



**PERFORMANSA DAYALI LOJİSTİK SİSTEMİNDE ÇOK AMAÇLI
MODELLEME VE ÇÖZÜM YAKLAŞIMI**

Cem MALYEMEZ

**DOKTORA TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ŞUBAT 2019

Cem MALYEMEZ tarafından hazırlanan “PERFORMANSA DAYALI LOJİSTİK SİSTEMİNDE ÇOK AMAÇLI MODELLEME VE ÇÖZÜM YAKLAŞIMI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Ömer Faruk BAYKOÇ

Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Serpil EROL

Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Lale ÖZBAKIR

Yöneylem Araştırması Ana Bilim Dalı, Erciyes Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Feyzan ARIKAN ÖKTEMER

Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Ümit Sami SAKALLI

Yöneylem Araştırması Ana Bilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 08/02/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

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

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

Cem MALYEMEZ

08/02/2019

PERFORMANSA DAYALI LOJİSTİK SİSTEMİNDE ÇOK AMAÇLI MODELLEME VE ÇÖZÜM YAKLAŞIMI

(Doktora Tezi)

Cem MALYEMEZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2019

ÖZET

Bu çalışmada, ürün ömür devri maliyetlerinin düşürülmesine yönelik olarak son yıllarda ortaya çıkan Performansa Dayalı Lojistik (PDL) yaklaşımı el alınmıştır. Söz konusu yaklaşımın klasik lojistik analiz yöntemlerinden olan farklılıkları nedeniyle varolan lojistik problemlerinin yeniden modellenmesi gerekmekte olup, bu gereklilik ve ilgili literatürde bu alandaki eksiklik tezin temel motivasyonudur. Bu doğrultuda Onarım Seviyesi Analizi (OSA) ve Yedek Parça Tahsis Problemi (YTP) çok amaçlı olarak modellenmiştir. İlk aşamada OSA problemi çok amaçlı olarak modellenmiş ve oluşturulan model Geliştirilmiş Epsilon Kısıt Yöntemi (AUGMECON2) kullanılarak GAMS ile çözülmüştür. İkinci aşamada ise pratikte karşılaşılabilecek ve daha önceki çalışmaların çoğunda dikkate alınmayan parametrelerin ele alındığı ve uçak sistemlerini temel alan benzetim modeli oluşturulmuştur. “R” programlama dilinde oluşturulan modelin benzetim optimizasyonu için Tavlama Benzetimi yöntemi kullanılmış ve öncelikle YTP’ye ilişkin çözüm elde edilmiştir. Daha sonra bu modele OSA problemi de bir karar değişkeni olarak eklenmiş ve bütünleşik çözümün katkısı incelenmiştir. Yapılan değerlendirmeler neticesinde bütünleşik çözümün daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Geliştirilen modelin, çalışmada ele alınan lojistik analiz problemleri için kâr odaklı bir yaklaşım ortaya koyduğu, oldukça karmaşık ve tek bir fiyat algoritması ile belirlenmesi güç olan lojistik destek faaliyetleri için gerek üreticiler gerekse kullanıcılar açısından karar desteği sağlayabileceği, bunların da PDL konusunda yapılacak görüşmelerde ve PDL sözleşmesine ait isteklerin belirlenmesinde etkin bir şekilde kullanılabileceği düşünülmektedir.

Bilim Kodu : 90610

Anahtar Kelimeler : Performansa Dayalı Lojistik, Onarım Seviyesi Analizi, Yedek Parça Tahsis Problemi, Benzetim Optimizasyonu.

Sayfa Adedi : 87

Danışman : Prof. Dr. Ömer Faruk BAYKOÇ

MULTI-OBJECTIVE MODELING AND SOLUTION APPROACH IN PERFORMANCE
BASED LOGISTICS SYSTEM

(Ph. D. Thesis)

Cem MALYEMEZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2019

ABSTRACT

In this study, the Performance Based Logistics (PBL) approach that has emerged in recent years in order to reduce the product life-cycle costs is considered. The existing logistics analysis methods need to be reassessed due to the differences in the aforementioned approach from the classical ones. This necessity and the gap in the related literature is the main motivation of the dissertation. In this direction, Level of Repair Analysis (LORA) and Spare Part Allocation (SPA) problem are modeled with multiple objectives. In the first stage, the multi-objective LORA problem is modelled and solved by GAMS via using Augmented ε -constraint Method (AUGMECON2) method. In the second stage, a simulation model based on aircraft systems has been formed, which could be encountered in practice and taken into consideration the parameters excluded from most of the previous studies. For simulation optimization of the model which is created in “R” programming language, Simulated Annealing method has been used and the SPA model was solved initially. Then the LORA problem was added to this model as a decision variable and the contribution of the integrated solution was examined. As a result of the evaluations, it was seen that the integrated solution yields better results. The developed model provides a profit-centric approach for the logistic analysis problems discussed in this study, which can be used as a decision support for both the manufacturers and users for logistic support activities which are very complex and difficult to determine with a single pricing algorithm. It can also be used in PBL negotiations or determining the requirements of the PBL contract.

Science Code : 90610

Key Words : Performance-Based Logistics, Level of Repair Analysis, Spare Parts Allocation, Simulation Optimization.

