlarının dağılımları, detaylı analiz edilerek, mevcut arıza dağılımları bilinen olasılık dağılımlarına benzetilebilir. Saha arıza kayıtlarının, olasılık dağılımlarına benzetilmesi ile birlikte zamana bağlı hata oranı fonksiyonu hesaplanabilmektedir. Hata oranı fonksiyonu ile birlikte de istenilen bir an için ön görülen arıza miktarları ön görülebilmektedir. Tablo 1'de yer alan veriler çalışma içerisinde yer alan zırhlı aracın bir alt parçası olan nozullu pervanenin ve evaporatörün saha verilerinden alınmış arıza kayıtları gösterilmektedir. Belirtilen veriler, 2014 – 2022 yılları arasında Malezya ordusu tarafından kullanılan 8x8 Zırhlı Askeri araçlardan ve ilgili parçaların üreticilerden alınmış, hızlandırılmış ömür testlerinden elde edilmiştir.

Nozullü Pervane		
Araç	Arıza Durumu	Arıza Saati
1	F	541
1	S	1114
2	F	485
2	F	1035
2	S	1499
3	S	1358
4	S	1756
5	S	2047
6	S	1800
7	S	1987
8	S	2108

Evaporatör		
Araç	Arıza Durumu	Arıza Saati
1	F	6542
1	F	4561
1	S	6850
2	S	9012
3	F	1561
3	S	10110
4	S	9519
5	S	14511
6	F	10742
6	S	2300
7	S	12981
8	S	7486
9	S	11000
10	F	2863
11	S	13546
12	S	14002
13	S	13648
14	S	14253

Tablo 1: Saha Arıza Verileri

Tablo 1’de nozullu pervane için sahada bulunan 8 adet parçanın arıza kayıtları yer almaktadır. Bir numaralı araç 541. saatte ilk pervane arızasını vermiş daha sonrasında pervane onarım işlemi görüp tekrar araca entegre edilmiş ve 1114 saat sonra tekrar kontrol edilmiş ve arızasız devam ettiği gözlemlenmiştir. Üç numaralı araçta bulunan parça ise 1358. saatinde kontrol edilmiş ve arızasız bir şekilde çalışmasını sürdürdüğü kaydedilmiştir.. Benzer durumlar evaporatör içinde geçerlidir. Evaporatör kapsamında 14 araçtan arıza verisi alınmıştır.

Sahadan alınan arıza verilerinin değerlendirilmesi, bu çalışma kapsamında Reliasoft yazılımı aracılığı ve hata oranı fonksiyonu ile gerçekleştirilecektir. Reliasoft yazılımı güvenilirlik analizlerinin gerçekleştirilmesi ve hata oranı, güvenilirlik fonksiyonu ve zamana bağlı olasılık grafiklerinin oluşturulması için geliştirilmiş bir yazılımdır. Sahadan elde edilen arıza verileri Reliasoft yazılımı ile iki parametrelili Weibull olasılık dağılımı ile değerlendirildiğinde β ve η parametreleri Şekil-5’de ki gibi hesaplanmaktadır.

Number in State	State F or S	State End Time (hr)	Subset ID 1
1	F	541	1
2	S	1114	1
3	F	485	2
4	F	1035	2
5	S	1499	2
6	S	1358	3
7	S	1756	4
8	S	2047	5
9	S	1800	6
10	S	1987	7
11	S	2108	8

The right panel shows the following analysis settings and summary:

- Distribution:** 2P-Weibull
- Analysis Settings:** MLE, SRM, FM, MED
- Analysis Summary:**
 - Parameters: Beta = 1,121383; Eta (hr) = 4600,893418
 - Other: LK Value = -28,672338
 - Failures/Suspensions: F/S = 3/8

Şekil 5: Reliasoft – Weibull Değişkenleri -1

Saha verilerinin Reliasoft – Weibull olasılık dağılımı ile analiz edilmesi ile birlikte β değeri 1,1 ve η değeri ise 4600 olarak karşımıza çıkmaktadır. Aynı yöntemi evaporatör için gerçekleştirdiğimizde ise β değeri 1,1 ve η değeri 29702 olarak hesaplanmaktadır.

Number in State	State F or S	State End Time (hr)	Subset ID 1
1	F	6542	1
2	F	4561	1
3	S	6850	1
4	S	9012	2
5	F	1561	3
6	S	10110	3
7	S	9519	4
8	S	14511	5
9	F	10742	6
10	S	2300	6
11	S	12981	7
12	S	7486	8
13	S	11000	9
14	F	2863	10
15	S	13546	10
16	S	14002	11
17	S	13648	12
18	S	14253	13

The right panel shows the following analysis settings and summary:

- Distribution:** 2P-Weibull
- Analysis Settings:** MLE, SRM, FM, MED
- Analysis Summary:**
 - Parameters: Beta = 1,103973; Eta (hr) = 29702,953434
 - Other: LK Value = -57,007834
 - Failures/Suspensions: F/S = 5/13

Şekil 6: Reliasoft – Weibull Değişkenleri -2

β ve η değerlerini Weibull dağılımına göre belirlenen hata oranı fonksiyonunda değerlendirildiğinde nozullu pervane ve evaporatör için hata oranı fonksiyonları bulunmuş olmaktadır. İki parametrelili Weibull dağılımının kullanılması sebebiyle δ parametresi 0 olacak şekilde varsayılmıştır.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T-\delta}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (1.11)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{1,1}{4600} \left(\frac{T-0}{4600} \right)^{1,1-1}$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = 0,00023913 \left(\frac{T}{4600} \right)^{0,1}$$

İfadesi ile nozullu pervane için hata oranı fonksiyonu hesaplanmış olmaktadır. T yerine istenilen zaman yazılarak herhangi bir zaman diliminde nozullu pervanenin ne kadar arıza yaşayacağı ön görülmektedir. Benzer şekilde evaporatör için hata oranı fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = 0,00003704 \left(\frac{T}{29702} \right)^{0,1}$$

1.4 GÜVENİRLİK MERKEZLİ BAKIM

Günümüz askeri sistemlerinde yer alan zırhlı araçlar gerek donanımsal olarak gerekse yazılımsal olarak geliştirilen birçok parçanın birbirlerine entegre edilmesi ile oluşmaktadır. Bu alt parçalar ait oldukları sistemlere göre birbirleri ile haberleşirler veya kendilerinin fonksiyonlarını yerine getirebilmeleri için diğer sistemler üzerinde gerekli arayüzlere sahip olmaktadır. Örnek olarak güç grubu içinde yer alan motor ve transmisyon sahip oldukları elektronik kontrol üniteleri ile sürücü bölmesi kontrol paneli ile haberleşmektedir. Diğer bir örnek ise transmisyondan çıkan dönme hareketi, palete ve yol tekerine transmisyon çıkışıından cer dişlisine bağlanan bir mil ile aktarılmaktadır. Zırhlı araçlarda yer alan ana sistemler Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2' de gösterilen üst kompleler olarak belirtilen ana sistemlerin altında ise aracın belirlenen görevleri yerine getirmesi için gerekli alt sistemler yer almaktadır. Alt sistemler Tablo 2'de gösterilmektedir.

Hareket Sistemleri	Yapısal Sistemler	Beka Sistemleri	Yardımcı Sistemler	Haberleşme Sistemleri	Kullanıcı Arayüz Sistemleri	Silah Sistemleri
<ul style="list-style-type: none"> Güç Grubu Sisemi Güç Aktarma Sistemi Süspansiyon Sistemi Direksiyon Sistemi Soğutma Sistemi Yakıt Sistemi Egzoz Sistemi Hava Filtresi Sistemi Fan Sistemi Motor Suyu Isıtma Sistemi 	<ul style="list-style-type: none"> Kayanklı Gövde Sistemi Sürücü ve Komutan Kapağı Sistemi Bakım Kapakları Sistemi Mürettebat Kapağı Sistemi Basamak - Tutamak Sistemi Çeki Kancaları Sistemi Mazgal Sistemi Zemin Plakaları Sistemi Hacim Kutuları Sistemi Yardımcı Güç Grubu Bakım Kapakları Sistemi Mühimmat İstif Sistemi 	<ul style="list-style-type: none"> Zırh Sistemi Parçacık Kalkanı Sistemi Palet Etek Sistemi Radyo Aktif Koruma Sistemi Sis Havanları Sistemi Yangın Söndürme Sistemi Su Tahliye Sistemi 	<ul style="list-style-type: none"> Hidrolik Sistem Suda Hareket Sistemi Dalga Kıran Sistemi Yüzme Kiti Sistemi Güç Grubu Yardımcı Sistemleri 	<ul style="list-style-type: none"> Elektrik - Elektronik Sistem Kablaj Sistemleri Telsiz Sistemi İç Haberleşme Sistemi Konum Belirleme Sistemi 	<ul style="list-style-type: none"> Markalama Sistemi Kontrol Paneli Sistemi İstifleme Sistemi Periskop ve Ayna Sistemi Direksiyon Konsolu Sistemi Video Yönetim Sisitemi Gaz ve Fren Pedal Sistemi Aydınlatma Sistemi Koltuk Sitemleri Kumanda Kolları Sistemi Havanlandırma Sistemi Personel Isıtıcı Sistemi 	<ul style="list-style-type: none"> Nişancı Konsolu Sistemi Kule Araç İçi Kablolama Sistemi Kule Araç İçin Montaj Yerleri

Tablo 2: Zırhlı Askeri Araç Alt Sistemleri

Lojistik destek hizmetleri kapsamında yönetilen güvenilirlik merkezli bakım çalışmalarının sonucunda zırhlı araçta yer alan sistemler analiz edilmekte ve arıza oranları tahmin edilmektedir. Arıza sayılarının tahmin edilmesi ile birlikte belirlenen süre boyunca zırhlı araçların kullanılabilirliklerinin sağlanması için yedek parça stoklanması yapılmaktadır.

Güvenilirlik merkezli bakım yapılabirlik çalışmaları kapsamında araçta yer alan bütün parçalar tek tek değerlendirilmemektedir. Ortalama olarak zırhlı araçların servis bomları kapsamında dört bin ile yedi bin alt parça yer almaktadır. Bu kadar yüksek sayıdaki parçayı tek tek değerlendirmek ve HMEA çalışmalarında yer vermek maliyet etkin bir yöntem değildir. Bu sebeple güvenilirlik merkezli bakım esnasında S3000-L standartında yer alan "candidate classification" yöntemi kullanılabilir. Bu yöntem parçalara belirli soruları sormakta ve bu sorulardan bir tanesinin bile cevabı evet ise o parçanın güvenilirlik merkezli

bakımlar kapsamında yer alması ve değerlendirilmesi gerektiğini söylemektedir. S3000-L standartında belirlenen sorular aşağıdaki gibidir;

Güvenilirlik Merkezli Bakım Kapsamında Parça Seçim Kriterleri;

- Parça yeni bir tasarım mı?
- Parça büyük bir oranda revize edilmiş bir parça mı?
- Parça tamir edilebilir mi?
- Parça düşük güvenilirliğe sahip mi?
- Parça bakım konsepti içerisinde değerlendirilecek midir?
- Parçanın yağlama gereksinimi var mıdır?
- Parçanın kalibrasyon gereksinimi var mıdır?
- Parçanın arızalar arası ortalama değeri yüksek midir?
- Parça bakım onarımı kompleks midir?
- Parça onarımı için özel bir ekipman gereksinimi var mıdır?
- Parça onarımı için standart olmayan bir yöntem gerekli midir?
- Parçanın belirli bir periyodik bakım görevi var mıdır?

Bu çalışmada ele alınan zırlı paletli araç Tablo 2’de belirtilen alt sistemlerden oluşmaktadır. Servis bomunda yaklaşık olarak altı bin parça yer almaktadır. Altı bin parçanın güvenilirlik merkezli bakımlarında değerlendirilmesinden önce S3000-L kapsamında belirtilen sorular sorulmuş ve parçaların güvenilirlik merkezli bakım kapsamında değerlendirilebilmesi için sınıflandırılma işlemi gerçekleştirilmiştir. Servis bomda yer alan parçaya bu sorular sorulmadan önce servis bom da yer alan bazı parçalar sınıflandırılarak, çalışma kapsamında güvenilirlik merkezli bakım listesinden çıkartılmıştır. Bu parçalar;

- Cıvata- Pul
- Rondela – Yaylı Rondela -Yay Çeşitleri
- Taşıyıcı Braket- Gromet
- Vida- Somun
- Conta- Keçe
- Hortum
- Montaj Parçaları

Servis bomunda yer alan parçaların büyük bir bölümünü yukarıda yer alan parçalar kaplamaktadır. Standart olan bu parçaların çıkartılmasından sonra kalan

parçalara S3000-L standartında belirtilen sorular sorulmuştur. Bu sorulara ek olarak parçanın tedariki ile ilgili yaşanabilecek problemleri gösteren lisans durumu ile ilgili bir madde eklenmiştir. Genellikle ülkeler arasında yaşanan siyasal sebeplerden dolayı bazı durumlarda ülkeler arasında askeri sistemlerde son kullanıcı bilgisi talep edilmektedir. Satıcı ülke, parçanın son kullanıcısının kendi belirlediği bazı kullanıcılar olmasını istememektedir. Bu durumda, eğer sahip olunan araç, satıcı ülkenin belirlediği son kullanıcılar arasına ilerleyen süreçte girmiş ise ihtiyaç halinde yedek parça, eğitim ve tamir gibi faaliyetleri üreticiden talep edilmemektedir. Talep edilse bile üretici tarafında bir karşılığı olmamaktadır. Bu sebeple bu çalışmada güvenilirlik merkezli bakım parçaları belirlenirken, değerlendirme kriterleri arasına lisans maddesi eklenmiştir. Ek olarak maliyet ve tedarik unsurları da bu çalışma içerisine eklenmiştir. Çalışma içerisinde değerlendirmeye 50 adet parça girebilmiştir. Değerlendirmeye alınan 50 adet RCM parçaların bir kısmı Tablo 3'de belirtilmiştir.

Tablo 3' de yer alan maliyet değerlendirmesi kapsamında ele alınan minimum tutar yüz euro olarak belirlenmiştir. Yüz Euro ve üzerinde satın alma maliyeti olan parçalar güvenilirlik merkezli bakım kapsamında ele alınmıştır. Tedarik süresi kapsamında ise otuz gün ve üzerinde tedarik edilebilen parçalar benzer kapsamda değerlendirilmeye alınmıştır. Diğer hususlar ise istenilen gereklilik var, yok şeklinde değerlendirilmiştir.

Bu çalışma içerisinde güvenilirlik merkezli bakım kapsamında belirlenen parçaların yedek belirleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Güvenilirlik merkezli bakım çalışması kapsamında değerlendirilecek toplamda elli adet parça yer almaktadır. Belirlenen elli adet parça için saha verileri kontrol edilmiş ve hata dağılımlarına uygun olarak zamana bağlı hata denklemi ve yedek parça envanter yönetimi için matematiksel model oluşturulmuştur

Parça	Tedarik	Maliyet	Lisans	P.B.	Tasarım	Güvenilirlik	MTTR	Ö.Yetkinlik	STTE	Kalb.	Yağlama	Std. Dışı Tamir	Aşınan
MOTOR	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-
KAYIŞ GERGİ	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+
THERMOSTAT	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
EKM	+	+	+	-	+	-	-	-	-	+	-	+	-
TURBOŞARJ	+	-	+	-	-	+	+	-	+	-	-	-	-
SU POMPASI	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SANZIMAN	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-
EGZOZ SUSTURUCU	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
FAN	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
HIDROMOTOR	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ALTERNATOR	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	-
REGULATOR	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NOZULLU PERVANE	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
PERISKOP	-	+	+	+	+	-	-	-	+	-	-	-	-

Tablo 3: Güvenirlik Merkezli Bakım Parçaları

1.5 TANIMLAR

Bu başlık içerisinde bu çalışma içerisinde yer alan terimlerin, ifadelerin tanımları ve açıklamaları yer almaktadır.

1.5.1 Arıza

Sistemin veya bir parçanın fonksiyonelliğini yerine tamamen ve kısmen yerine getirememesidir.