Page Number : 87

Supervisor : Prof. Dr. Ömer Faruk BAYKOÇ

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının başarı ile tamamlanmasına olan katkıları nedeniyle danışman hocam Prof.Dr. Ömer Faruk BAYKOÇ'a, yaptıkları yönlendirmeler ile tez çalışmasının niteliğinin gelişmesine katkılar sağlayan Tez İzleme Komitesi üyeleri Prof.Dr. Lale ÖZBAKIR ve Doç.Dr. Feyza ARIKAN ÖKTEMER'e sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Akademik çalışmalarımı yoğun iş temposu içerisinde yapabilmeme imkân veren, bu konuda her türlü kolaylığı sağlayan ve bana destek olan çalışma arkadaşlarıma da şükranlarımı sunarım.

Sadece doktora eğitimim süresince değil, hayatımın her aşamasında bana desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen başta sevgili eşim Aslı ve biricik kızım Bade olmak üzere tüm aile bireylerime ve sevdiklerime sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. PERFORMANSA DAYALI LOJİSTİK (PDL), ONARIM SEVİYESİ ANALİZİ (OSA) VE YEDEK PARÇA TAHSİS PROBLEMLERİNE (YTP) GENEL BAKIŞ	9
2.1. Performansa Dayalı Lojistik (PDL)	9
2.2. Onarım Seviyesi Analizi (OSA).....	17
2.3. Yedek Parça Tahsis Problemi (YTP)	20
2.4. OSA ve YTP'nin Bütünleşik Optimizasyonu	22
3. ÇOK AMAÇLI ONARIM SEVİYESİ ANALİZİ (OSA) MODELİ	25
3.1. Modelin Varsayımları	27
3.2. Kullanılan Notasyonlar	27
3.3. Matematiksel Model.....	28
3.4. Modelin Çözümü ve Sonuçların Analizi.....	30
4. YEDEK PARÇA TAHSİS PROBLEMİ (YTP) MODELİNİN ÇOK AMAÇLI BENZETİM OPTİMİZASYONU	39
4.1. Benzetim Modeli	40
4.1.1. Benzetim modeli parametreleri	41
4.2. Optimizasyon Algoritması	46

	Sayfa
4.3. Benzetim Modelinin Çalıştırılması	48
4.3.1. Benzetim optimizasyonu ve tavlama benzetimi parametrelerinin belirlenmesi.....	49
4.3.2. YTP'nin çok amaçlı benzetim optimizasyonu	51
4.3.3. YTP ve OSA'nın bütünleşik çok amaçlı benzetim optimizasyonu.....	52
4.3.4. İki yaklaşımın karşılaştırılması	53
5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....	59
KAYNAKLAR	63
EKLER.....	69
EK-1. Benzetim optimizasyonuna ait “R” kodu	70
EK-2. Deney tasarımı için kullanılan dizayn noktaları.....	85
EK-3. TOPSIS değerlendirmesi sonuçları	86
ÖZGEÇMİŞ	87

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Örnek PDL uygulamaları.....	12
Çizelge 3.1. Parametre bilgileri	32
Çizelge 3.2. Amaç fonksiyonu aralıkları (Ödemeler tablosu – Payoff table).....	33
Çizelge 3.3. Farklı arama aralıkları sonuçları (12 parça).....	34
Çizelge 3.4. Farklı arama aralıkları sonuçları (500 ve 1000 parça).....	35
Çizelge 4.1. Analiz parametrelerine ait seviyeler	50
Çizelge 4.2. En iyi dizayn noktası	51
Çizelge 4.3. YTP'nin çok amaçlı benzetim optimizasyonu sonuçları.....	52
Çizelge 4.4. YTP ve OSA'nın bütünleşik çok amaçlı benzetim optimizasyonu sonuçları.....	53
Çizelge 4.5. Nihai pareto optimum çözüm kümesi temsil oranları.....	56

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Ömür devri maliyeti buzdağı modeli	1
Şekil 1.2. Ömür devri maliyeti bileşenleri	3
Şekil 2.1. PDL veklasik yaklaşım karşılaştırılması	11
Şekil 2.2. Ürün yapısı.....	18
Şekil 2.3. Onarım seviyeleri.....	18
Şekil 3.1. Ürün yapısı (12 Parça)	31
Şekil 3.2. 50 Arama aralığına ait çözümler.....	34
Şekil 3.3. Arama aralığı – pareto optimum çözüm sayısı	36
Şekil 3.4. Pareto optimum çözüm sayısı – çözüm süresi	36
Şekil 4.1. Benzetim modeli aşamaları.....	45
Şekil 4.2. 30 parça için karşılaştırma	54
Şekil 4.3. 60 parça için karşılaştırma	54
Şekil 4.4. 150 parça için karşılaştırma	55
Şekil 4.5. 300 parça için karşılaştırma	55

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

\$	Amerikan Doları
bp	Birim para
kg	Kilogram
sa	Saat
sn	Saniye

Kısaltmalar

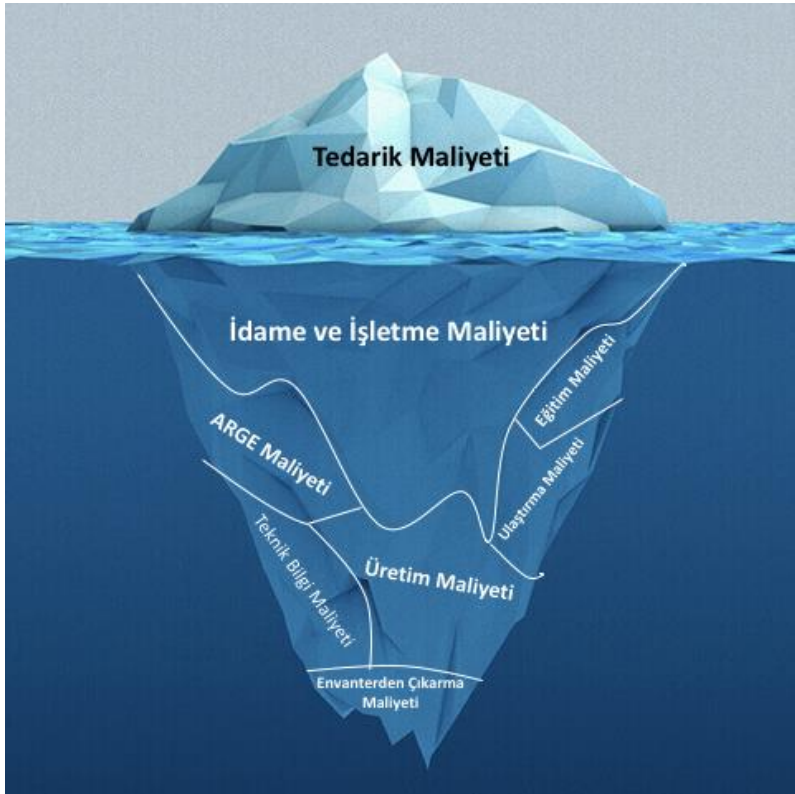
Açıklamalar

MIN	Minimum
OSA	Onarım Seviyesi Analizi
PDL	Performansa Dayalı Lojistik
TUSAŞ	Türkiye Havacılık ve Uzay Sanayi Anonim Şirketi
YTP	Yedek Parça Tahsis Problemi

1. GİRİŞ

Bu bölümde, lojistik analizlerde dikkate alınan hususlar, Performansa Dayalı Lojistik (PDL) sistemi yaklaşımı, PDL'nin ortaya çıkış nedenleri ve PDL yaklaşımının mevcut yöntemler üzerinde yarattığı değişiklikler ile bu kapsamda yapılacak tez çalışmasının amacı ve literatüre katkıları sunulacaktır.

Savunma sanayi, uzay, ulaştırma, enerji, vb. alanlarda kullanılan sistemler genellikle uzun ömür sürelerine sahiptirler ve gerek ilk satın alma maliyetleri gerekse idame işletme maliyetleri açısından oldukça pahalı sistemlerdir. Bahse konu sistemler aynı zamanda karmaşık bir yapıya sahip olup, ileri teknolojik ürünler olarak ifade edilmektedirler. Bu sistemler tedarik edilirken yalnızca satın alma maliyetlerinin dikkate alınmaması, buna ilave olarak özellikle idame ve işletme aşaması olmak üzere ömür devri yönetimi içerisinde gerçekleştirilecek faaliyetler ve bunların maliyetlerinin de göz önünde bulundurulması oldukça önemlidir. Aslında tedarik maliyeti Şekil 1.1’de görüldüğü gibi buzdağının görünen kısmı olup, buzdağının altında kalan ve ömür devri içerisinde yer alan birçok farklı maliyet türü de mevcuttur.