1.5.2 Bakım

Sistem veya parçalar kullanıldıkça tanımlı fonksiyonelliklerini yerine getirememeye başlarlar ve bir süre sonra bütün fonksiyonelliklerini yitirirler. Sistem veya parçanın fonksiyon kaybını yaşamaması için gerçekleştirilen faaliyetlere bakım denir. Bakımlar uygulama zamanına göre ve amacına göre çeşitlenmektedirler. Bu çalışmada ele alınan bakımlar, düzeltici bakım, önleyici bakım ve onarımdır.

1.5.3 Düzeltici Bakım

Düzeltici bakımlar parça veya sistem arızalandığı an belirli kurallar ve yaklaşımlar ile gerçekleştirilen bakımlardır. Düzeltici bakım faaliyetinin gerektiği durumda parçada fonksiyon kaybı yaşanmış ve kullanılabilirlikte bir kayıp olmaktadır (Bahrick&Hall, 1991).

1.5.4 Önleyici – Koruyucu Bakım

Sistemin veya parçanın sahip olduğu, belirli bir plan (zaman, kilometre, çalışma saati) dahilinde icra edilen bakımlardır (Bahrick&Hall, 1991). Önleyici – koruyucu bakım faaliyetinin gerçekleşmesi için fonksiyon kaybının yaşanması gerekmemektedir. Önleyici – koruyucu bakımın icrasında, ekipman kullanımı duracaktır ve kullanılabilirlik kaybı yaşanacaktır. Ancak bu bakım belirli bir plan dahilinde gerçekleştiği için, daha önceden belirlen çalışma profili içerisinde önleyici – koruyucu bakımdan kaynaklı süreler yer almaktadır.

1.5.5 Onarım

Sistemin fonksiyon kaybetmesinden sonra (arızalanmasından sonra) gerçekleştirilen yetenek kazandırma işlemidir.

1.5.6 Onarım Kolaylığı

Sistem veya parçanın arızalandığı durumlarda onarım işleminin kolay bir şekilde yapılmasıdır. Aynı zamanda askeri sistemlerde arızalanan parçanın ait olduğu sistemden kolay bir şekilde sökülüp takılması da onarım kolaylığı olarak değerlendirilmektedir. Onarım kolaylığında ki en önemli hususlar, onarımın gerçekleşmesi için ihtiyaç duyulan sürenin kısa olması, onarım için özel bir ekipman gerekmemesi ve onarımın standart dışı yöntemler ile gerçekleştirilmemesidir.

1.5.7 Güvenilirlik Merkezli Bakım

Güvenilirlik Merkezli Bakım (RCM), Bir sistemin en az maliyetle belirlenen standartta ve belirlenen çevre koşullarında, fonksiyonelliğini yerine getirmesidir (Choi ve Suh 2020). RCM kapsamında, arıza analiz yaklaşımları gerçekleştirilerek, sistemin fonksiyonelliğini engelleyecek arızalar tahmin edilmektedir. Arıza yoğunluğunun tahmin edilmesi ile, arızaları ve arıza kaynaklı duruşları en aza indirecek bakım konsepti oluşturulmaktadır. RCM konseptinin temel adımları şu şekildedir;

- Sistemin tanımlanması
- Sistem kullanım koşullarının ve performans kriterlerinin belirlenmesi
- Sistemin tabi olduğu standartlarının belirlenmesi
- RCM kapsamında değerlendirilecek sisteme ait alt parçaların belirlenmesi
- Arıza çeşitlerinin ve modlarının belirlenmesi
- Arıza etki ve sonuçlarının ön görülmesi
- Bakım Kademe Yetki Çizelgesinin oluşturulması
- Arıza öngörülerinin gerçekleştirilmesi ve yedek parça önerisinde bulunulması
- Bakım periyotlarının belirlenmesi

1.5.8 Ortalama Tamir Süresi

Ortalama tamir süresi, arızalanın parçanın onarılması için harcanan süredir. Tamir edilemeyen bir parça olarak ele alınmak istediğinde ise ait olduğu sistemden demonte edilip, yenisinin sisteme takılması için geçen süredir (Guo ve Chen, 2013).

1.5.9 Arızalar Arası Ortalama Zaman

Arızalar arası ortalama zaman, sistemin veya parçanın arızaları arasındaki sürenin ortalamasıdır (Krasich, 2009). Bu değerin doğrusal kabul edildiği durumlarda bir sonraki arızanın ne zaman oluşacağı tahmin edilebilir. Bu değerinin içerisinde, onarım için gereken zaman, iki arıza arasında gereken periyodik bakım süreleri ve bakım faaliyetleri için gereken lojistik zaman dahil değildir.

1.5.10 Arızaya Kadar Geçen Sürelerin Ortalaması

İki arıza arasında geçen sürelerin ortalamasıdır (Asha&Unnikrishnan, 2010). Tamir edilemeyen parçalar için kullanılan bir terimdir.

1.5.11 Özel Takım ve Test Ekipmanları

Sistemin veya parçanın arızalanması durumunda sahip olduğu arızayı gidermek için ihtiyaç duyulan özel olarak tasarlanmış ve üretilmiş ekipmanlardır. Benzer şekilde tamir edilen ekipmanların test edilmesi, kalibre edilmesi için tasarlanmış ve üretilmiş özel ekipmanlardır.

1.5.12 Kademe Yetki Çizelgesi

Güvenilirlik Merkezli Bakım Kapsamında oluşturulan periyodik ve önleyici bakımların hangi kademelerde, kimler tarafından ve hangi sıklıkta yapılacağını gösterildiği dokümandır (Basten vd. 2012). KYÇ üretilen sistemin kullanılacağı ordu yapılanmasına göre değişiklik göstermektedir.

1.5.13 Hata Modu Etki Analizi

Hata modu etkileri analizi, sistemde meydana gelebilecek hataların erken safhalarda belirlenmesi ve gerekli önlemlerin – tasarım değişikliklerinin yapılmasını sağlayan kalite geliştirme sürecidir (Sharma&Srivastava, 2018). HMEA analizlerinde parçanın sahip olduğu zayıflıklar üzerinde durulur. Parçanın sahip olduğu hatalar incelenir ve bu hataların olası etkileri ve sıklığı tanımlanmaktadır. HMEA çalışmaları, tasarım HMEA ve proses HMEA olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Tasarım HMEA'nın sistemin ömür devri boyunca etki yaptığı en önemli çıktısı, potansiyel hataların ve bu hatalara karşı alınması gereken önlem ve bakımları belirlemesidir. Buna ek olarak Risk Öncelik Sayısı (RÖK) hesaplayarak hata türleri arasında bir sıralama yapmasıdır. Risk öncelik sayısı, parçaya ait hata türünün oluşma olasılık değeri, hatanın keşfedilme – bulunabilme değeri ve hatanın etkisinin sayısal değerinin çarpımı ile hesaplanmaktadır. RÖK değerinin aralıkları sabit olmamakla birlikte genellikle RÖK değerinin yüzden büyük olduğu durumlarda en kısa sürede önlem alınması gerekmektedir.

1.5.14 Servis Malzeme Listesi

İngilizce olarak “Service – Bill of Material” (S-BOM) olarak ifade edilmektedir. BOM ifadesi bir ürünü oluşturmak için gerekli bütün alt parçaların adetlerini, montaj sıralamasını ve parça hiyerarşisini içeren alt parça listesidir. S-bom ifadesi ise “service -bom” ifadesinin kısa yazılışdır. Belirlenen kademe yetkisine göre belirlenen kademe hangi bakım işlemleri yapılacaksa sadece o kademeye ait parçaların olduğu listeye ise s-bom denilmektedir.

1.6 LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde, araştırmacıların savunma sanayii, uçak sanayi ve bu sanayi kolları için üretim gerçekleştiren OEM' lerin, envanter yönetimi, yedek parça ve tamir edilebilen parça yönetimleri hakkında bilgi vermek amaçlanmıştır. Literatür çalışması Google Scholar üzerinden gerçekleştirilmiştir. Araştırma yapılırken, “inventory managment at defense industry” ve “spare part forecasting at defense industry” anahtar kelimeleri kullanılmıştır. Literatür taramalarında aynı

zamanda “availability” anahtar kelimesi de kullanılmıştır. Araştırma sonucu ulaşılan sonuçlardan bu çalışmada ele alınan problem ile ilişkisi olan makaleler incelenmiştir. İlerleyen bölümde incelene 17 akademik makaleye ait değerlendirmeler sunulacaktır.

Yedek parça öngörüsünde bulunma ve envanter yönetimi ile ilgili birçok çalışma gerçekleştirilmiş ve modeller ortaya konmuştur. Ancak konu savunma sanayi özelinde ele alındığında çalışma sayısı göreceli olarak azalmaktadır. Çalışma sayısının azalmasındaki temel sebepler; askeri veri tabanına ulaşma zorluğu, benzer şekilde tarihsel kayıtlara erişim problemleri, askeri sistemlerde yer alan dünya ordularına göre değişen 3'lü,4'lü ve 5'li bakım kademeleri, güvenlik gerekçeleri ile gerçek uygulamalarda bazı mühendislik hesaplamalarının (güvenilirlik verileri, üretici hata analiz çalışmaları vb.) göz ardı edilmesidir. Birinci Dünya Savaşı ve daha sonrasında İkinci Dünya Savaşında yaşanan lojistik problemlerinden dolayı, askeri sistemlerin envanter yönetiminde, ikmal bakış açılarının da değişiklik olması gerektiği gerçeği ortaya çıkmış ve bu konuda yapılan çalışmalara başlanmıştır. Gizlilik ve tarihi verilere erişim gibi problemler nedeniyle bu alanda çalışmalar çok fazla hız kazanmamıştır. Ticari alanda yapılan çalışmalar savunma sanayi ilgililerince askeri bakım kademe sistemlerine ve envanter yönetimine entegre edilmiştir.

Savunma Sanayi güvenlik unsurunun ana parça olması sebebiyle ve lojistik, bakım faaliyetlerinin oldukça yüksek bütçelere sahip olması ile envanter yönetiminde ve bakım yedeklerinde maksimize olma yönünde bir gelişim göstermiştir. Zaman içinde askeri sistemlerde yer alan araç çeşitlerinin fazlalaşması, bakım için ihtiyaç duyulacak yedek parça sayılarının devasa rakamlara ulaşması ile envanter yönetimi daha şiddetli dikkate alınmış ve uygulamaları lojistik alanlarda kullanılmaya başlanmıştır.

Askeri sistemler de envanter yönetimi iki temel parametre üzerinde ilerlemektedir. Birinci parametre ele alınan parçanın tamir edilebilen bir sistem olduğudur ve arızalanmasının ardından atölyede tamir edilip tekrar kullanılmasıdır. İkinci parametre ise doğrudan yedek parça olan sistemlerdir. Yedek parça ile ifade

edilen sistemler arızalandığı zaman tamir edilemezler, doğrudan hurdalanırlar ve yerlerine yenisi gönderilir. Walker (1997) gerçekleştirdiği çalışmada envanter yönetimi arızalı parçaların tamir edilme yeteneği göz ardı edilerek, sadece doğrudan yedek tutma üzerine gerçekleşmiştir. Bu çalışmada bir OEM'in üretim hattındaki makinada meydana gelen duruşları azaltmak için kullanılacak yedek parçaları minimum tutma hedeflenmiştir.

Güvenlik unsurlarının değişmesi, savaş ve tehdit yöntemlerine Hibrid savaşın eklenmesi, cephe muharebelerinin neredeyse kalmaması ve sivil unsurların çok kolay bir şekilde hedef olmaları sebebiyle, kullanılabilirlik kavramı oldukça önem kazanmıştır. Savunma ve askeri sistemlerde muharebeye hazır olma veya kullanıma hazır olma kavramı günümüz dünyasında lojistik faaliyetlerinin bir numaralı önceliğidir. Oldukça yüksek bütçelerle oluşturulan araç filolarının ihtiyaç anında kullanımı otoriteler tarafından talep edilmektedir. Bu kapsamda periyodik bakımlardan kaynaklı duruşlar genellikle kullanılabilirlik kavramı dışında tutulurken, önleyici bakım süreleri, yedek parça tedarik süreleri kullanılabilirlik kavramını doğrudan azaltan yönde etki yapmaktadır. Al-Momani (2020) gerçekleştirdiği çalışmada, envanter yönetimine kullanılabilirlik kısıtını eklemiştir. Bu çalışmada askeri hava savunma sisteminde yer alan askeri savaş uçaklarına ait parçaların envanter yönetimi ve stok tahmini ele alınmıştır. Yedek parça ön görüşünde bulunurken, ilk talep ile son talep arasındaki gün sayısını sipariş edilen parça sayısına oranlayarak parçaların kullanım oranlarını tahmin etmiş ve ortalama tedarik sürelerini kullanarak bir yedek parça öngörüsünde bulunmuştur.

Lee ve Kim (2018) çalışmalarında zamana bağlı yedek parça tahminlerini veri madenciliği yöntemleri ile geliştirmişlerdir. Çalışmaları için ihtiyaç duyulan verileri Güney Kore Ulusal Savunma Bakanlığı'ndan almışlardır. Geçmiş beş senenin savaş uçak yedek parça verilerini karar ağacı, vektör regresyonu ve multinominal navie bayes yöntemleri ile sınıflandırmıştır. Güney Kore Ulusan Savunma Bakanlığı'ndan elde ettikleri arıza kayıtları ile arızalar arası ortalama zamanı hesaplamışlar ve bu veriye dayanarak muhtemel arıza zamanları tahmin etmişlerdir. Çalışmalarında arızalı parçaların tamirlerine yer vermedikleri için, bilinen arıza zamanları için ihtiyaç duyulan parçaları stoklayan envanter

yönetimini geliştirmişlerdir. Benzer bir çalışmayı Rezaei vd. (2018) bir uçak filosu için gerçekleştirmişlerdir. Yedek parça talep durumunu veya arıza durumunu p-değeri yöntemi ile belirlemiştir. Temin süresi ve talep ilişkilendirilmesi ve tamir durumunun yer almadığı yedek parça stok maliyetini minimize eden bir matematiksel model gerçekleştirmişlerdir.

Yedek parça envanter yönetimi kapsamında ele alınan diğer bir çalışma, Tian vd. (2021)'dir. Bu çalışmada gelecekte ihtiyaç duyulabilecek veya arızalanabilecek parçalar Markov Kombine Modeli ile değerlendirilmiştir. Modelin kullanılabilmesi için envanter yaklaşımı, envanter var-yok, talep var-yok olarak ele alınmış ve bu sayede model için ihtiyaç duyulan ikiye iki bir matris oluşturulmuştur. Çalışma içerisinde Markov Model'i ile ele alınan envanter yönetimi, SES, CR ve SBA yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında tamir edilebilen parçaların envanter yönetimindeki etkisi dikkate alınmamıştır.

Envanter yönetiminde karşılaşılan en büyük zorluk yedek parça ihtiyaç zamanlarının belirlenmesidir. Diğer bir ifade ile arızaların ne zaman oluşacağını tahmin edilmesidir. Arıza zamanlarının tahmin edilmesi için güvenilirlik kapsamında kullanılan birçok yöntem vardır. Bunlardan en güvenilirli saha-gerçek verilerdir. Bir filo kapsamında sahadan ve aktif olarak kullanılan araçlardan alınan arıza kayıtları, gelecek arızaları tahmin etmek için kullanılmaktadır. Sahadan alınan arıza zamanları ile arızalar arası ortalama zaman değeri hesaplanabilir. Bu değer ile gelecek dönem arızaların ne zaman gerçekleşeceği tahmin edilebilir ancak bu yöntem ile arıza zamanlarını ön görmek doğrusal bir yaklaşım olmaktadır ve hata payı içermektedir. Ortalama bir zaman aralığı envanter yönetiminde gereğinden fazla yedek parça tutma ihtimalini arttırmaktadır. Goshorn vd. (2010) gerçekleştirdikleri çalışmada sahadan arıza/durma verilerini belirli periyotlar ile toplayıp arızalar arası ortalama zaman değerini hesaplamışlardır. Arızaları parçaların onarım durumlarının ele alınmadığı bu çalışmada doğrusal olarak bir sonraki duruşun ne zaman gerçekleşeceğini tahmin edip, duruşun en kısa sürede giderilmesi için yedek parça envanter adetlerini belirlemişlerdir. Bu çalışma içerisinde doğrusal bir dağılımın, doğruluk değeri yüksek bir yedek parça envanter yönetimi sağlamayacağı belirtilmiş ve

arıza değerlerini Poisson dağılımı ile de değerlendirmişlerdir. Bu sayede zamana bağlı bir arıza fonksiyonu geliştirmişler ve doğrusal dağılıma alternatif sunmuşlardır.