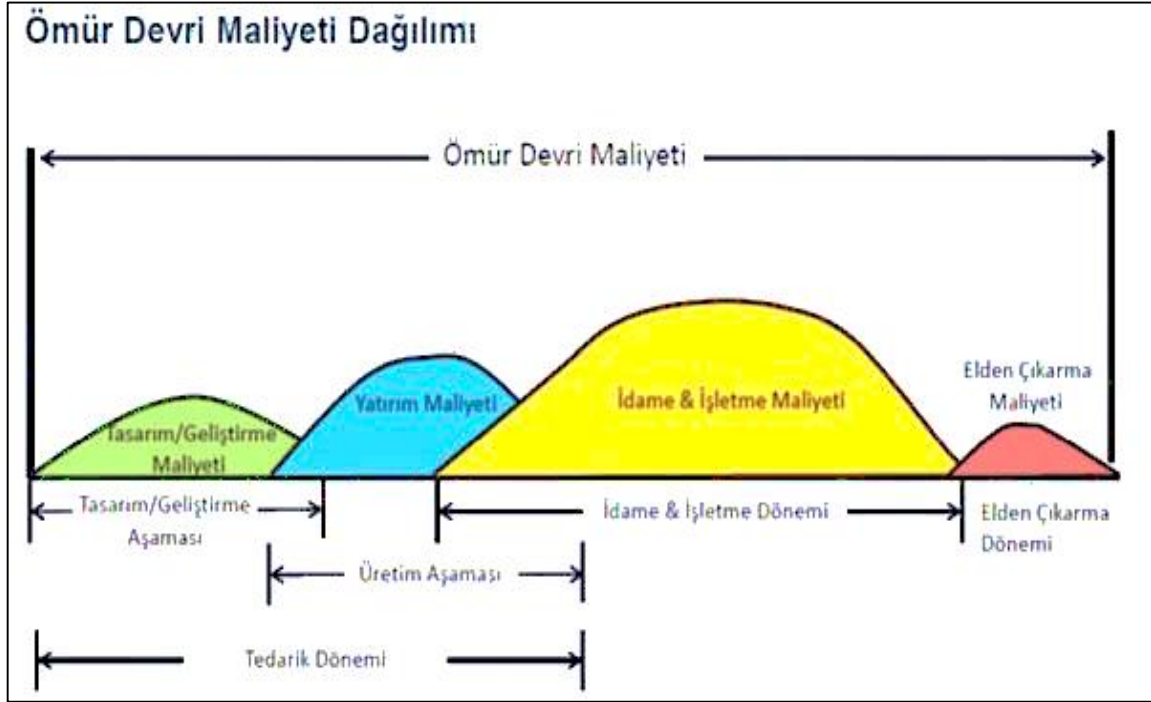


Şekil 1.1. Ömür devri maliyeti buzdağı modeli

İlk satın alma maliyeti yüksek bir sistemin toplam ömür devri maliyeti, ilk satın alma maliyeti düşük olan bir sisteme göre daha düşük olabilir. Aslında ürünlerin, sistemlerin uzun dönemde daha maliyet etkin olarak desteklenebilmesi için tasarım ve üretim aşamalarında daha maliyetli hareket tarzlarının tercih edilmesi beklenen bir yaklaşım olmaktadır. Çünkü başlangıçta yapılan yatırımlar ve tasarımlar ile güvenilirliği yüksek, arıza yapma oranları düşük ürünler geliştirilebilecektir. Birçok alanda olduğu gibi tüm bu faaliyetler esnasında da bütünsel bir yaklaşım sergilemek, problemin karmaşıklık boyutunu artıracak olsa da daha sağlıklı sonuçlara ulaşabilmeyi temin edebilecektir.

Ömür devri yönetimi, bir sistemin oluşturulmasına/üretilmesine ait fikrin ortaya çıkmasından başlayıp, o sistemin envanter dışına çıkarılması ve hatta âtıl/atık duruma düşen sistemin doğadan yok edilmesi veya doğaya tekrar kazandırılmasına kadar geçen süreç içerisinde yer alan, çok geniş yelpazedeki faaliyetlerin bir bütün içerisinde ele alınması ve yönetilmesidir. Ömür devri maliyeti de tüm bu faaliyetlerin ekonomik sonuçlarıdır. Bu maliyet kalemlerinden bir kısmı üreticilerin sorumluluğunda iken, büyük bir kısmı ise kullanıcının yürüttüğü faaliyetler kapsamında oluşmaktadır. Oysaki, özellikle profesyonel yaklaşımların sergilenmediği şirket ve kurumlarda maliyet olarak sadece ilk satın alma maliyetleri algılanmakta, kararlar bu maliyetlere göre verilmektedir. Bu yaklaşımın da birçok örnekte yanlış alternatiflere yönelmeye neden olması kaçınılmazdır. Bu konularda sağlıklı kararlar verebilmek için detaylı analitik çalışmalar icra edilmeli ve bu çalışmaların sağlayacağı karar desteği neticesinde kararlar verilmelidir.

Ömür devri maliyetinin temel bileşenleri; tasarım/geliştirme maliyeti, yatırım ve üretim maliyeti, idame ve işletme maliyeti ile elden çıkarma maliyetinden oluşmakta olup, Şekil 1.2'de görüldüğü gibi ömür devri maliyetinin büyük bir bölümünü idame ve işletme maliyeti oluşturmaktadır. Tasarım/geliştirme maliyeti kapsamında; ARGE maliyeti, fizibilite çalışmaları, mühendislik tasarımları ve bunları gerçekleştirmek için icra edilecek idari faaliyetlere ilişkin maliyetler dikkate alınmaktadır. Yatırım maliyetinin kapsamında temel olarak üretim ve tesis maliyeti yer almaktadır. İdame ve işletme maliyeti ise sistemin/ürünün ömür devri boyunca kullanımı ve buna bağlı olarak sağlanacak lojistik desteğe ilişkin maliyetlerden oluşmaktadır. Elden çıkarma maliyeti ise etkin ömrünü tamamlamış ürün ve sistemlerin envanter dışına çıkarılması kapsamında oluşan maliyetleri kapsamaktadır.



Şekil 1.2. Ömür devri maliyeti bileşenleri (MSI, 2018)

Lojistik analiz çalışmaları açısından ise ömür devri yönetimi sürecinin temelde iki bölüme ayrılacağı belirtilmektedir. Bunlardan birincisi sistemin/ürünün ilk ihtiyaç tanımlamasından başlayıp, üretimi gerçekleştirilinceye kadarki dönemde yapılan faaliyetleri içeren aşama, ikincisi ise kullanım ve lojistik destek aşamasıdır. Aslında birinci aşamada gerçekleştirilen analizlerde, kullanım ve lojistik destek safhası da düşünülerek hareket edilmekte ve tasarım alternatifleri arasından seçim yapılması hedeflenmektedir. Ancak bütün bu çalışmalar ve öngörüler üretici tarafından yapılmakta, müşteri veya müşterilerin, teknik isterlerin belirlenmesi dışında bir girdisi bulunmamaktadır. İkinci aşamada ise üretimi tamamlanmış ve kullanıma hazır olan ürünlere ilişkin analizler gerçekleştirilmektedir. İkinci aşama biraz daha müşteri tabanlı bir süreç olarak ortaya çıkmaktadır.

Söz konusu birinci ve ikinci aşamada uygulanabilecek, ilgilenilen sisteme ve konuya bağlı olarak değişkenlik gösterebilen çok farklı lojistik analiz yöntemleri bulunmaktadır. Ancak lojistik analiz konuları ve yöntemlerine ilişkin literatürde kabul görmüş ve referans olarak kullanılan net bir sınıflandırma bulunmamaktadır. Bu analizlere ilişkin örnekler şu şekilde sıralanabilir;

- Sistemin tasarım alternatifleri arasından seçim yapma,
- Yedeklik tahsis problemi (redundancy allocation problem - RAP),
- Onarım seviyesi analizi (level of repair analysis - LORA),

- Yedek parça tahsis problemi (spare parts allocation problem - SPA),
- Hata türleri etkileri ve kritiklik analizi (failure mode, effects and criticality analysis - FMECA),
- Bakım görev analizi (maintenance task analysis).

Sistemin tasarım alternatifleri arasından seçim yapmada, belirlenen amaç veya amaçları optimize edecek şekilde alternatif tasarımlardan uygun olanına karar vermek amaçlanmaktadır. Yedeklik tahsis probleminde ise güvenilirliği maksimum yapmak amacıyla, bazı kısıtlar doğrultusunda sistemin genel işleyiş yapısının oluşturulması hedeflenmektedir. Onarım seviyesi analizinde, bir sistemin arızasına neden olan parçaların tamir edilmesi veya atılması kararı ile bunun hangi bakım seviyesinde uygulanması gerektiği incelenir. Yedek parça tahsis probleminde ise belirlenen amaçları gerçekleştirmek üzere bakım faaliyetlerinde kullanılacak yedek parçaların stoklanacağı yerlere ve miktarlarına karar verilmektedir. Hata türleri etkileri ve kritiklik analizinde, hatalar ortaya çıkmadan önce tespit edilmeye ve önlenmeye çalışılmaktadır. Bakım görev analizinde de bakım faaliyetine etki eden tüm unsurlar değerlendirilerek zaman ve kaynak açısından gerekli analizler gerçekleştirilmektedir.

PDL konusuna ilişkin çalışmalar hakkında detaylı bilgiler literatür araştırması bölümünde sunulacaktır. Ancak tez çalışmasına esin kaynağı olan bu felsefenin, neden ortaya çıktığı, ne olduğu ve lojistik analizlerde nasıl bir değişikliğe yol açtığından kısaca bahsetmenin gerekli olduğu değerlendirilmektedir.

Son dönemde dünyadaki ekonomik gelişmelere bağlı olarak ülkeler ve işletmeler bütçelerinde önemli oranda kesintiler yapmak zorunda kalmışlardır. Bu kesintiler sadece satın almaları etkilememiş, aynı zamanda sürdürülebilirliğin de çok önemli bir problem olarak ortaya çıkmasına neden olmuştur. Artık ömür devri maliyetlerine ilişkin buzdağı modelinde suyun altında kalan kısım ile daha yakından ilgilenilmeye başlanmıştır. Bu kapsamda, ömür devri içerisinde gerçekleştirilen faaliyetlerin daha detaylı olarak ele alınması ve tedbir alınması mümkün alanlarla ilgili analizler gerçekleştirilerek maliyetlerin azaltılması en önemli amaçlardan biri haline gelmiştir. Aslında tüm bu gelişmeler, analizlerde daha bütünsel yaklaşımların sergilenmesini ve sistemler arası bakış açılarının kullanılmasını gerekli kılmaktadır. Bunun yansımaları hızla akademik dünyada da gözlemlenmeye başlanmış, bahse konu alanlardaki akademik çalışmalar oldukça artmıştır.

Uzun ömür sürelerine sahip sistemlerin ulaşım ve enerji gibi bazı özel sektör uygulamaları mevcut olsa da genellikle kamu sektöründe kullanıldığı görülmektedir. Bu doğrultuda bahse konu sistemlerin maliyet-etkin olarak idame işletmesine yönelik olarak kamunun artan oranda analitik desteğe ihtiyacı bulunmaktadır. Kamunun sahip olduğu sistemlerin ömür devri maliyetlerinin düşürülmesinde önemli bir nokta olarak, bu konuda teknik altyapısı daha yüksek olan özel sektörden faydalanılması dikkate alınabilir. Çünkü özel sektör boyutu farklı olmakla birlikte bu problemlerle uğraşmakta ve profesyonel işgücü istihdam etmektedir. Ayrıca özel sektörün kâr odaklı düşüncesi daha maliyet etkin yaklaşımların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu nedenle kamu-özel sektör iş birliğinin geliştirilmesi, özel sektörün uzmanlaştığı alanlardaki yöntemlerin kamu sektörüne de aktarılması gerekliliği hâsıl olmuştur.

Bu doğrultuda, kamu kuruluşları, akademisyenler ve endüstri, mevcut veya yeni tedarik edilecek sistemlerin lojistik desteklenebilirliklerini maliyet etkin olarak sağlamaya yönelik yeni metodolojiler geliştirme arayışına girmişlerdir. Bu arayışlar sonucunda, son 10-15 yılda ortaya çıkmış olan PDL, yetki ve sorumlulukların net olarak belirlendiği, uzun dönemli lojistik destek anlaşmaları ile pahalı ve büyük sistemlerin istenen performans hedeflerini karşılamak için gerekli lojistik desteğin bir bütün olarak satın alınması şeklinde açıklanabilir. Klasik lojistik yaklaşımında müşteri, lojistik faaliyetlere yönelik tüm sorumluluğu almakta, arızalar meydana geldikçe yedek parça ihtiyacı ortaya çıkmakta, üretici yedek parça sattıkça kâr elde etmektedir. PDL yaklaşımında ise müşteri performans ölçütlerini belirlemekte ve üretici bunu sağlamak üzere gerekli tüm lojistik faaliyetleri uzun dönemli anlaşmalar ile yönetmektedir. Yeni yaklaşım ile firma göstereceği performansa bağlı olarak daha fazla kâr elde edebilirken, müşteri için ürünün ömür devri maliyeti düşmektedir.