Yang ve Niu (2009) gerçekleştirdiği çalışmada arıza zamanlarını öngerebilmek için arızaya kadar geçen ortalama süreyi kullanmıştır. Onarılamaz parçaların kullanıldığı bir çevrede gerçekleşen bu çalışmada arızaya kadar geçen ortalama süre değeri ile parçanın bozulma zamanını ve yedek parça ihtiyaç zamanını belirlemiş olmaktadır. Bu makalede problemi daha detaylı ele almak için Pareto yöntemi ve ABC analizi de kullanılmıştır. ABC analizi ile parçalarını sınıflandırarak A kategorisinde yer alan parçaları B ve C kategorilerine göre daha kritik olarak belirlemiştir. Parçaların kritikliğini belirlerken ise parçaların sebep olabilecekleri arızaları dikkate almıştır. Eğer parçanın hatası sistemde kritik bir arızaya neden oluyor ise bu parçayı A kategorisine dahil etmiştir. Ancak parçanın arızası sistemde konfor kaybına sebep oluyor ise C kategorisine dahil etmiştir. Parça kategorizasyonuna temin süresi, parçanın standart bir ekipman mı yoksa özel bir ekipman mı olma durumlarını da dahil etmiştir. Pareto yöntemi ile de envanter maliyetinin yüzde sekseninin A kategorisindeki parçalardan geldiği varsayımında bulunarak matematiksel bir yedek parça envanter yönetim modeli geliştirmiştir.

Arıza dağılımlarının belirlenmesi ve zamana bağlı arıza fonksiyonu kullanımı yedek parça envanter yönetimi için oldukça önem ihtiva etmektedir. Saha verilerinden ve eski arıza kayıtlarından alınan veriler ile güvenilirlik yaklaşımları kullanılarak zaman bağlı arıza oranı fonksiyonu yaratılabilir. Arızaların dağılımına göre bu fonksiyonlar Poisson, Üstel, Weibull dağılımı gösterebilirler. Eaves ve Kingsman (2004) makalesinde oldukça fazla yedek parça ihtiyacının yer aldığı bir askeri hava kuvvetleri filosunu ele almıştır. Arıza zamanlarını dikkate alarak gerçekleştirilen hata dağılımı üstel olarak belirlenmiştir. Zamana bağlı hata oran fonksiyonu üstel artacak şekilde oluşturulmuştur. Hata oran fonksiyonunun oluşturulması ile gelecek dönemlerde alt sistemlerin ne zaman arızalanabilecekleri ön görülebilir olmuştur. Bu alışma içerisinde arızalanan parçalar arızalanma sıklığına göre diğer bir ifade ile talebe göre kategorilere

ayrılmıştır. Talepler, aralıklı talep, yavaş talep ve sık talep olmak üzere üç farklı kategoride değerlendirilmiştir. Bu çalışma içerisinde de arızalı parçaların tamir edilmesinin envanter yönetiminde ki etkisi dikkate alınmamıştır.

Vaez vd. (2018) gerçekleştirdikleri çalışmada, arızaları-talepleri zamana bağlı bir fonksiyon olarak oluşturmuştur. Zamana bağlı arıza fonksiyonu, Binom Dağılım, Poisson Dağılımı, Negatif Binom, Üstel, Normal, Weibul dağılımları ile ayrı ayrı oluşturulmuştur. Arıza oranı fonksiyonları ile belirlenen zaman içerisinde gerçekleşen arıza adetlerini hesaplamış ve bütün dağılım sonuçlarını karşılaştırmıştır. Yedek parça, talep karşılama optimizasyonu için oluşturdukları modeli Greedy Algoritması ile şekillendirmişlerdir.

Güvenilirlik çalışmaları ve bu çalışmaların çıktılarının tasarımlarda kullanılması 1940'lı yıllardan itibaren hız kazanmıştır. Bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmalardan biri Hata Türleri ve Etkileri Analizi'dir. Yedek parça envanter yönetimi tasarım aşamasından başlanarak ele alındığında HMEA çıktıkları verimli bir şekilde kullanılabilir. Alt sistemlerde meydana gelebilecek arızalar, HMEA çalışmalarında belirlenebilir. Quian vd. (2017) çalışmasında alt sistemler özelinde gerçekleştirilen HMEA çıktıları ile zamana bağlı hata oranı fonksiyonu hesaplamıştır. HMEA çıktısı olan Risk Öncelik Numarası (RPN) hesaplanmasında kullanılan, şiddet (severity), hatanın gerçekleşme ihtimali (Occurrence) ve hatanın tespiti (Detection) parametreleri, sahip olunan eski tecrübeler, OEM'den alınan alt parça bilgileri, saha verileri ve mühendislik yaklaşımları ile belirlenebilir. Zamana bağlı hata oranı fonksiyonunun HMEA'den elde edilmesi ile arıza zamanları belirlenmiş ve bu kapsamda yedek parça envanter yönetim matematiksel modeli ortaya konmuştur.

Yedek parça envanter yönetiminde önemli bir etkiye sahip olan diğer bir husus arızalı parçaların tamir edilerek stoğa tekrar alınma durumudur. Arızalı parçaların onarılması ve envanter miktarını arttırıcı bir etkiye sahip olması, geliştirilecek olan yaklaşımları daha dinamik bir şekle sokmaktadır. Arızalı parçaların onarılması hususunda envanter yönetimi ve kullanılabilirlik açısından dikkate alınması gereken parametreler ortaya çıkmaktadır. Arızalı parçaların tamir süresi, arızalı

parçanın tamir maliyeti, envanter yönetim modeli oluştururken dikkate alınmalıdır. Arızalı parçaların onarılması durumunda ön görülmesi zor olan nokta, bütün arızalı parçaların onarılabilir durumda olup olmama durumudur. Askeri sistemlerde parçalar doğrudan yenisi ile değiştirilen yedek parçalar ve tamir edilebilen parçalar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Ancak tamir edilebilen yedek parça kategorisinde yer alan her parça her zaman tamir edilememektedir. Parçanın sahip olduğu bazı arızalar her zaman tamir edilebilirken, bazı arızalar ise tamiri mümkün olmayan durumlara yol açmaktadır. Bu durumda tamir edilebilen parçaların hepsinin tamir edilmesi ile gerçekleştirilen yaklaşımlar belli bir oranda hataya sebep olacaktır. Tamir edilebilen parçalarda envanter yönetimi ile ilgili modeller de karşılaşılan diğer bir zayıf yan ise, tamir için gerekli alt parçaların hepsinin stokta olma durumudur. Tamir için ihtiyaç duyulan alt parçaların temin süreleri, envanter durumları, envanter miktarları literatürde bulunan çalışmaların birçoğunda yer almamaktadır. Bu çalışmada da tamir için gereken parçaların hepsinin ihtiyaç durumunda yeterli miktarda var olduğu varsayılmıştır.

Dekker vd. (2013) gerçekleştirdikleri çalışmada tamir edilebilen parçaların envanter yönetimi ile birlikte tamir edilemeyen parçaları da dikkate almışlardır. Çalışma içeriğinde ürün ömür devrini dikkate almışlar ve ürünün tasarım sonrası ilk kullanım fazında oldukça yüksek arızalandığını daha sonraki süreçte olgunluk dönemine girip sabit ve göreceli olarak ilk kullanım fazına göre daha az arızalandığını ve ömür devrinin sonuna yaklaştığında ise yaşlan fazına girildiğinden hızlı bir ivmelenme ile oldukça yüksek oranda arızalandığını belirtmişlerdir. Yedek parça taleplerinin ise bu fazlara göre değiştiğini özellikle olgunluk döneminde sabit ve düşük bir talep olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada ortaya bir matematiksel model konmamıştır.

Kostas vd. (1999) ortaya koydukları çalışmada Bayesyen yaklaşımı bir elektronik sisteme ait alt parçaların arızalanması durumunda, arızalı parçaların onarılması için ihtiyaç duyulacak yedek parçaların belirlenmesi ve envanter yönetimi hakkında matematiksel model geliştirmişleridir. Çalışma içerisinde yedek parça

ihtiyacından kaynaklı duruşları dikkate almamışlar ve ekipman kullanılabilirliğini probleme dahil etmemişlerdir.

Liu vd. (2019) oluşturdukları makalede arızalanan parçaların yenisi ile değiştirme ve arızalı parçaların tamir edilme durumlarını maliyet efektif bir yaklaşım ile değerlendirmiştir. Çalışmalarının kapsamını geliştirmek için bakım yetki kademeleri oluşturmuşlar ve bu kademelerine göre yedek tutma kararı vermişlerdir. Hata olasılıklarını üssel değerlendirmişler ve arızalı parçaları sistemlere rastgele atamışlardır. Kullanılabilirlik parametresini matematiksel modellerinde bir kısıt olarak kullanmışlardır. Kullanılabilirlik kısıtını cezai bir yaptırıma bağlamamışlar, modelleri hep kısıtı sağlayacak yapıda çalışmıştır. Basten ve Houtum (2014) gerçekleştirdikleri çalışmada bir önceki çalışmaya benzer yapıda, KYÇ esaslı bir bakım konsepti belirlemişlerdir. Envanter yönetiminde hem üretici olan OEM stoğunu hem de kullanıcının stoklarını birlikte ele almıştır. Bunlara ek olarak envanter ve tamir alanları arasında bir ilişki kurmuştur.

Costantino vd. (2013) benzer bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. İtalyan Askeri Hava Kuvvetlerinin envanter durumu çalışmasında kullanılabilirlik hedefi yüzde doksan dokuz olarak belirlenmiştir. Hem askeri hem de havacılık gibi konseptler de kullanılabilirlik değerlerinin oldukça yüksek olması günümüz teknolojisinde talep edilebilir bir durumdur. Çalışmaların da kullanılabilirlik – maliyet fonksiyonu oluşturmuşlar ve hata olasılıklarının üssel dağıldığını varsaymışlardır.

Mirzahosseinian ve Piplani (2011) yazdıkları makalesinde tamir edilebilen parçaların envanter yönetimini kullanılabilirlik kısıtı ile gerçekleştirmişlerdir. Arıza olasılık dağılımını poisson dağılımı ile şekillendirmişler ve maliyeti minimize eden bir matematiksel model ortaya koymuşlardır. Selçuk ve Ağralı (2013) gerçekleştirdikleri çalışmada oldukça yüksek teknolojiye sahip bir ürünün, kullanılabilirliğini yüksek tutmak için envanter yönetim matematiksel modelini ortaya koymuşlardır. Çalışmalarının içerisinde envanter miktarlarını iki farklı parametre ile ayrı ayrı değerlendirmişlerdir. İlk yöntemleri, belirlenen arıza oranına göre bütün arızaları birebir karşılayacak yedek parça stoğu tutmak, ikinci

yöntemleri arızalar arası ortalama zamana göre arıza miktarını tahmin etmek ve bu arızaları karşılayacak kadar yedek parça stoğu yaratmaktır. Çalışmalarında Avrupa'da yer alan bir OEM fabrikasının gerçek verilerini kullanmışlardır aynı zaman kendi ürettikleri veriler ile matematiksel modellerini çalıştırmışlar ve sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Oluşturdukları problem içerisinde kullanılabilirliği bir kısıt olarak kullanmışlardır.

Tablo 4 içinde literatür taramasında incelenen ve detaylı bir şekilde analiz edilen çalışmaların karşılaştırılmalı gösterimi sunulmaktadır. Analiz edilen makaleler, matematiksel model, tamir edilebilirlik, hata oranı fonksiyonu, kullanılabilirlik ve cezai şart kapsamı ile değerlendirilmiştir. Belirtilen makalelerin sadece iki tanesinde matematiksel model yer almamaktadır. Çalışmalarda yer alan matematiksel modeller, envanter yönetimi için kullanılacak modellerdir. Ancak bu modellerin hiçbirisinde kullanılabilirliğin sağlanamadığı durumlarda ödenmesi gereken cezai yaptırım kısıtı yer almamaktadır.

Tablo 4 içinde yer alan çalışmalarda sadece dört adet makalede hata oranı fonksiyonu oluşturulmamıştır. Hata adetleri tahmini, saha verileri veya tecrübeler ile belirlenmiştir. Tamir edilebilirlik durumu ise on adet çalışmada yer almamıştır. Bu sebeple bu çalışmalarda parçalar sürekli tamir edilme veya yenisi ile değiştirme durumu ile değerlendirilmiştir. Savunma sanayi projelerinde yer alan kullanılabilirlik kavramı ise çalışmaların yaklaşık yarısında yer almamaktadır. Bu sebeple kullanılabilirlik kavramının yer almadığı çalışmalar savunma sanayinde uygulanabilir bir alan bulmakta zorlanmaktadır. Cezai şart ise literatürde çalışmasında ele alınan çalışmaların hiçbirinde yer almamaktadır.

Bu çalışma kapsamında ele alınan problemde ve çözümünde matematiksel model, tamir edilebilirlik, hata oranı fonksiyonu, kullanılabilirlik ve cezai şart tanımları, ilgili kısıtları ve verileri yer almaktadır.

	Çalışmalar	Matematiksel Model	Tamir Edilebilirlik	Hata Oranı Fonksiyonu	Kullanılabilirlik	Cezai Şart
1	Basten ve Houtum (2014)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-	<input type="checkbox"/>	-
2	Dekker vd. (2013)	-	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
3	Walker (1997)	<input type="checkbox"/>	-	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
4	Yang ve Niu (2009)	<input type="checkbox"/>	-	<input type="checkbox"/>	-	-
5	Mirzahosseinian ve Piplani (2011)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
6	Kostas vd. (1999)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-	-	-
7	Eaves ve Kingsman (2004)	<input type="checkbox"/>	-	<input type="checkbox"/>	-	-
8	Selçuk ve Ağralı (2013)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
9	Al-Momani (2020)	<input type="checkbox"/>	-	-	<input type="checkbox"/>	-
10	Costantino vd. (2013)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
11	Liu vd. (2019)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
12	Goshorn vd. (2010)	<input type="checkbox"/>	-	<input type="checkbox"/>	-	-
13	Lee ve Kim (2018)	-	-	<input type="checkbox"/>	-	-
14	Rezaei vd. (2018)	<input type="checkbox"/>	-	<input type="checkbox"/>	-	-
15	Tian vd. (2021)	<input type="checkbox"/>	-	-	-	-
16	Quian vd. (2017)	<input type="checkbox"/>	-	<input type="checkbox"/>	-	-
17	Vaez vd. (2018)	<input type="checkbox"/>	-	<input type="checkbox"/>	-	-
	Bu Çalışma	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Tablo 4: Literatür Karşılaştırma

2. BÖLÜM

PROBLEMİN TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL

Bu çalışmada; arızaya bağlı yedek parça ihtiyacı ve belirli bir oranda kullanılabilirlik varsayımı ile yedek parça envanter problemi incelenmektedir. İlerleyen bölümde, bir araç filosunda meydana gelen arıza zamanlarının belirlenmesi tanımlanacaktır. Aynı zamanda arızalı araçların tekrar faal hale gelmesi için tamir veya yedek parça kullanım kararlarının oluşturulduğu yaklaşık karar tahmini sunan matematiksel model konusuna değinilecektir.