PDL sistemi yaklaşımı, klasik yaklaşımdan farklı yönleri nedeniyle mevcut analiz yöntemlerinin yeniden modellenmesini gerektirmiştir. Çünkü lojistik destek faaliyetleri artık üreticilerin sorumluluğunda gerçekleştirilecek ve ömür devri maliyetini azaltmaya yönelik her türlü çaba, üreticinin daha fazla kâr elde etmesini sağlayacaktır. Aslında PDL yapılan işi değil, bu işin sonucunda odaklanılan noktayı ve bunu ele alan yapıyı değiştirmiştir. Bu kapsamda mevcut maliyet odaklı değerlendirmeler yerini kâr odaklı değerlendirmelere bırakmıştır.

Türkiye'de PDL yaklaşımına benzer bazı uygulamalar söz konusu olsa da henüz ilgili yaklaşımın tüm unsurlarını içeren bir uygulama platformu mevcut değildir. Ancak özellikle yakın gelecekte envantere girecek silah sistemleri başta olmak üzere birçok farklı sektör ve sistem üzerinde bu yaklaşım uygulanmaya başlayacaktır. Bu sistemlerden birisi de Türkiye'nin ortak üreticisi olduğu Joint Strike Fighter - JSF (F-35) savaş uçağıdır. Bu nedenle bu çalışmanın esin kaynağını F-35 projesi ve bu proje içerisinde uygulanacak olan PDL modeline yönelik ihtiyaçlar oluşturmuştur. Bu kapsamda, mevcut çalışma bünyesinde yapılacak değerlendirmelerde ve modellemelerde uçak platformu temel alınmıştır. Aslında platform, ürün yapısını ve bu doğrultuda ekonomik analiz gerektiren parça sayısını etkileyebilecek, bu yapılar değiştirilerek ortaya konacak modeller diğer sistemlere de kolaylıkla uygulanabilecektir. Önemli olan husus genel bir yaklaşım ve model ortaya konulmasıdır.

Lojistik analiz konusunda farklı konular bulunsa ve bu konuların birçoğunun birbirleri ile ilişkileri olsa da tüm problemleri çözebilecek bir model oluşturmak mümkün değildir. Bu nedenle yapılan akademik çalışmalar ya tek bir konuyu ele almakta ya da iki farklı konunun beraber ele alınması söz konusu olmaktadır. Genellikle iki konunun birlikte değerlendirildiği durumlarda daha iyi sonuçlara ulaşılması mümkün olmaktadır.

Detayları ikinci bölümde açıklanacak olan konu hakkındaki çalışmalar incelendiğinde, Onarım Seviyesi Analizi (OSA) ve Yedek Parça Tahsis Probleminin (YTP) PDL kapsamında çözümüne ilişkin eksiklikler bulunduğu ve aynı zamanda söz konusu iki problemin bütünleşik çözümünün de literatüre katkı sağlayacağı görülmüştür. Bu doğrultuda çalışmada ortaya konacak modelin ana unsurlarının OSA ve YTP olması planlanmıştır. Bu problemlerde temel amaç, arıza meydana geldiği zaman bunun nerede tamir edileceğine karar verilmesi ve bu işlemleri yerine getirebilmek için ihtiyaç duyulacak yedek parçaların ilgili yerlerde depolanmasını analiz etmektir.

Aslında PDL, mevcut lojistik analiz yöntemlerine ilave yöntemler getirmemektedir. Yalnız mevcut yöntemlerin PDL konsepti içerisinde yeniden modellenmesi gerekliliği bulunmaktadır. Bu kapsamda mevcut tez çalışmasının amacı, lojistik analiz yöntemleri içerisinde yer alan OSA ve YTP'yi, PDL bakış açısı ile çok amaçlı olarak yeniden modellemek olarak belirlenmiştir. Ayrıca bu iki problemin beraber çözümüne ilişkin de

metodoloji geliştirilmiş ve böylelikle pratikte daha faydalı olabilecek sonuçların elde edilmesi hedeflenmiştir.

Problem ele alınırken üretici açısından değerlendirmelerde bulunulmuştur. Ancak böyle bir modelin müşteriler tarafından da kullanılabileceği ve sonuçların PDL anlaşmasına yönelik görüşmelerde değerlendirmeye alınabileceği düşünülmektedir.

Hâlihazırda ülkemizde PDL'nin analitik değerlendirilmesine ilişkin çalışmalar bulunmamaktadır. PDL'ye ilişkin az sayıdaki çalışma genel olarak, PDL'nin uygulanabilirliği, uygulama aşamaları ve millî mevzuatta yapılması gereken değişiklikler gibi hususları incelemiştir. Daha çok kavramsal hususları içeren çalışmalar olduğu gözlemlenmekte olup, bu tezin amacını ve kapsamını içeren analitik bir çalışma bulunmamaktadır.

Dünyadaki akademik çalışmalara baktığımızda da PDL'nin kavramsal hususlarını ortaya koyan çalışmaların çok daha yaygın olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise PDL'ye yönelik ortak bir algı yaratabilme isteğidir. Özellikle PDL'de uygulanacak teşvik sistemi ve bunun kontrolüne yönelik konulara ağırlık verilmektedir. Performans ve maliyete ait analizlere ilişkin çalışmalar ise yavaş yavaş dikkat çekmeye başlamıştır.

Literatürde incelendiği kadarıyla, OSA problemini PDL felsefesi içerisinde kâr odaklı olarak modelleyen herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ayrıca OSA probleminin çok amaçlı modellenmesine ilişkin çalışmalar da oldukça kısıtlıdır ve PDL yönetimi içerisinde ortaya çıkabileceği değerlendirilen amaçları içermemektedir. Bu tez çalışmasında, OSA probleminin kâr odaklı ve çok amaçlı olarak yeniden modellenerek literatüre katkıda bulunulması hedeflenmiştir.

YTP'ye yönelik oldukça fazla çalışma bulunmaktadır. Ancak PDL kapsamında ilk çalışma D. R. Nowicki (2008) tarafından yapılmış olup, YTP kâr odaklı ve tek amaçlı olarak modellenmiştir. İncelediğimiz kadarıyla literatürde YTP'yi kaynak kısıtlarını ve pratikte ortaya çıkabilecek durumları dikkate alarak kâr odaklı ve çok amaçlı olarak modelleyen bir çalışma bulunmamaktadır. Bu tez çalışması ile literatüre bu anlamda da bir katkı sağlanmıştır.

Yine literatürde OSA ve YTP'yi sıralı, iteratif veya bütünleşik olarak çözen çalışmalara rastlanmakla birlikte, bu modeller klasik lojistik yaklaşımı için oluşturulmuştur. PDL ortamında bu problemleri beraber çözen bir çalışma bulunmamaktadır. Mevcut çalışmada bu konuya da değinilmiş ve yeni oluşturulan modelde YTP ve OSA'nın eş zamanlı çözümü gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak, yapılan tez çalışmasının literatüre temel katkıları aşağıda verilmiştir.

- OSA probleminin çok amaçlı olarak modellenmesi.
- YTP'nin çok amaçlı olarak modellenmesi.
- YTP ve OSA problemlerinin bütünleşik çözümü.

Mevcut tez çalışmasının ikinci bölümünde PDL, OSA ve YTP problemlerine ilişkin literatürde yer alan çalışmalar incelenmiş; üçüncü bölümde OSA problemi PDL bakış açısı ile çok amaçlı olarak modellenmiş; dördüncü bölümde YTP modelinin çok amaçlı benzetim optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve aynı modelin OSA ile bütünleşik çözümünün sonuçlara etkisi incelenmiş, son olarak beşinci bölümde yapılan çalışmalara ilişkin sonuç ve değerlendirmelere yer verilerek, gelecekte gerçekleştirilebilecek potansiyel çalışma konularına ilişkin önerilerde bulunulmuştur.

2. PERFORMANSA DAYALI LOJİSTİK (PDL), ONARIM SEVİYESİ ANALİZİ (OSA) VE YEDEK PARÇA TAHSİS PROBLEMLERİNE (YTP) GENEL BAKIŞ

2.1. Performansa Dayalı Lojistik (PDL)

PDL, yetki ve sorumlulukların net olarak belirlendiği, uzun dönem lojistik destek anlaşmaları ile pahalı ve büyük sistemlerin istenen performans hedeflerini karşılamak için gerekli lojistik desteğin bir bütün olarak satın alınmasıdır.

Daha önce de PDL'ye benzer farklı yaklaşımlar kamu ve özel sektörde çeşitli uygulama alanları bulmuş, ancak PDL gibi kapsamlı bir yaklaşım oluşturulamamıştır. Bu konudaki uygulamaların çıkış noktasının ABD olduğu söylenebilir. ABD'de özellikle 1990'lı yılların sonlarında askeri alanda kamu-özel sektör iş birliğine yönelik yaklaşımlar geliştirilmeye başlansa da PDL ilk olarak ABD'nin 2001 yılındaki savunma gözden geçirme raporunda önümüzdeki dönemde tercih edilecek yöntem olarak yerini almıştır. ABD Savunma Bakanlığının 5000.01 sayılı direktifinde program yöneticilerinin önümüzdeki dönemde PDL'ye yönelik stratejiler geliştirmesi ve böylelikle hazırbulunuşluğun artırılırken, maliyet ve lojistik ayak izinin azaltılmasının sağlanması gerektiği ifade edilmiştir (U.S. DoD, 2003). Bu noktadan sonra PDL'nin askeri sistemlerde ve savunma sanayinde uygulamaları hızla artmaya başlamıştır. Berkowitz, Gupta, Simpson ve McWilliams (2005) PDL'yi, organik veya organik olmayan desteğin, son kullanıcının amaçlarını karşılayacak ve sistemin kullanım yeteneğini geliştirecek şekilde, uygun teşvik sistemine sahip uzun dönemli kontratlarla sağlandığı bütünleşik bir tedarik ve lojistik destek sistemi olarak tanımlamaktadır.