2.1 PROBLEMİN TANIMI

Ele alınan yedek parça envanter probleminde, N adet zırhlı araç, R adet araçlara ait tanımlanmış onarılabilecek veya değiştirilebilecek alt parça, araçların aktif olarak kullanılacağı T planlama ufku ve problem çözümünde kullanılabilirlik durumunun değerlendirilmesini sağlayacak T süresinin alt kümesi olan ST alt zaman dilimi bulunmaktadır. T süresi parçaların tedarik süresini göstermek için, ST süresi için onarım, lojistik süre ve araçların gayri faal durumda geçirdikleri süreleri göstermek için kullanılmıştır. ST kümesi T kümesinin bir alt kümesidir. Bu çalışmada kullanılan alt parçaların hepsinin tamir edilebilir özelliklerde olduğu ve tamir edilebilen parçaların bir süre sonra tekrar tamir edilemez olduğu varsayılmıştır. Problemden talep; arızalı araçların tekrar faal hale getirilmesidir. Problemden; filoda bulunan araçları belirlenmiş kullanılabilirlik değerinin üzerinde tutmak veya kullanılabilirlik değerinin altında bulunan her an için ceza maliyeti ödeyen bir sistemde, yedek parça satın alma ve onarım maliyetinin yaklaşık olarak minimize edilmesi amaçlanmaktadır.

Problemimizde arızalı araçların faal hale getirilmesi kapsamında, $r \in R$ parçasının yedek tutulması veya tamir edilip tekrar araçlara entegre edilmesi durumları ele alınacaktır. Bu durumda iki farklı seçenek bulunmaktadır. İlk seçenek arızalanması öngörülen parçaların envanter olarak tutulması ve parça arızalandığı zaman envantere bulunan parça ile değiştirilmesidir. Envantere bulunması istenen parça, temin süresi kapsamında lt_r olarak gösterilmektedir. Envantere bulunması istenen parçanın satın alma maliyeti C_r olarak gösterilmektedir. Diğer seçenek ise arızalı parçanın tamir edilmesidir. Arızalı parçanın tamir süresi mr_r olarak gösterilmektedir. Arızalı parçanın tamir maliyeti Cr_r olarak gösterilmektedir. Arızalı parçanın gerek yenisi ile değiştirilmesi gerek ise tamir edilmesi için gereken lojistik süre (ilgili parçanın araçtan, fabrikaya sevk edilmesi, kabul işlemleri, paketleme, kalite ve muhasebe süreleri, gönderim.) l_r ile gösterilmektedir.

Problemimizde belirtilen kullanılabilirlik kavramının hesaplanmasında mevcut arıza durumunun bilinmesi gerekmektedir. Problem içerisinde arızaların ait olduğu araçlar bilinmekte mt_{nrt} olarak gösterilmektedir. n indisi araç numarasını, r indisi alt parçayı ve t indisi ise zaman dilimini göstermektedir. mt_{nrt} gösterimi 1 veya 0 değerini alacak şekilde modelde kullanılmıştır. n aracının, r parçası, t zamanında arızalı ise mt_{nrt} 1 değeri almaktadır aksi durumda 0 değerini almaktadır. Problemin varsayımlarından biri olan tamir edilebilir parçaların her durumda tamir edilememe durumu ve bu durumun envanter miktarı ile ilişkisi, g olarak tamir edilebilirlik durumu olarak gösterilmektedir. Problem içerisinde yer alan bütün parçalar veya aynı parça grubuna ait bir parça en fazla 2 kere tamir edilebilmektedir. Diğer bir ifade ile bir parça tüm olay ufku boyunca en fazla 2 kere tamir edilmekte ve daha sonrasında yenisi ile değiştirilmek zorundadır. Bu yaklaşımın envanter durumuna etkisi 1/3 olacak şekilde değerlendirilebilir. Envanter durumunun 1 olduğu bir anda tamir işlemi gerçekleşir ise envanter durumu 0,66 olarak değerlendirilmektedir. Tekrar bir onarım işlemi gerçekleşirse envanter durumu 0,33 olarak hesaplanmaktadır. Tekrar bir arızalı parça oluştuğunda artık tamir edilemeyeceği için envantere yeni bir parça alınacaktır. Bu sebeple stok durum göstergesi bir an için 1,33 olacaktır, yeni parçanın

envanterden düşmesi sebebi ile tekrar 0,33 olacaktır. Ancak çalışmanın temel tamir edilebilirlik varsayımı sebebiyle yeni parçanın envantere girmesi ile 2 tamir hakkı daha kazanılacağından 0,33 olan envanter göstergesine 0,66'nın (2 tamir hakkı) eklenmesi ile envanter göstergesi 1 değerini alabilmektedir.

Ele alınan problemde araca ait arızalı parça tamir edilebilir veya yenisi ile değiştirilebilmektedir. Arızalı parçanın tamir edilme durumu Y_{nrt} olarak gösterilmektedir. Y_{nrt} ifadesi 1 değerini aldığı anda n aracının, r parçası, t zamanında tamir edilmiştir, 0 değerini aldığı anda ise tamir edilmemiştir. Arızalı parçanın yenisi ile değiştirilmesi Z_{nrt} olarak gösterilmektedir. Benzer şekilde Z_{nrt} ifadesi de 1 veya 0 değerini almaktadır. 1 değeri aldığı anda, n aracının, r parçasının, t zamanında yenisi ile değişmiştir, 0 değerini aldığı anda ise yenisi ile değişmemiştir. Arızalanan parçanın yenisi ile değişmesi için parçanın envantere bulunması veya sipariş edilmesi gerekmektedir. Parçanın envanter bulunma ihtimali I_{rt} olarak gösterilmektedir. I_{rt} ifadesi, r parçasının, t zamanında envantere bulunma ihtimalini göstermektedir. I_{rt} ifadesi parçaların fiziken envantere bulunma durumunu göstermemektedir. Parçaların tamir edilebilme durumları (2 kere tamir edilme sonrasında yenisi ile değiştirme) envantere parça varmış gibi değerlendirilmektedir. Parçanın fiziken envantere girmesi ile envanter durumu 1 adet olarak artmaktadır. Ancak 1 adet yeni parçanın envantere girmesi ile 2 kere daha tamir hakkı kazanılacağından I_{rt} 1,66 değerini alacaktır. Sonrasında gerçekleşebilecek bir tamir ile I_{rt} değeri 1,33'e düşecektir. X_{rt} ifadesi ise r parçasından t süresinde ne kadar sipariş verildiğini göstermektedir. Araçlarda yer alan alt parçaların temin süreleri birbirlerinden farklıdır. Bu sebeple istenilen zamanda, arızalanan parçayı yenisi ile değiştirmek için, parçanın temin süresi dikkate alınarak, arıza gerçekleşmeden önceki zamanlarda sipariş vermek gerekmektedir. Belirtilen sipariş durumu X_{rt} ile gösterilmektedir. S_{rt} ifadesi ise matematiksel modelin geliştirilmesinde kullanılan r parçasının t zamanında sipariş edilme ve edilmeme durumunu 1 ve 0 olarak gösteren karar değişkenidir. Modelde yer alan f parametresi, $r \in R$ de yer alan ve planlama ufku boyunca en fazla bozulmayı göstermektedir. Envanter yönetimi ve lojistik hesaplamalarında

oldukça yaygın olarak kullanılan fırsat maliyeti de h_r olarak gösterilmektedir. Benzer şekilde sabit sipariş durumu ise A ile ifade edilmektedir.

Arızalı parçaların envanter durumlarının belirlenmesindeki en önemli unsur kullanılabilirlik oranıdır. Değişim ve onarım süreleri kullanılabilirlik oranını doğrudan etkileyen parametrelerdir. Arızalı parçanın tamir edilmesi veya envantere bulunan parçanın arızalı parça ile değişim süresi arasında önemli farklar yer almaktadır. Ancak arızalı parçanın onarımı maliyeti ile arızalı parçayı yenisi ile değiştirmek arasında da oldukça önemli maliyet farkı yer almaktadır. Bu çalışmada geliştirilen model, kullanılabilirlik oranı ve maliyet anlamında yaklaşık karar tahmin bir destek çözümü geliştirmektedir. Çalışma içerisinde kullanılabilirlik değeri U_{ntj} olarak gösterilmektedir. U_{ntj} n aracının t zamanın j alt zamanında başlayan kullanılabilirlik değerini 1 ve 0 olarak göstermektedir. Araç kullanılabilir durumda ise 1 değil ise 0 değerini almaktadır. Kullanılabilirlik değerinin sağlanamadığı durumlarda ceza maliyetinin ele alınması bu çalışmanın ana esaslarından biridir. Matematiksel modelde filoda yer alan araçların kullanılabilirlik aralığı θ_{tkj} ile gösterilmektedir. θ_{tkj} , t zamanın j alt zamanındaki kullanılabilirlik durumunu göstermektedir. Çalışma içerisinde iki farklı zaman indisi kullanılmıştır. j indisi ile gösterilen zaman indisi, t indisinin alt zamanını göstermektedir. Kullanılabilirlik ve ceza kısıtlarının sağlanabilmesi için t indisine göre daha küçük zaman aralığını gösteren j alt indisi kullanılmaktadır.

Araç filosu kullanılabilirlik oranı anlamında sürekli değişkenlik göstermektedir. Bozulan veya çalışmayan araç sayısı yüksek ise kullanılabilirlik oranı oldukça düşük, bozulan veya çalışmayan araç sayısı düşük ise kullanılabilirlik oranı oldukça yüksek olmaktadır. Bu çalışmada kullanılabilirlik oranının değişkenliğinin ceza yaptırımına etkisi de değişkenlik göstermektedir. θ_{tkj} ifadesi t zamanın j alt zamanındaki aralığı k ise 1 değerini almakta, k değeri değil ise 0 değerini almaktadır. Belirlenen k aralığına göre ceza maliyeti artmakta veya azalmaktadır. b_k parametresi ile kullanılabilirlik aralığı, p_k parametresi ile de belirlenen k aralığındaki ceza maliyeti belirlenmektedir.

Tablo 5: Notasyon Tablosu

İndisler	
n	Araç
r	Araç Alt Parçası
t	Periyot
j	Alt Zaman
k	Kullanılabilirlik Aralık İndisi
Kümeler	
N	Filo içerisinde bulunan araç sayısı $n \in N = \{1,2,3,\dots N\}$
R	Araçlarda bulunan parça kümesi $r \in R = \{1,2,3,\dots R\}$
T	Araçların değerlendirildiği garanti süresi $t \in T = \{1,2,3,\dots T\}$
ST	T zamanının alt kümesi $j \in ST = \{1,2,3,\dots ST\}$
K	Kullanılabilirlik Aralığı $k \in K = \{1,2,3,\dots K\}$
Parametreler	
C_r	r parçasının satın alma maliyeti
C_{r_r}	r parçasının tamir maliyeti
lt_r	r parçasının temin süresi
l_r	r parçasının lojistik süresi
mr_r	r parçasının tamir süresi

m_{nrt}^t n aracının r parçasının t zamanında arızalanma durumu. Arızalandıysa 1, aksi halde 0

h_r r parçasının fırsat maliyeti

A Sabit sipariş maliyeti

p_k k kullanılabilirlik durumunda birim zamanda ödenilen ceza maliyeti

g Parçanın tamir edilebilirlik durumu

b_k k kullanılabilirlik aralığının alt limiti

f Planlama ufku boyunca bir parçanın maksimum bozulma sayısı

Karar Değişkenleri

X_{rt} r parçasından t zamanında sipariş edilen miktar

Y_{nrt} n aracının r parçasının t zamanda onarılma durumu. Tamir edildiyse 1, aksi takdirde 0

Z_{nrt} n aracının r parçasının t zamanında yenisi ile değiştirilme durumu. Değiştirildiyse 1, aksi takdirde 0

I_{rt} r parçasının t zamanında envanter ihtimal göstergesi

U_{ntj} n aracının t zamanın j alt zamanında kullanılabilir durumdaysa 0, aksi takdirde 1

Fm_{rt} r parçasının t zamanında envantere tutulan miktarı

S_{rt} r parçasının t zamanında sipariş verilme durumu. Sipariş verildiyse 1, aksi takdirde 0

θ_{tkj} t zamanın j alt zamanındaki kullanılabilirlik aralığı k ise 1, aksi takdirde 0

Minimize (en küçükle)

Min Z =

$$\begin{aligned}
& \sum_r^R \sum_t^T X_{rt} * C_r + \sum_r^R \sum_t^T Fm_{rt} * h_r \\
& + \sum_n^N \sum_r^R \sum_t^T Y_{nrt} * Cr_r + \sum_n^N \sum_r^R \sum_t^T Z_{nrt} * Cr_r - \sum_r^R \sum_t^T X_{rt} * Cr_r \\
& + \sum_r^R \sum_t^T A * S_{rt} + \sum_t^T \sum_k^K \sum_j^{SR} \theta_{tkj} * p_k
\end{aligned} \tag{2.1}$$

2.1 fonksiyonu ile envanter yönetimi için gerekli maliyet yaklaşık olarak minimize edilmektedir. Belirtilen varsayımları neticesinde bu amaç fonksiyonu ile optimal envanter yönetimini ve karar verme mekanizmalarını destekleyen tahmini bir sonuç ortaya çıkmaktadır. Amaç fonksiyonu, satın alınan parçaların, satın alma maliyetini, tamir edilen parçaların tamir maliyetini, envanter tahminlerinde yer alan fırsat ve sabit maliyetleri en aza indirmektedir. Ek olarak, araçların faal olmadığı durumlarda oluşacak ceza maliyetini de en aza indirmektedir. Envantere yeni giren parçaların, tamir maliyeti ile amaç fonksiyonunda yer almasının sebebi ise, arızalı aracı faal hala getirmek için yenisi ile değiştirme kararı alındığında (Z değer aldığı) bu değişimin yeni parça ile mi gerçekleştirildiği yoksa daha önce tamir edilmiş bir parça ile mi gerçekleştirildiğini bilmek ve buradan doğacak tamir maliyetine katlanmamaktır.

Kısıtlar

$$Y_{nrt} + Z_{nrt} = mt_{nrt} \quad \forall n \in N, r \in R, t \in T \tag{2.2}$$

Kısıt 2.2 ile arızalı parçanın yenisi ile değiştirilme ve onarıma durumu toplamının problem verisinde tanıtılmış arızalı parça sayısına eşit olması gerektiğini gösterir.

$$Y_{nrt} * (m_r + l_r) + Z_{nrt} * (l_r) - |ST| \leq (U_{ntj} - 1) * j$$

$$\forall n \in N, r \in R, t \in T, j \in ST \quad (2.3)$$

Kısıt 2.3 ile kullanılmayan araç sayısının en aza indirilmesi hedeflenmektedir. U_{ntj} 'nin 1 olması durumunda yani ele alınan aracın arızalı olduğu durumda, kısıtın sağ tarafı 0 değerini almaktadır. U_{ntj} o değerini aldığı anda ise araçlar arızalı değildir. Araçlarda arıza olmadığı durumda Y ve Z karar değişkenleri değer almamakta ve eşitliğin sol tarafı eksi 30 değerini almaktadır. Bu durumda bütün "j" 'ler için U_{ntj} değeri 0 değerini almakta ve problem çözülebilmektedir. Y ve Z değer aldığı anda ise kısıtın sol tarafı negatif bir değer almakta ve sağ tarafı U_{ntj} sıfır iken bazı aralıkları sağlamamaktadır. Bu durumda U_{ntj} bazı j süreleri için 1 değerini alarak araçların kaç "j" sürede gayri faal olduğunu göstermektedir. Kısıt 2.3 içerisinde kullanılan onarım süresi ve lojistik süre ST (j indisi) kümesi ile gösterilmektedir. Parça tedarik süresi "t" ile belirlenip, olay ufku "30 t" ile gösterilirken, araçların kullanılabilirlik durumları "j" ile gösterilmektedir. Bir "t", otuz adet "j" 'den oluşan bir alt kümeyi kapsamaktadır.

$$I_{r,t} = I_{r,t-1} + X_{r,t-lt_r} - \sum_n^N \frac{Y_{n,r,t}}{g} - \sum_n^N \frac{Z_{n,r,t}}{g} \quad \forall r \in R, t \in T: t > lt_r \quad (2.4)$$

$$I_{r,t} = I_{r,t-1} - \sum_n^N \frac{Y_{n,r,t}}{g} \quad \forall r \in R, t \in T: t \leq lt_r, t > 1 \quad (2.5)$$

$$I_{r1} = \frac{g-1}{g} - \sum_n^N \frac{Y_{n,r,1}}{g} \quad \forall r \in R \quad (2.6)$$

2.4, 2.5 ve 2.6 kısıtları ile envanter parça göstergesi belirlenmektedir. 2.4 kısıtı ile "t" anındaki envanter durumu, bir önceki "t-1" zamanındaki envanter miktarına, lt_r zaman önce siparişi verilmiş ve ilgili "t" de envantere girecek parçanın eklenmesi ve sonrasında "t" de gerçekleştirilen yenisi ile değiştirme veya onarım işlemine tabi parçanın envanterden çıkartılması ile sağlanmaktadır. 2.5 kısıtı ile de temin süresinden daha kısa süreler için envanter durumu sağlanmaktadır. Bu süre içerisinde hiçbir yeni parça stoğu eklenemeyeceği için bir önceki dönemlerde ki envanter döneminden, onarılmış parça sayısından çıkartılması ile

envanter durumu hesaplanmaktadır. 2.6 kısıtı ile de sadece ilk t anında yer alan envanter durumu sağlanmaktadır. Bu dönemde hiçbir yeni parça envantere girememiş olacağı için envanter durumu tamir hakkından, tamir edilmiş parça sayısının çıkartılması ile gösterilmektedir. Bu problemin veri setinde yer alan arıza durumları, tedarik süresinden daha kısa olan “t” dönemlerinde arızalı parça içermemektedir. Bu sebeple kısıt 2.5 problem çözümünde sağlanabilmekte ve oluşturulan yaklaşık karar tahmin modeli sonuç vermektedir.

Kısıt 2.4 içerisinde Z kararının alınması ile birlikte envanterden bir adet parça eksilmiş olacaktır. Ancak Z kararı alındığında diğer bir ifade ile envantere yeni bir parça alındığında problem varsayımından biri olan iki kere tamir hakkı kazanılacağından dolayı, Z değeri “g” bölünmektedir. Bu durumda envanter Z'nin değer alması ile 1 azalırken, tamir haklarının elde edilmesi ile 0,66 artacak ve toplamda envanter durum göstergesi 0,33 azalmış olacaktır.

$$\sum_n^N Z_{nrt} \leq I_{rt} \quad \forall r \in R, t \in T \quad (2.7)$$

2.7 kısıtı ile arızalı parçanın yenisi ile değişim miktarının envantere bulunan parça stoğundan az olması sağlanmaktadır. I_{rt} değeri 1 olmadığı sürece, yenisi ile değişim kararı alınmamaktadır

$$\sum_k^K \theta_{tkj} = 1 \quad \forall j \in ST, t \in T \quad (2.8)$$

$$\sum_k^K \theta_{tkj} * b_k \leq 1 - \frac{\sum_n^N U_{ntj}}{|N|} \quad \forall j \in ST, t \in T \quad (2.9)$$

2.8 ve 2.9 kısıtları ile kullanılabilirlik aralıklarında yer alan değerler toplamının 1 olması sağlanmaktadır. Her bir “t” zamanında ve alt zamanı olan her bir “j” de yer alan kullanılabilirlik değerlerinin 0 veya 1 olması ve toplamının 1 olması sağlanmaktadır. Araçların arızalı olması durumunda, tamir veya yenisi ile değiştirme kararı alınmaktadır. Tamir kararı alındığında araç, ilgili parçanın tamir için gerekli süre ve lojistik süre kadar arızalı kalmaya devam etmekte ve bu durumda cezai işlem uygulanmaktadır. Benzer bir şekilde yenisi ile değiştirme kararı alındığında araç sadece lojistik süre kadar arızalı kalmakta ve bu süre

kadar cezai işlem uygulanmaktadır. Kısıt 2.8, Tablo 15 içerisinde yer alan aralıklarda 1 ve 0 değerini alarak cezai maliyetinin oluşmasını sağlamaktadır. Aracın faal olma ve faal olmama durumu Tablo 15 içerisindeki aralıklarda değer almaktadır. Bu sebeple Tablo 15’ de yer alan dört aralığın herhangi bir herhangi bir t anında θ_{tkj} 1 değerini alacağından toplam θ_{tkj} 1 değerine eşitlenmektedir. Diğer kısıt ile de filoda yer alan araçların kullanılabilirlik yüzdesine göre ilgili ceza sınıfında yer alması sağlanmaktadır. Eşitsizliğin sağ tarafı arızalı araç sayısının filoda bulunan araç sayısının 1’den çıkartılması ile hesaplanmaktadır. Eşitsizliğin sol tarafı için ise b_k alt limit değerleri kullanılmaktadır.

$$\sum_n^N (Y_{nrt} - Z_{nrt} * (g - 1)) \leq g - 1 \quad \forall t \in T, r \in R \quad (2.10)$$

$$\sum_n^N \sum_{t': t' \leq t}^T Y_{n,r,t'} - Z_{n,r,t'} * 2 \leq 2 \quad \forall r \in R, t \in T: t > lt_r \quad (2.11)$$

2.10 kısıtı ile her bir “t” süresi içerisinde “g” den fazla tamir edilememe durumu sağlanmaktadır. Ancak “Z”nin değer alması durumunda “g” kadar tamir sağlanabilmektedir. Bu kısıt ile Y_{nrt} değeri “g” parametresine bağlanmaktadır. 2.11 kısıtı ile mevcut t zamanından önceki bütün zamanlarda yer alan tamir etme ve yenisi ile değiştirme ilişkisi sağlanmaktadır. Mevcut zamandan daha önceki bütün zamanlarda gerçekleştirilen yenisi ile değiştirmenin, tamir etme ile ilişkisi olan en fazla 2 kere tamir sonrasında 1 yenisi ile değiştirme sağlanmaktadır. Problemin temel varsayımı olan arızalı parçaların 1/3’nün yenisi ile değiştirilebilmesi bu kısıt ile sağlanmaktadır.

2.12 kısıtı ile, “t” anında “r” parçasından verilen sipariş miktarının, parça kümesinde yer alan ve en çok arızaya sahip olan parçanın arıza adedinden daha fazla sipariş verilmemesi sağlanmaktadır.

$$f * S_{rt} \geq X_{rt} \quad \forall t \in T, r \in R \quad (2.12)$$

Kısıt 2.13 ile herhangi bir t anına kadar yenisi ile değiştirme kararı alınan parça sayısının, aynı t zamanına kadar sipariş edilmiş ve tedarik edilmiş parça sayısının yine o zamana kadar yenisi ile değiştirilen parça sayısı farkından daha az olması sağlanmıştır. Kısıt 2.13 içerisinde yer alan t' ifadesi daha önceki herhangi bir t

zamanında siparişi verilmiş olan parçanın mevcut t zamanında envantere yer alma durumunu göstermektedir. t'' ifadesi ise ele alınan t süresine kadar (mevcut t süresinden daha önceki zamanlar) gerçekleştirilen bütün yenisi ile değiştirmeleri hesaplayabilmek için kullanılmaktadır.

$$\sum_n^N Z_{n,r,t} \leq \sum_{t' \leq t - I_{rt}}^T X_{r,t'} - \sum_{t'' \leq t}^T \sum_n^N Z_{n,r,t''} \quad \forall r \in R, t \in T: t \geq I_{rt} \quad (2.13)$$

Kısıt 2.14 ve kısıt 2.15 ile fırsat maliyetinin hesaplanması sağlanmaktadır. Problemin parametrelerinden biri olan I_{rt} ile hem tamir edebilme hakları hem de envantere yer alan gerçek (fiziksel) parçalar gösterilmektedir. Fm_{rt} ile de envantere yer alan fiziksel parçalar gösterilmektedir. Fm_{rt} parametresi kısıt 2.26 ile pozitif tam sayı olarak kısıtlandırılmıştır. Bu sebeple I_{rt} 'den 0,99 çıkarılması ile envanter durum göstergesi olan I_{rt} 'nin bir tam sayı küçüğü fiziksel envanteri göstermektedir. Bu sebeple amaç fonksiyonunda, fırsat maliyeti Fm_{rt} ile ilişkilendirilmiştir. Örnek olarak, envanter durum göstergesi (I_{rt}) 1,33 olduğu durumda kısıt 2.15 ile Fm_{rt} , 0,33 incek ve tam sayı olması sebebiyle 1 değerini olacaktır. Envanter durum göstergesinin 0,66 olduğu durumda ise Fm_{rt} 0 değerini alacak ve herhangi bir fırsat maliyeti yaratılmayacaktır.

$$Fm_{rt} \leq I_{rt} \quad \forall r \in R, t \in T \quad (2.14)$$

$$Fm_{rt} \geq I_{rt} - 0,99 \quad \forall r \in R, t \in T \quad (2.15)$$

Aşağıda belirtilen kısıtlar modelde kullanılan karar değişkenlerinin türü ile ilişkilidir.

$$S_{rt} \in \{0,1\} \quad \forall r \in R, t \in T \quad (2.16)$$

$$Y_{nrt} \in \{0,1\} \quad \forall n \in N, r \in R, t \in T \quad (2.17)$$

$$Z_{nrt} \in \{0,1\} \quad \forall n \in N, r \in R, t \in T \quad (2.18)$$

$$mt_{nrt} \in \{0,1\} \quad \forall n \in N, r \in R, t \in T \quad (2.19)$$

$$U_{ntj} \in \{0,1\} \quad \forall n \in N, t \in T, j \in ST \quad (2.20)$$

$$\theta_{tkj} \in \{0,1\} \quad \forall n \in N, t \in T, j \in ST \quad (2.21)$$

$$X_{rt} \geq 0 \quad \forall r \in R, t \in T \quad (2.22)$$

$$I_{rt} \geq 0 \quad \forall r \in R, t \in T \quad (2.23)$$

$$U_{nt} \geq 0 \quad \forall n \in N, t \in T \quad (2.24)$$

$$\theta_{tkj} \geq 0 \quad \forall t \in T, j \in ST, k \in K \quad (2.25)$$

$$Fm_{rt} \geq 0 \quad Fm_{rt} \in Z^+, \forall r \in R, t \in T \quad (2.26)$$

3. BÖLÜM

SAYISAL ANALİZ

Bu bölümde yaklaşık tahmin karar modelinin veriler ile çözülmesi ile elde edilen sayısal analizler detaylı olarak incelenecek ve ortaya çıkan sonuçlar yorumlanacaktır. Bu doğrultuda, bir zırhlı askeri araç filosunun, muhtemel arızalanma durumlarına karşın kullanılabilirlik değeri kapsamında yedek parça envanter yönetimi üzerine sunulan modelin uygulanması sunulacaktır. İlk olarak çalışma içerisinde yer alan matematiksel model çözümü sunulacaktır. Sonrasında, çalışma içerisinde yer alan varsayımların dahil olmadığı senaryoda model çözülecektir. Sonuç kısmında ise çözümler karşılaştırılacaktır.

3.1 VARSAYIM AÇIKLAMALARI

Yedek parça envanter belirlemede arızalı aracın tekrar faal hale getirilebilmesi için arızalı parçanın yenisi ile değiştirilmesi veya arızalı parçanın onarılması gerekmektedir. Arızalı parçanın yenisi ile değiştirilebilmesi için yedek parça envanterinde o parçadan bulunması gerekmektedir. Parçanın envantere bulunması için ise belirlenen bir t zamanında o parçadan sipariş edilmesi gerekmekte ve parçanın satın alma maliyeti ve diğer maliyetlere katlanması gerekmektedir. Parçanın onarılması durumunda ise, parçanın onarımı için geçen süre, harcan işçilik maliyetine katlanması gerekmektedir. Bu çalışmada arızalı parçanın onarılması için gereken alt parçaların sürekli bulunduğu varsayılmıştır. Alt parça maliyetleri ise onarım maliyeti içerisinde dahil edilmiştir.

Problemde iki adet varsayım ele alınmaktadır. İlk varsayım onarılabilen – tamir edilebilen kategorisinde değerlendirilen parçaların sürekli olarak

onarılmayacağı varsayımdır. Problem verisinde kullanılan parametre değerleri, gerçek verilerden ve saha tecrübelerinden oluşturulmuştur. Belirtilen veriler doğrultusunda arızalı kategorisinde yer alan parçaların sadece üçte ikisinin onarılabilirdiği; bir bölü üçünün ise onarılamayacak derecede deforme olduğunu göstermektedir. Bu varsayım ile problem çözümünde ele alınan sonuç, envanter yönetimi için optimum sonuçtan ziyade yaklaşık sonuç olarak değerlendirilmektedir ve karar verme sürecini destekleyici bir şekilde ele alınmaktadır. Bu kapsamda envanter yönetimi kısıt 2.4, 2.5 ve 2.6 ile sağlanmaktadır. Problem çözümünde belirtilen varsayımın değerlendirilmediği durumda ele alınacak ve sonuçları karşılaştırılacaktır.

$$I_{r,t} = I_{r,t-1} + X_{r,t-lt_r} - \sum_n^N \frac{Y_{n,r,t}}{g} - \sum_n^N \frac{Z_{n,r,t}}{g} \quad \forall r \in R, t \in T: t > lt_r \quad (2.4)$$

$$I_{r,t} = I_{r,t-1} - \sum_n^N \frac{Y_{n,r,t}}{g} \quad \forall r \in R, t \in T: t \leq lt_r, t > 1 \quad (2.5)$$

$$I_{r1} = \frac{g-1}{g} - \sum_n^N \frac{Y_{n,r,1}}{g} \quad \forall r \in R \quad (2.6)$$

Problemde ele alınan diğer bir varsayım ise kullanılabilirlik durumudur. Kullanılabilirlik durumunun sağlanmadığı koşullarda uygulanan cezai yaptırımlardır. Günümüz savunma sanayi araç veya hizmet sözleşmelerinde kullanılabilirliğin sağlanamadığı durumlarda önceden belirlenmiş rakamlar üzerinden cezai işlem uygulanacağı açık bir şekilde ifade edilmektedir. Bu sebeple gerçekleştirilen bu çalışmanın gerçek hayatta bir karşılık bulması için kullanılabilirlik ve ceza kısıtları matematiksel modele eklenmiştir. Problem verisinde güvenilirlik yaklaşımları ile belirlenen arızaların bir kesinliğinin olmaması sebebiyle, bu kısıt ile problem çözümüne dahil olan ceza maliyeti yaklaşık bir maliyet içermektedir. Bu sebeple problem çözümünde ortaya çıkan sonuç, envanter yönetimi için karar alma sürecini destekleyen bir sonuç olarak değerlendirilmektedir. Belirtilen varsayım kısıt 2.9 ile sağlanmaktadır.

$$\sum_k^K \theta_{tkj} * b_k \leq 1 - \frac{\sum_n^N U_{nti}}{|N|} \quad \forall j \in ST, t \in T \quad (2.9)$$

3.2 ÇÖZÜM METODOLOJİSİ

Çalışmada incelenen problemin yaklaşık karar tahmin modelinin formülasyonunda ve çözümlenmesinde Gurobi Solver 8.1.1 yazılımı kullanılmıştır. Matematiksel modelin çözümünde doğrusal programlama yöntemiyle envanter yönetimi için belirtilen varsayımlar sebebiyle yaklaşık sonuç hedeflenmiştir. Modelin doğruluğunu değerlendirebilmek için kısıtlar ve parametreler değiştirilip model tekrar çözülmüştür.

3.3 ÖRNEK OLAY İNCELENMESİ

Bu bölüm içerisinde, yaklaşık karar tahmin modelinin çözümlenebilmesinde kullanılan veri setleri tanıtılacak ve elde edilen sonuçlar incelenecektir.

3.3.1 Veri Setinin Tanıtılması

Problemde yer alan filo içerisinde 40 adet araç (N) olduğu varsayılmıştır. 40 adet araç tamamen birbirleri ile aynı konfigürasyonda tasarlanmış ve üretilmiş araçlardır. Problemde yer alan araçların görev profili senelik 1875 motor çalışma saatidir. Diğer bir ifade ile bir aracın bir sene içerisinde 1875 saat çalışacağı varsayımında bulunulmuştur. Garanti süresinin veya envanter çalışmasının yapılacağı süre ise 2 yıl olarak varsayılmıştır. Bu veriler doğrultusunda filoda bulunan bütün araçların toplam çalışması = (Yıllık motor çalışma saati) x (Garanti süresi) x (Filoda bulunan toplam araç sayısı) olacak şekilde hesaplanmaktadır. Ele alınan zırhlı araç içerisinde servis parçası olarak binlerce parça, tali komple parça olarak ise onlar parça bulunmaktadır. Tali komple parçaların detaylı analizleri, S3000L içerisinde belirtilen şartlar ile değerlendirilmesi, güvenilirlik merkezli bakım konsepti gereği, HMEA ve KYÇ çalışmalarının sonucunda, değerlendirilmesi gereken alt parça sayısı (R) 50 olarak belirlenmiştir. Parça tanımları kısmi bir şekilde Tablo 6'da gösterilmektedir.

PARÇA KÜMESİ (R)	PARÇA ADI	PARÇA KÜMESİ (R)	PARÇA ADI
1	MOTOR	9	FAN
2	TERMOSTAT	10	ALTERNATÖR
3	KAYIŞ GERGİ MEKANİZMASI	11	REGULATÖR
4	SU POMPASI	12	HIDROMOTOR
5	SANZIMAN	13	NOZULLU PERVANE
6	TURBOŞARJ	14	PERISKOP
7	ELEKTRONİK KONTROL MODULU	15	ASKI KOLU
8	EGZOZ SUSTURUCU	16	YOL TEKERİ

Tablo 6: Parça Tanımları

Envanter belirleme çalışması Tablo 6'da belirtilen 50 adet parça için gerçekleştirilecektir. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde bu parçalardan adları ile değil, $r \in R$ olacak şekilde numaraları (indisleri) ile söz edilecektir. Tablo 7'de problemin şu ana kadar sunulan temel lojistik verileri gösterilmektedir. Tablo 7'de yer alan veriler orta ölçekli savunma sanayi kara kuvvetleri projeleri baz alınarak belirlenmiştir.

Araç Sayısı ($n \in N$)	40 adet
Her Araç İçin Alt Parça Sayısı ($r \in R$)	50 adet
Garanti Süresi	2 yıl
Araç Görev Profili	1.875 saat
Filo Çalışma Profili	150.000 saat

Tablo 7: Temel Lojistik Verileri

Envanter hesaplamalarını gerçekleştirebilmek için, daha önce yaşanmış parça arıza kayıtları ile parçaların Weibull dağılımına uygun olacak şekilde ölçek ve şekil parametreleri elde edilmiştir. Bu parametreler daha önceki çalışmalarda kullanılan bu parçaların, arızalanma periyotları kullanılarak, Reliasoft yazılımı aracılığı ile hesaplanmıştır. Parçaların ölçek ve şekil parametre değerleri kısmi bir şekilde Tablo 8’de gösterilmektedir.

PARÇA KÜMESİ (R)	β	η	PARÇA KÜMESİ (R)	β	η
1	1,3	20000	5	1,1	12500
2	1,1	13500	6	1,1	17500
3	1,1	37000	7	1,2	51000
4	1,2	21000	8	1,1	35000

Tablo 8: Parça – Weibull Parametreleri

Filo içerisinde yer alan 40 adet aracın garanti süresi boyunca alt parçalarının arızalanmalarından dolayı kullanılabilir oldukları süre sürekli değişecektir. Aracın tekrar faal hale getirilebilmesi ve kullanılabilirlik oranının artması için en kısa sürede arızalı parçanın onarılması veya yenisi ile değiştirilmesi gerekmektedir. Problemimizin temel unsuru; parçaların kullanım süresi boyunca ne kadar arızalanacağına ön görülmesidir. Parçaların, envanter çalışmasının gerçekleştireceği süre boyunca sahip olabileceği arıza adeti Weibull dağılımına uygun olacak şekilde hata oranı fonksiyonu ile hesaplanmaktadır.

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T-\delta}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (1.3)$$

Tablo 8’de belirtilen şekil ve ölçek parametreleri her parça için spesifikdir. Filonun toplam çalışma süresi ise Tablo 7’de belirtildiği gibi 150.000 saattir. Çevre parametresinin de 0 olarak kabul edilmesi ile birlikte, bütün $r \in R$ parçalarının arızalanma adetleri hesaplanmaktadır. Parça bazlı arızalanma adetleri Tablo 9’da gösterilmektedir.

PARÇA KÜMESİ (R)	ARIZA ADETİ	PARÇA KÜMESİ (R)	ARIZA ADETİ
1	17,84526472	9	7,383699763
2	15,54984	10	8,622102063
3	5,129454403	11	16,07291489
4	12,7006984	12	4,379318639
5	16,92357287	13	50,82290148
6	11,68829641	14	7,254256868
7	4,379318639	15	4,981167133
8	5,452783082	16	15,17840284

Tablo 9: Parça-Arıza Adedi

Hata oranı fonksiyonun kullanılması ile her parçanın envanter hesaplama süresi boyunca ne kadar arızalanacağı Tablo 9'da belirtilmiştir. Parçaların ele alınan sürede toplam arızalanma adetleri, hata oranı fonksiyonu sebebiyle küsuratlı olarak bulunmuştur. Bu problemde, ele alınan süre içerisinde dikkate alınan arıza adeti, küsuratın bir sonraki tam sayıya yuvarlanması ile hesaplanmıştır. Hata oranı fonksiyonu ve Weibull dağılımı bir yaklaşımı içermektedir. Bu dağılımın sonuçları çoğu zaman gerçek hayatta birebir karşılanmamaktadır. Bu sebeple güvenli aralıkta kalmak için hesaplanan arıza adeti artırılarak çalışmada kullanılmıştır.

Filoda yer alan araçlarda bulunan parçaların süreç içerisinde ne kadar arızalanacağını belirlemek için envanter çalışması için önemli bir veridir. Tablo 9'da yer alan parçalara ait arızaların; hangi araca ait parça olduğunun öngörülmesi oldukça zordur. Bütün araçların tasarım ve üretim konfigürasyonlarının aynı olması ve belirlenmiş kullanım profiline bütün araçlar tarafından sağlanmış olduğu varsayımı sebebiyle arızalı parçaların hangi araca ait olduğu ön görülemez. Bu sebeple parçalara ait arızaların hangi araçlarda olduğu varsayımsal olarak dağıtılmaktadır. Bu varsayım problem çözümünde ortaya çıkan sonucun optimum sonuç olarak değerlendirilmemesi

gerektiğini, envanter yönetiminde yaklaşık bir karar tahmin sonucu olduğunu göstermektedir. Araçlara ve parçalara ait arıza durumu mt_{nrt} , Tablo 10'da 17. aracın bütün parçalarının t zamanına göre arıza durumu 1 veya 0 olarak gösterilmektedir. 1 değeri; ait olduğu zaman diliminde hangi parçasının arızalandığını göstermektedir. Çalışma içerisinde kullanılan veri çok büyük olduğu için örnek veri olarak sadece 17. aracın verisi gösterilmiştir. 17. araç tüm süreç boyunca 9 kere arızalanmıştır.

n	r	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
17	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	11	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
17	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
17	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	44	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tablo 10: 17. Aracın Arıza Dağılımı

Tablo 11’de 29. parça özelinde arıza dağılımları gösterilmektedir. 29. parçanın bütün araçlarda ve zamanlarda sahip olduğu arıza durumu 1 veya 0 olarak gösterilmektedir. 1 değeri, bulunduğu zaman diliminde ait olduğu araçtaki 29. parçanın arızalı olduğunu göstermektedir. Tüm süreç boyunca 29. parça toplamda 8 kez arızalanmıştır. Tablo 9 içerisinde parçaların arıza adetleri gösterilmektedir.

n	r	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
8	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
10	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
11	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
12	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
13	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
14	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
15	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
16	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
17	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
18	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
19	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	
20	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
21	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
22	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
23	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
24	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
26	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
27	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
28	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
29	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
30	29	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
31	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
32	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
33	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
34	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
35	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
36	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
37	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
38	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
39	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
40	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tablo 11: 29. Parçanın Arıza Dağılımı

Problemin çözümünde; karar verme mekanizmasının parametrelerinden maliyet ile ilgili olanları satın alma maliyeti C_r ve tamir maliyeti $C_{r'}$ dir. Her $r \in R$ 'yi kapsayan, satın alma ve tamir maliyetleri euro cinsinden Tablo 12’de gösterilmektedir.

PARÇA KÜMESİ (R)	SATIN ALMA MALİYETİ	TAMİR MALİYETİ	PARÇA KÜMESİ (R)	SATIN ALMA MALİYETİ	TAMİR MALİYETİ
1	€ 77.000	€ 7.500	5	€ 165.000	€ 12.750
2	€ 1.320	€ 550	6	€ 3.520	€ 1.000
3	€ 800	€ 115	7	€ 13.200	€ 3.600
4	€ 550	€ 190	8	€ 680	€ 230

Tablo 12: Satın Alma ve Tamir Maliyetleri

Benzer şekilde her $r \in R$ 'yi karşılayacak şekilde parçaların tedarik süreleri, lt_r , tamir süreleri, mr_r ve ilgili parçanın araca montajı – demontajı ve taşıma sürelerini içeren lojistik süreler, l_r Tablo 13'de gösterilmektedir. Tedarik süresi göreceli olarak lojistik süreden ve onarım süresinden oldukça yüksektir. Bu sebeple Tablo 13'de belirtilen tedarik süresi ile lojistik süre ve onarım süresi katsayı olarak birbirlerinden farklıdır. Tedarik süresi t ile gösterilmektedir. Lojistik süre ve onarım süresi ise ST kümesinin indisi olan j ile gösterilmektedir. t süresi 30 adet j alt süresinden oluşmaktadır. Diğer bir ifade ile bir t süresi otuz adet j alt süreye eşittir.

PARÇA KÜMESİ (R)	TEDARİK SÜRESİ	LOJİSTİK SÜRE	ONARIM SÜRESİ
1	4	5,84	1,9856
2	4	4,964	0,2482
3	1	4,964	0,2482
4	3	4,964	0,2482
5	3	4,964	1,9856
6	3	4,964	0,7446
7	2	4,964	0,7446

Tablo 13: Parçaların Süre Tablosu

Yedek parça ihtiyacının belirlenmesinde ve envantere yeni parça tedarik edilmesinde maliyeti etkileyen ve modelimizde minimize edilmeye çalışan diğer iki parametre ise fırsat maliyeti ve sabit maliyettir. $r \in R$ olacak her şekilde her parçanın fırsat maliyeti, h_r , Tablo 14'te gösterilmektedir. Sabit maliyet ise bütün parçalar için sabit olarak 50 euro olarak belirlenmektedir.

PARÇA KÜMESİ (R)	FIRSAT MALİYETİ	PARÇA KÜMESİ (R)	FIRSAT MALİYETİ
1	€ 3.850	9	€ 157,5
2	€ 66	10	€ 341
3	€ 40	11	€ 154
4	€ 27,5	12	€ 407
5	€ 8.250	13	€ 233,7

Tablo 14: Fırsat Maliyeti

Problem varsayımlarından biri, tamir edilebilir kategorisinde yer alan parçaların sonsuz sayıda tamir edilemeyeceğidir. Problem çözümünde, parçanın maksimum tamir edilebilirlik sayısı, “g”, 3 olarak değerlendirilmektedir. Çalışmanın temelinde yer alan varsayımlarından biri de filo kullanılabilirlik değerinin %95’ in altında olması durumundaki ceza maliyetidir. Ceza maliyeti p_k ; kullanılabilirlik değeri “ b_k ”ya göre değişmektedir. Tablo 15’te ceza maliyeti ve kullanılabilirlik ilişkisi görülmektedir.

Kullanılabilirlik Yüzdesi (b_k)	Ceza Maliyeti (p_k)
$b_k \geq 95$	€ 0
$95 > b_k \geq 85$	€ 100
$85 > b_k \geq 75$	€ 150
$b_k < 75$	€ 250

Tablo 15: Kullanılabilirlik Yüzdesi ve Ceza Maliyet İlişkisi

3.3.2 Örnek Olay Çözümü ve Analizi

Bu bölümde, önceki bölümde tanıtılan veriler kullanılarak problem çözülecektir. Problemin sonucunda ortaya çıkan sonuçlar detaylı olarak incelenecektir. İlerleyen bölümlerde ise problem varsayımlar dahil edilmeden çözülecek ve sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılarak değerlendirilecektir.

Amaç, arızalı araçların faal getirilebilmesi için gereken yedek parça ihtiyacını ve onarım maliyetinin yaklaşık olarak elde edilmesidir. Toplam maliyet; yedek parça maliyeti, onarım maliyeti ve kullanılabilirlik değerinin sağlanmadığı durumlarda ortaya çıkan ceza maliyeti parametreleri ile oluşmaktadır. Filoda bulunan 40 aracın 50 adet parça özelinde desteklenmesi kapsamında gerçekleştirilen çözümün sonucunda toplam maliyet 2.388.840,13 € olarak bulunmuştur. Çözümde t zamanında envantere bulunan parça bilgisi Tablo 16'da gösterilmiştir. Tablo 17 ve 18'de ise t zamanlarında parçalar ile ilgili alınan sipariş kararları ve sipariş adetleri gösterilmektedir.

Problem verisinde detayları verilmiş olan 29. parça ile ilgili tamir kararlarının alındığını gösteren bulgular Tablo 19'da gösterilmiştir. Benzer şekilde 29. parça ile ilgili yenisi ile değiştirme kararlarının alındığını gösteren bulgular Tablo 20'de gösterilmiştir. Tablolarda yer alan bulgular incelendiğinde, 29 numaralı parça için toplamda 6 kere tamir kararı alınmış, 2 kere de yenisi ile değiştirme kararı alınmıştır.

Göreceli olarak daha yüksek satın alma maliyetli (€ 165.000) bir parça olan 5 numaralı parça ele alınıp bulgular incelendiğinde, alınan tamir kararı sayısı 12 iken, yenisi ile değiştirme karar sayısı ise 5'dir. 5 numaralı parçanın satın alma kararı sadece 5 kere verilmiştir. 5 numaralı parçanın toplam sahip olması öngörülen arıza miktarı ise Tablo 10'da 17 adet olarak belirtilmiştir. Tablo 16'da yer alan bulgular detaylı olarak incelendiğinde, bütün parçalar için t_1 zamanındaki envanter oranı 0,67 olarak hesaplanmıştır. Çalışmanın temel varsayımı olan arızalı parçaların 2 kere tamir edilip daha sonra tamir edilemez hale gelme durumu sebebiyle, model doğrudan 0,67 envanter değeri ile başlamaktadır. İlerleyen süreçte envantere parça girmesi, parçaların tamir edilerek bir tamir hakkının azalması sebepleriyle envanter durumu sürekli değişmektedir.

İ	1	2	7	8	9	10	11	12	18	19	20	21	22	27	28	29	30
1	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,00	0,00	0,67	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67
2	0,67	0,67	0,67	0,34	0,34	0,00	0,00	0,67	0,34	0,34	0,00	0,00	0,00	0,67	0,67	0,67	0,34
3	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,00	0,00	0,67	0,67	0,67	0,00	0,00	0,00	0,67
4	0,67	0,67	0,67	0,34	0,34	0,34	0,67	0,34	0,67	0,67	0,34	0,34	0,00	0,00	0,67	0,67	0,34
5	0,67	0,67	0,00	0,34	0,34	0,00	0,00	0,00	0,34	0,00	0,67	0,34	0,00	0,34	0,00	0,00	0,00
6	0,67	0,67	0,00	0,67	0,67	0,67	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,67	0,67	0,00	0,67	0,67	0,67
7	0,67	0,67	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34	0,34	0,00	0,00
8	0,67	0,67	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	0,67	0,67	0,34	0,34	0,00	0,00	0,00	0,67
9	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,34	0,67	0,67	0,34	0,34	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,67	0,67	0,67	0,34	0,00	0,67	0,67	0,67	0,34	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	0,67	0,67
11	0,67	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34	0,34	0,00	0,00	0,67	0,67	0,67	0,34	0,34	0,00	0,00
12	0,67	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	0,34	0,34	0,34	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	0,67	0,67	0,34	0,67	0,34	0,00	0,67	0,67	0,67	0,67	0,00	0,34	0,34	0,67	0,34	0,34	0,67
14	0,67	0,67	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34	0,34	0,00	0,00
15	0,67	0,67	0,67	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	0,67	0,67	0,34	0,00	0,00	0,00	0,67	0,34	0,34	0,00	0,00	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,34
17	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	0,67	0,34	0,34
18	0,67	0,67	0,67	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,67	0,34	0,34	0,34	0,34	0,00	0,67	0,67	0,67
19	0,67	0,67	0,00	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	0,67
20	0,67	0,67	0,67	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	0,00	0,00	0,34	0,00	0,00	0,34	0,00	0,00
21	0,67	0,67	0,34	0,00	0,67	0,34	0,00	0,00	0,00	0,34	0,34	0,00	0,00	0,67	0,00	0,00	0,00
22	0,67	0,67	0,34	0,34	0,34	0,34	0,00	0,67	0,67	0,67	0,67	0,34	0,34	0,34	0,34	0,00	0,00
23	0,67	0,67	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	0,34	0,67	0,67	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00
24	0,67	0,67	0,34	0,34	0,34	0,34	0,00	0,00	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,00	0,00	0,67	0,34
25	0,67	0,67	0,67	0,34	0,00	0,00	0,00	0,67	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34	0,34	0,34	0,34
26	0,67	0,67	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,34	0,34	0,34	0,34
27	0,67	0,67	0,34	0,67	0,34	0,34	0,00	1,34	0,67	0,34	0,00	0,67	0,67	0,34	0,34	1,00	0,67
28	0,67	0,67	0,00	0,67	0,67	0,34	0,34	0,34	0,34	0,00	0,00	0,00	0,67	0,34	0,67	0,67	0,67
29	0,67	0,67	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,00	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34	0,34	0,00	0,00
30	0,67	0,67	0,67	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,67	0,67	0,34	0,34	0,34	0,34	0,00	0,67	0,67
31	0,67	0,67	0,34	0,34	0,34	0,34	0,00	0,00	0,67	0,67	0,67	0,34	0,34	0,00	0,67	0,34	0,34
32	0,67	0,67	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34	0,34	0,00	0,00	0,67	0,00	1,67	0,67	0,67
33	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,00	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
34	0,67	0,67	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	0,00	0,67	0,34	0,34	0,00	0,67	0,00	0,00	0,00
35	0,67	0,67	0,34	0,00	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,67	0,67	0,67	0,67
36	0,67	0,67	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
37	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,34	0,34	0,34	0,34
38	0,67	0,67	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	0,00	0,67	0,67	0,67	0,67	0,34	0,34	0,34	0,34
39	0,67	0,67	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34	0,34	0,34	0,34
40	0,67	0,67	0,34	0,34	0,34	0,00	0,67	0,67	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,00	0,00	0,00	0,34
41	0,67	0,67	1,00	1,00	0,67	0,34	0,34	0,34	0,67	0,67	0,34	0,34	0,00	0,67	1,34	0,67	0,67
42	0,67	0,67	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	0,67	0,67	0,67
43	0,67	0,67	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,67	0,67	0,34	0,00	0,00	0,67	0,67	0,00	0,00
44	0,67	0,67	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,00	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,00	0,00	0,67	0,67
45	0,67	0,67	0,67	0,00	0,67	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,00	0,00	0,67	0,00	0,67	0,00	0,00
46	0,67	0,67	0,34	0,34	0,00	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
47	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,34	0,67	0,67	0,00
48	0,67	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
49	0,67	0,67	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34	0,34	0,34	0,34
50	0,67	0,67	0,34	0,34	0,00	0,00	0,67	0,00	0,67	0,34	0,34	0,34	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00

Tablo 16: Parçaların t Zamanında Envanter İhtimal Göstergesi

R	1	2	7	8	9	10	11	12	18	19	20	21	22	27	28	29	30
1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
10	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
11	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0
21	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
25	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
43	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tablo 17: Parçaların t Zamanında Verilen Sipariş Adetleri

S	1	2	3	8	9	10	11	12	17	18	19	20	26	27	28	29	30
1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
2	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
11	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
25	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
38	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
45	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tablo 18: Parçaların t Zamanında Verilen Sipariş Kararları

N	R	1	2	6	7	8	12	13	14	15	16	17	18	19	24	25	26	27	28	29	30
1	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
20	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
21	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	29	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
33	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	29	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
40	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tablo 19: 29. Parça Tamir Kararları

N	R	1	2	6	7	8	12	13	14	15	16	17	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	29	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
20	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tablo 20: 29. Parça Yenisi İle Değişirme Kararları

Kullanılabilirlik durumu ile ilgili bulgular incelendiğinde araçların arızalı olma durumunu ilgili zaman diliminde U_{ntj} karar değişkeni tablosundan 1 veya 0 değerini okunarak görülmektedir. Örnek olarak 6 numaralı aracın kullanılabilirlik değer bulguları Tablo 21’de gösterilmektedir. Tablo 21’de 1 olarak gösterilen değerlerde aracın faal halde olmadığı gözlemlenmektedir. Bu Tabloda düşey zaman dilimi ana zaman dilimini göstermektedir. Yatay zaman dilimi ise kullanılabilirlik durumunun belirlenmesi ve ceza maliyetlerinin hesaplanması için oluşturulan bir alt zaman dilimini göstermektedir.

N	T/j	1	2	3	4	5	6	7	15	16	17	18	19	20	27	28	29	30
6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	7	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	8	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	19	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	23	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	24	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	27	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tablo 21: 6.Aracın Kullanılabilirlik Durumu

Kullanılabilir olmama durumu karşılığında uygulanacak ceza maliyeti için, kullanılabilirlik yüzdesi aralığına göre sınıflandırılmaktadır. Belirtilen sınıflandırma Tablo 22’de belirtilmekte ve dört aralıktan oluşmaktadır. Tablo 22 içerisinde yer alan 1 değerleri, Tablo 15’de belirtilen aralıkların sağlandığını göstermektedir. Birinci sınıfta yer alan 1 değerleri, kullanılabilirlik değerinin %95’ten yüksek olduğunu göstermektedir. Bu sınıfta yer alan 0 değerleri ceza maliyetini gerektirmektedir. Tablo 22’de yer alan bulgular incelendiğinde, $b_k < 75$ aralığında 119 kez 1 değeri alınmıştır. Diğer bir ifade ile 119 j zamanı boyunca kullanılabilirlik değeri %75’in altında yer almış ve en yüksek ceza maliyeti ödenmiştir. $85 > b_k \geq 75$ aralığında 30 kez, $95 > b_k \geq 85$ aralığında ise 18 kez 1 değeri alınmış ve Tablo 15’de belirtilen ceza maliyetleri yansımıştır.

T	b/j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	28	29	30
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
13	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
14	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
15	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
16	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
17	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
28	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
29	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
30	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
6	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
8	2	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
9	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
10	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
11	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
18	2	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
20	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
21	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
23	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
24	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
30	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	3	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
7	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
10	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
11	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
13	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
14	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
15	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
16	3	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
17	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
18	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
19	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
20	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	3	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
25	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
27	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
28	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
29	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
30	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	4	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
7	4	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
8	4	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
9	4	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
10	4	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
11	4	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
12	4	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
13	4	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
14	4	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
15	4	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
17	4	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
18	4	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
19	4	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
20	4	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
21	4	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
23	4	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
24	4	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
25	4	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
26	4	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
27	4	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
28	4	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
29	4	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
30	4	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0

Tablo 22: Ceza Maliyeti – Kullanılabilirlik Yüzdesi İçerisinde Geçen Süre

Problem çözümünde ulaşılan bütün bulgular incelendiğinde toplam 542 kez parçada arızalanma yaşandığı ve bu arızaları gidermek için 163 adet parça sipariş edildiği, 379 kere tamir kararı alındığı ve 163 kez ise yenisi ile değiştirme kararı alındığı bulgusuna ulaşılmıştır. Tamir kararının yenisi ile değiştirme kararından oldukça yüksek olmasının temel sebebi satın alma maliyetinin tamir maliyetinden oldukça yüksek olmasıdır.

Toplam arıza sayısının, 542, yenisi ile değiştirme sayısı 163 ve onarım sayısı, 379, toplamına eşit olması kısıt (2.2) ile sağlanmaktadır.

$$Y_{nrt} + Z_{nrt} = mt_{nrt} \quad \forall n \in N, r \in R, t \in T \quad (2.2)$$

Sipariş edilen parça sayısının 163 adet olması, arızalı parçaların sürekli onarılamayacağındandır. Çalışmanın varsayımlarından biri olan, tamir edilebilir kategorisinde yer alan parçaların sonsuz bir döngüde tamir edilemeyeceği varsayımı, 163 adet yeni parçanın sipariş edilmesine sebep olmuştur. 163 adet yeni parçanın sipariş edilmesi kısıt 2.4, 2.5 ve 2.6 ile sağlanmaktadır.

$$I_{r,t} = I_{r,t-1} + X_{r,t-lt_r} - \sum_n^N \frac{Y_{n,r,t}}{g} - \sum_n^N \frac{Z_{n,r,t}}{g} \quad \forall r \in R, t \in T: t > lt_r \quad (2.4)$$

$$I_{r,t} = I_{r,t-1} - \sum_n^N \frac{Y_{n,r,t}}{g} \quad \forall r \in R, t \in T: t \leq lt_r, t > 1 \quad (2.5)$$

$$I_{r,1} = \frac{g-1}{g} - \sum_n^N \frac{Y_{n,r,1}}{g} \quad \forall r \in R \quad (2.6)$$

3.3.3 Sürekli Tamir Edilememe Varsayımının Olmadığı Senaryo Analizi

Sürekli tamir edilememe varsayımı olmadığında, arızalı parçaların istenildiği kadar tamir edilme yeteneği kazanılacaktır. Bu durumda oluşturulan model, parçaların satın alma maliyeti ile onarım süresi ve dolayısı ile ceza maliyetleri arasında bir yaklaşık karar tahmin çözümü bulmaya çalışacaktır. Bu durumda parçanın maksimum tamir edilebilirlik sayısını gösteren g parametresi artık envanter kararının alınmasında bir anlam taşımayacaktır. Sürekli tamir edilememe kararının alınmasını sağlayan kısıtların kaldırılması ile birlikte model tekrar çözümlenerek bulgulara ulaşılmıştır.

Tamir edilebilirlik kısıtlarının modelden çıkartılmasının ardından model tekrar çözülmüş ve toplam maliyet 824.380,00 € olarak hesaplanmıştır. Tamir kısıtının dahil olmadığı senaryoda hesaplanan maliyet, tamir kısıtının olduğu senaryoda hesaplanan maliyetin yaklaşık 2,89 kat azıdır. Bunun temel sebebi satın alma maliyetlerinin, tamir maliyetinden ve gerçekleşecek ceza maliyetlerinden çok daha yüksek olmasıdır. Bu sebeple bulgular incelendiğinde sipariş edilen parça miktarını gösteren X_{rt} kümesi bütün zaman dilimlerinde ve bütün parçalar için 0 değerini almıştır. Bütün arızalar tamir edilerek giderilmiş C_{r_t} tamir maliyeti bütün arızalar için hesaplanmıştır. Hiçbir parça tedarik edilmediği için fırsat maliyeti oluşmamıştır. Ek olarak filoda yer alan araçların kullanılabilirlik değerlerinde düşüş yaşanmıştır. Model arızalı parçaları tamir etme eğilimine girdiği için tamir için gerekli süre m_{r_t} bütün arızaların giderilmesine eklenmiştir.

3.3.4 Ceza Maliyeti Varsayımının Olmadığı Senaryo Analizi

Ceza maliyeti varsayımının olmadığı senaryoda toplam maliyet 2.352.349,13 € olarak hesaplanmıştır. Ceza maliyeti varsayımının bu çalışmada yer almasının sebebi, gerçek hayatta askeri sözleşmelerde yer almaya başlamasından dolayıdır. Güvenilirlik çalışmalarının ve entegre lojistik destek çalışmalarının son yıllarda hızlı bir şekilde artması, kullanılabilirlik kavramının ve dolayısı ile bu kavramın sağlanmadığı durumlarda bir yaptırım oluşmasına sebep olmuştur. p_k parametresinin 0 kabul edilmesiyle veya ceza kısıtlarının matematiksel modelden kaldırılması ile birlikte model tekrar çözümlenerek sonuca ulaşılmıştır. Ceza maliyetlerinin matematiksel modelden kaldırılması için kısıt 2.7 ve 2.8 çözüme dahil edilmemiştir.

$$\sum_k^K \theta_{tkj} = 1 \quad \forall j \in ST, t \in T \quad (2.7)$$

$$\sum_k^K \theta_{tkj} * b_k \leq 1 - \frac{\sum_n^N U_{nti}}{|N|} \quad \forall j \in ST, t \in T, k \in K \quad (2.8)$$

Ceza maliyetinin kaldırılması ile birlikte amaç fonksiyonu 3.1'de ki gibi olmaktadır.

Min Z:

$$\begin{aligned}
 & \sum_r^R \sum_t^T X_{rt} * C_r + \sum_r^R \sum_t^T Fm_{rt} * h_r \\
 & + \sum_n^N \sum_r^R \sum_t^T Y_{nrt} * Cr_r + \sum_n^N \sum_r^R \sum_t^T Z_{nrt} * Cr_r - \sum_r^R \sum_t^T X_{rt} * Cr_r \\
 & + \sum_r^R \sum_t^T A * S_{rt}
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Ceza maliyeti varsayımının kaldırılması ile birlikte kullanılabilirlik kısıtının kaldırılması doğru bir yaklaşım olmamaktadır. Diğer bir ifade ile ceza maliyetinin kaldırılması, araçları tekrar faal hale getirme süresini etkilememelidir. Bu çalışmada da ceza maliyetinin kalkması, arızalı parçanın onarım veya yenisi ile değiştirme kararını etkilememektedir. Ceza maliyetine katlanılmaması, askeri araçların daha geç bir sürede faal hale getirebileceği anlamına gelmemektedir. Bu yaklaşım gerçek hayatta karşılığı olmayan bir senaryo yaratmaktadır.

3.3.5 Varsayımların Karşılaştırılması

Problem çözümü iki varsayım ile değerlendirilmiştir. Birinci varsayım sürekli tamir edilememe durumu varsayımdır. İkinci varsayım ise ceza maliyeti varsayımının çözüme dahil edilmediği durumdur. Bu varsayımlardan en gerçekçi olanı ve güncel savunma sanayi projelerinde sözleşmesel gereksinim olarak yer alan ceza maliyetidir. Ceza maliyeti istenilen kullanılabilirlik durumlarının sağlanamadığı durumlarda uygulanan bir kriterdir. Bu sebeple ceza maliyetini lojistik hesaplarına dahil etmemek hatalı lojistik hesaplara yol açacaktır.

Sürekli tamir edilememe varsayımı ise parçaların tasarımlarından kaynaklı bir durumdur. Ancak savunma sanayi projelerinde ayrı bir konuma sahip olan, tamir edilebilir parça kategorisinde yer alan bütün parçaların sürekli tamir edilebilir olma durumu, gerçek hayatta bir karşılığının olmaması sebebiyle yanlış lojistik

hesaplamalara yol açacaktır. Bu sebeple iki varsayımında dahil olduğu matematiksel model daha gerçekçi sonuçları ortaya çıkarmaktadır.

Ceza maliyetinin olmadığı senaryoda toplam maliyet 2.388.840,13 € olarak hesaplanmıştır. Ceza maliyetinin dahil olduğu yaklaşımda ise toplam maliyet 2.352.349,13 € olarak hesaplanmıştır. İki yaklaşım arasında 36.491,00 €'luk bir fark bulunmaktadır. Ceza varsayımının olmadığı durum ile olduğu durum arasın %1,53 değerinde farklı sonuç bulunmaktadır. %1,53 değeri göreceli olarak çok az olarak değerlendirilebilir ancak bu oran ceza maliyetlerinin artması, ele alınan araç sayısının artması veya çeşitli tasarım, üretim kaynaklı sebepler ile artabilecektir.

Tamir edilebilir parça kategorisinde yer alan parçaların, her durumda sonsuz kez tamir edilebilir olduğu durum ele alındığında ortaya çıkan lojistik maliyet 824.380,00 € olarak hesaplanmıştır. Tamir edilememe varsayımı ile bu varsayımın dahil edilmediği senaryo arasında 2,89 kat fark vardır. Bu sebeple tamir edilebilir kategorisinde yer alan parçaların hepsinin sonsuz sayıda veya ömür devri boyunca sürekli tamir edilebileceği öngörüsü ile gerçekleştirilen lojistik hesaplar araç sayısına, araç içerisinde yer alan tamir edilebilir parça miktarına bağlı olarak çok büyük hatalı sonuçlar hesaplanmasına sebep olacaktır.

SONUÇ

Savunma sanayi kapsamında faaliyet gösteren ve savunma sanayine araç, ekipman veya hizmet sağlayan işletmeler, ürettikleri ve ilgili savunma sanayi kuruluşuna sağladıkları teslimat kalemlerinin gerek sözleşmesel garanti sürecini gerekse ömür devrini optimum şekilde destekleyebilmek için etkili karar verme süreçlerini kullanmayı amaçlamaktadır. İşletmelerin optimum desteklenebilirlik faaliyetini gerçekleştirebilmesi için oldukça fazla karar vermesi gerekebilir. Verilen bu kararlar doğrudan veya dolaylı olarak işletmenin sözleşme şartlarını yerine getirmesini, müşteri memnuniyetini, kar – zarar dengesini ve hizmet kalitesini etkilemektedir.

Yaşanan teknolojik değişiklikler, endüstri faaliyetlerinin hızlı bir şekilde gelişimi ve gerçekleşen endüstri devrimleri ile savunma sanayinde kullanılan araç ve ekipman çeşitliliği artmıştır. Milli savunma unsurlarının ihtiyaçları çerçevesinde artan araç ve ekipman çeşitliliğinin, ulusal güvenlik anlamında birçok faydasının bulunmasına karşın lojistik anlamında çok büyük bir zorluk ve karışıklık etkisi bulunmaktadır. Özellikle ikinci dünya savaşından sonra lojistik faaliyetlerinin önemi ve savaş sonuçlarına etkisi bütün çevreler tarafından oldukça kritik bir noktaya taşınmıştır. Lojistik faaliyetlerinin standartlaştırılması ve bir kurallar çerçevesine oturtulmaya başlanması ile bu alanda yapılan çalışmalar ve araştırmalar oldukça artış göstermiştir. Lojistik faaliyetlerinin temelinde yer alan envanter yönetimi ve kullanılabilirlik kavramı, güvenlik unsurlarının öncelikli kriterleri olarak çalışmalarda ve güvenlik unsurlarının yönetim programlarında yer almaya başlamıştır.

Envanter yönetiminin planlanmasında, gelecekte oluşabilecek arızaların ön görülmesi oldukça yüksek öneme sahiptir. Yüksek güvenilirlik değerine sahip olan ekipman veya araç üretmek envanter yönetiminin kolaylaştırılmasını sağlasa da envanter yönetiminde kullanılacak yaklaşımı etkilememektedir. Yüksek güvenilirliğe sahip tasarımlar sadece envanter yönetiminin kapsamını daraltabilmektedir. İşletmelerin ekipman veya araçlarının ömür devri planlamasını gerçekleştirirken, kullanılan yöntem detaylı şekilde incelenmeli ve muhtemel sonuçları analiz edilmelidir. Envanter yönetimi planlamasının etkin bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için, sözleşmesel hususlar, tasarımsal zafiyetler, alt yüklenici yetenekleri ve çıktıları, üretilen ürünlerin kullanım konsepti ve kullanım profili dikkate alınmalıdır. Kullanım profilinden, kullanıcı yeteneklerinden ve sahip olunan saha verilerinden bağımsız gerçekleştirilen envanter planlaması, ilerleyen süreçte birçok zafiyeti sebep olabilir.

Envanter planlaması kapsamında literatürde kullanılabilecek farklı matematiksel modeller yer almaktadır. Literatürde yer alan matematiksel modeller, işletmeler için faydalı bir şekilde kullanılabilir. Matematiksel modellerin, gerçek hayatta yaşanan durumları, güncel uygulamaları ve sahip olunan tecrübeleri, hiçbir kayıp olmadan birebir modellemesi oldukça zordur. Geçmişten gelen tecrübeler ve gerçek alanda yaşanan durumlarda oldukça fazla değişken ve parametre yer almaktadır. Gerçek hayatta yer alan bütün değişkenleri ve parametreleri matematiksel model içerisinde kullanmak neredeyse modellerde imkansızdır. Bunlara ek olarak gerçek hayatta hiçbir şekilde öngörülemeyen veya gerçekleşmesinin mümkün olmadığı düşünülen durumlar yaşanabilmektedir. Bütün bu sebepler neticesinde, geliştirilen matematiksel modeller, varsayımlar, belirli kısıtlar ve çözümlenebilir veriler ile oluşturulmaktadır.

Bu çalışmada yer alan varsayımlar, tamir edilebilen statüsünde yer alan parçaların aslında her zaman tamir edilemediği, kullanılabilirlik oranının belirlenen oranın altına düştüğü zaman ortaya çıkan ceza durumu ve zamana bağlı parça arıza fonksiyonunun hangi araç için gerçekleştiğinin bilindiği varsayımlardır. Tamir edilebilen statüsünde yer alan her parçanın tamir

edilememe varsayımı ile matematiksel model gerçek hayata daha yakınlaşmıştır. Saha verileri incelendiğinde toplamda tamir edilebilen statüsünde yer alan parçaların yaklaşık %33' nün tamir edilemediği gözlemlenmiştir. Gerçekleştirilen literatür araştırmasında, tamir edilebilen parçaların aslında bir kısmının tamir edilemediği, ek olarak kullanılabilirlik kavramının yer aldığı ve sağlanmadığı durumlarda bir ceza maliyetinin ortaya çıktığı bir model bulunamamıştır. Bu sebeple, oluşturulan yaklaşık karar tahmin modelinin envanter planlamasına destek vereceği düşünülmektedir.

Bu çalışmada yer alan varsayımlar, saha verilerinin incelenip, güvenilirlik yaklaşımları ile değerlendirilmesiyle oluşturulmuşlardır. Güvenirlik yaklaşımları sebebiyle problem çözümünde kullanılan verilerin kesinliği yoktur. Bu veriler gerçeğe bir yakınsama olarak ele alınmaktadır. Bu sebeple problem çözümünde kullanılan matematiksel model, yaklaşık karar tahmini modeli olarak sunulmaktadır. Bu model ile elde edilen çözüm, envanter yönetimi ve planlamasında bir yol gösterici ve destek unsuru olarak kullanılabilir.

Matematiksel modelin çalıştırılması ve analizlerinde yapılması için oluşturulan problemde, 40 araç, her araç kapsamında 50 alt parça ve envanter yönetiminin uygulanacağı 30 bölümlük zaman aralığı kullanılmıştır. Problemde yer alan araç sayısı, alt parça sayısı ve zaman aralığı, orta ölçekli savunma sanayi kara araçları projeleri baz alınarak belirlenmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde problemin ana varsayımı olan tamir edilebilen parçaların tamir edilememe durumu probleme dahil edilmediğinde çok düşük maliyetli bir envanter sonucu karşımıza çıkmaktadır. Tamir edilebilen parçaların %33'nün tamir edilememe varsayımı probleme eklendiğinde ortaya çıkan maliyet yaklaşık 2,89 kat daha fazla olmaktadır. Varsayımın dahil olmadığı senaryoda ortaya çıkan düşük maliyet çok daha uygun gözükse de gerçek hayatta karşılığı olmayan ve işletmelerin ilerleyen süreçte maliyetler anlamında oldukça olumsuz etkileneceği bir sonuç çıkartmaktadır.

Problemin ana varsayımlarından biri olan kullanılabilirlik varsayımının dahil edilmediği senaryo, kullanılabilirlik yüzdesinin herhangi bir cezai işleme sebep

olmadığı kabul edilerek yeniden çözülmüştür. Bu senaryoda ortaya çıkan maliyet, kullanılabilirlik varsayımının eklenerek çözülen maliyetten %1.53 daha düşüktür. Ortaya çıkan düşük maliyet uygun gibi gözükse de son yıllarda imzalanan savunma sanayi sözleşmelerinde karşılığı olmayan bir durumdur.

Çalışmada yer alan model 40 araç, 50 alt parça ile çözülmüştür. Araç sayısının artması ve alt parça sayısının artması ile birlikte, varsayımların dahil edilmediği durumlar ve edildiği durumlar arasından ortaya çıkan maliyet farkı mevcut durumdan oldukça yüksek olacağı söylenebilir.

Bu çalışma ile, arızalı parçaların hepsinin tamir edilememe varsayımı ve kullanılabilirlik varsayımı ile envanter planlama sorunun çözümünde alınan sonuçlardaki değişim gözlemlenmiştir. Bu varsayımların dahil edilmediği senaryolarda, gerçek hayatta işletmeleri maliyet ve yönetim anlamında zor duruma düşürecek ve yanlış kabul edilebilecek sonuçlar ortaya konmuştur. Bu sebeple belirtilen varsayımların, envanter yönetimi ve planlamasına dahil edilmesinin gerekliliği ortaya konmuştur. İlerleyen çalışmalarda belirtilen matematiksel modele, tamir için ihtiyaç duyulan alt parçaların da planlaması eklenerek envanter yönetimi daha kapsamlı hale getirilebilir.

KAYNAKÇA

- Ahmad, R., & Kamaruddin, S. (2012). An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application. *Computers & industrial engineering*, 63(1), 135-149
- Alavian, P., Eun, Y., Meerkov, S. M., & Zhang, L. (2020). Smart production systems: automating decision-making in manufacturing environment. *International Journal of Production Research*, 58(3), 828-845.
- Al-Momani, H., Al Meanazel, O. T., Kwaldeh, E., Alaween, A., Khasaleh, A., & Qamar, A. (2020). The efficiency of using a tailored inventory management system in the military aviation industry. *Heliyon*, 6(7), e04424.
- Asha, G., & Unnikrishnan Nair, N. (2010). Reliability properties of mean time to failure in age replacement models. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 17(01), 15-26.
- Azid, N. A. A., Shamsudin, S. N. A., Yusoff, M. S., & Samat, H. A. (2019, June). Conceptual analysis and survey of total productive maintenance (TPM) and reliability centered maintenance (RCM) relationship. In *IOP Conference series: materials science and engineering* (Vol. 530, No. 1, p. 012050). IOP Publishing.
- Barabady, J. (2005). *Improvement of system availability using reliability and maintainability analysis* (Doctoral dissertation, Luleå tekniska universitet).
- Bahrack, H. P., & Hall, L. K. (1991). Preventive and corrective maintenance of access to knowledge. *Applied Cognitive Psychology*, 5(1), 1-18.

- Basten, R. J., Van der Heijden, M. C., & Schutten, J. M. (2012). Joint optimization of level of repair analysis and spare parts stocks. *European journal of operational research*, 222(3), 474-483.
- Bıçakçı vd Bıçakcı, İ., İç, Y. T., Karasakal, E., & Dengiz, B. (2022). A Multi-Objective Mathematical Model for Level of Repair Analysis with Lead Times and Multi-Transportation Modes. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 21(01), 423-440.
- Blanchard, B. S. (1967). Cost effectiveness, system effectiveness, integrated logistics support, and maintainability. *IEEE Transactions on Reliability*, 16(3), 117-126.
- Bromley, R. C., & Bottomley, E. (1994, January). Failure modes, effects and criticality analysis (FMECA). In IEE Colloquium on Masterclass in Systems Engineering-Part Two (pp. 1-1). IET.
- Chen, D., & Trivedi, K. S. (2001, December). Analysis of periodic preventive maintenance with general system failure distribution. In Proceedings 2001 pacific rim international symposium on dependable computing (pp. 103-107). IEEE.
- Choi, B., & Suh, J. H. (2020). Forecasting spare parts demand of military aircraft: Comparisons of data mining techniques and managerial features from the case of south korea. *Sustainability*, 12(15), 6045.
- Dekker, R., Pinçe, Ç., Zuidwijk, R., & Jalil, M. N. (2013). On the use of installed base information for spare parts logistics: A review of ideas and industry practice. *International Journal of Production Economics*, 143(2), 536-545.
- Ducros, F., & Pamphile, P. (2019). Maintenance cost forecasting for a fleet of vehicles.

- Eaves, A. H., & Kingsman, B. G. (2004). Forecasting for the ordering and stock-holding of spare parts. *Journal of the Operational Research Society*, 55(4), 431-437.
- Gavrilov, L. A., & Gavrilova, N. S. (2005). Reliability theory of aging and longevity. *Handbook of the Biology of Aging*, 3-42.
- Goshorn, J. A., Deegan, E. M., & Layton, B. E. (2010). Spare part storage optimization onboard deployable military support assets. *Naval Engineers Journal*, 122(1), 137-147.
- Guo, B., & Chen, J. (2013). Analysis of MTBF/MTTR for logistics service system. In *ICTE 2013: Safety, Speediness, Intelligence, Low-Carbon, Innovation* (pp. 2868-2875).
- Lee, H., & Kim, J. (2018, December). A Predictive Model for Forecasting Spare Parts Demand in Military Logistics. In *2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)* (pp. 1106-1110). IEEE.
- Katukoori, V. K. (1995). Standardizing availability definition. University of New Orleans, New Orleans, La., USA.
- Krasich, M. (2009, January). How to estimate and use MTTF/MTBF would the real MTBF please stand up?. In *2009 Annual Reliability and Maintainability Symposium* (pp. 353-359). IEEE.
- Lai, C. D., Murthy, D. N., & Xie, M. (2006). Weibull distributions and their applications. In *Springer Handbooks* (pp. 63-78). Springer.
- Liu, W., Liu, K., & Deng, T. (2020). 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*, 58(10), 3090-3109.

- Macheret, Y., Koehn, P., & Sparrow, D. (2005, March). Improving reliability and operational availability of military systems. In *2005 IEEE Aerospace Conference* (pp. 3948-3957). IEEE.
- Mcleod, R. B. (1975). Integrated logistics support (ILS): How and why. *IEEE Transactions on Engineering Management*, (4), 150-152.
- Mirzahosseini, H., & Piplani, R. (2011). A study of repairable parts inventory system operating under performance-based contract. *European Journal of Operational Research*, 214(2), 256-261.
- Parida, A., Kumar, U., Galar, D., & Stenström, C. (2015). Performance measurement and management for maintenance: a literature review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 21(1), 2-33.
- Qian, Z., Shenyang, L., Zhijie, H., & Chen, Z. (2017). Prediction model of spare parts consumption based on engineering analysis method. *Procedia engineering*, 174, 711-716.
- Rezaei, H., Baboli, A., Shahzad, M. K., & Tonadre, R. (2018). A new methodology to optimize target stock level for unpredictable demand of spare parts: A Case Study in Business Aircrafts' Industry. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 538-543.
- Sharma, P., Kulkarni, M. S., & Yadav, V. (2018). A simulation based optimization approach for spare parts forecasting and selective maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, 168, 274-289.
- Selçuk, B., & Ağralı, S. (2013). Joint spare parts inventory and reliability decisions under a service constraint. *Journal of the Operational Research Society*, 64(3), 446-458.
- Shukla, S. K., Kumar, S., Selvaraj, P., & Rao, V. S. (2014). Integrated logistics system for indigenous fighter aircraft development program. *Procedia Engineering*, 97, 2238-2247.

- Tian, X., Wang, H., & Erjiang, E. (2021). Forecasting intermittent demand for inventory management by retailers: A new approach. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 62, 102662.
- Vaez-Alaei, M., Atashbar, N. Z., Baboli, A., & Tonadre, R. (2018, November). Target stock level and fill rate optimization for worldwide spare parts inventory management: A case study in business aircraft industry. In *2018 IEEE International Conference on Technology Management, Operations and Decisions (ICTMOD)* (pp. 282-287). IEEE.
- Walker, J. (1997). Base stock level determination for “insurance type” spares. *International journal of quality & reliability management*.
- Yang, K., & Niu, X. (2009, October). Research on the spare parts inventory. In *2009 16th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management* (pp. 1018-1021). IEEE.

EK 1. ORİJİNALLİK RAPORU

EK 2. ETİK KURUL / KOMİSYON İZİNİ YA DA MUAFİYET FORMU