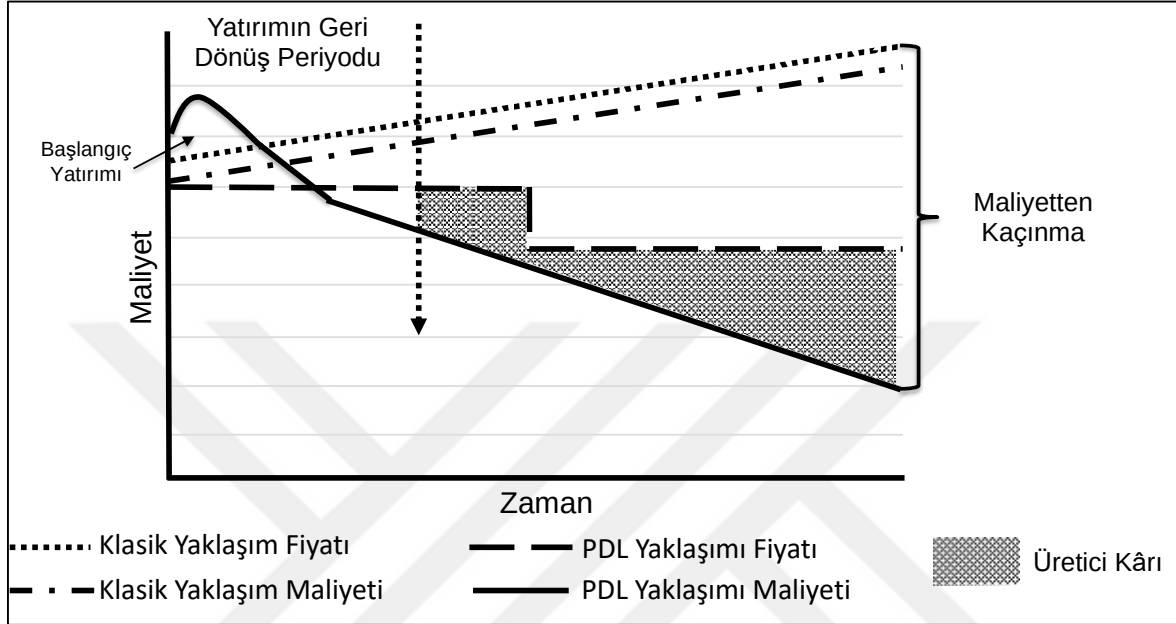
PDL kavramı ABD'de ortaya çıktıktan sonra, farklı projeler ve platformlarla ilgili diğer ülkelerde de uygulanmaya başlamıştır. Ancak gerçekleştirilen bazı uygulamaların proje tabanlı ilerlemesi, PDL felsefesine yönelik algılamaların farklı olması, PDL'nin tam olarak uygulanabilmesine imkân sağlayacak diğer bazı sistemlerde henüz gerekli olgunluğa ulaşamamış olması gibi nedenlerle felsefenin bütünüyle uygulanmasında sıkıntılar yaşanabilmektedir. Ülkeler açısından bir diğer çekince noktası ise özellikle kendi üretimleri olmayan sistemlerin tüm idame işletmesinin bir diğer ülkenin firmasına bırakılması konusudur. Benzer bir algı aynı ülke içerisindeki kamu ve özel sektör arasında da yaşanabilmektedir. Kamu kuruluşları, özellikle olağan dışı durumlar söz konusu olduğunda,

anlaşmalara rağmen özel sektörden gerekli lojistik desteği alamayabileceğini veya kontrat yönetimindeki eksikliklere bağlı olarak istenen nitelik ve kalitede hizmetin oluşmayabileceğini düşünmektedir. Bu durum, kr yerine hizmet odaklı olarak faaliyet gösteren kamu birimleri için önemli bir değerlendirme parametresi olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle savunma sektöründe kullanılan silah sistemleri için bu konu daha da hayati bir önem taşıtmaktadır ve bu durum bazı ülkelerin konuya tutucu yaklaşmalarına neden olmaktadır. Fakat unutulmaması gereken husus, milli olarak sahip olunmayan her sistem için benzer bir riskin mevcut olduğu, idame işletmeye yönelik faaliyetlerin bu şekilde devredilmesi veya devredilmemesinin çok büyük değerisimler yaratmayacağıdır. Çünkü lojistik destek alınan ülke veya ülkeler ile herhangi bir problem yaşanması durumunda yedek parça alımları da gerçekleşmeyecek ve sistemin idamesi stoklarda yer alan yedek malzemelere bağlı olarak sınırlı bir süre için sağlanabilecektir. Ayrıca iyi bir sözleşme ve kontrat yönetimi ile bahse konu risklerin ortadan kaldırılması veya minimize edilmesi de mümkün olabilecektir. Sonuç olarak amaçlanan, kazan-kazan felsefesi ile her iki tarafın da daha fazla kr elde etmesidir. Bu noktada firmaların da a gözlü hareket etmemesi, gerçekçi maliyetler sunarak müşterisi ile birlikte daha fazla kazanmayı hedeflemesi gerekmektedir.

Daha önce de belirtildiği gibi kullanım ve lojistik destek maliyetleri, ömür devri maliyetinin yaklaşık %60'nı oluşturmaktadır. Bu nedenle bu aşamaya yönelik yapılacak iyileştirmeler, ömür devri maliyetini de önemli derecede etkileyecektir. PDL ve klasik yaklaşım arasındaki fark şekil 2.1'de gösterilmektedir. Klasik yaklaşımda üreticinin krı belirli dar bir aralıktaki seyrederken, müşteri için sistemin ömür devri maliyeti oldukça yüksektir. Üretici için krın dar bir aralıktaki seyretmesinin nedeni, rekabet ortamında fiyatların genellikle piyasa tarafından belirlenmesi ve maliyetlerin azaltılmasının da bir noktaya kadar geekleşebilmesidir. Tüm bu durum nihai olarak müşteriye, ömür devri maliyeti daha yüksek sistemler olarak yansımaktadır.

PDL yaklaşımında ise üretici, sistemin daha güvenilir ve sürdürülebilir olması amacıyla belirli bir başlangıç maliyetine katlanır. Başlangıç maliyetinin nedeni, kendisi tarafından sağlanacak lojistik desteğin maliyet etkin olarak sürdürülebilmesini sağlamak için daha güvenilir, idame işletme maliyetleri daha düşük sistemler üretme gerekliliğidir. Söz konusu başlangıç maliyetinin geri dönüşünün sağlanmasının ardından ise üretici göstereceği performansa bağlı olarak, klasik yaklaşımdan daha fazla kr elde edecektir. Söz konusu kr alanı şekil 2.1'de taralı gri alan olarak görülmektedir. Sonuçta sistemin ömür devri maliyeti

müşteri için de klasik yöntemle göre daha düşük seviyelere inmiş olur. Bu doğrultuda bakıldığında, her iki tarafın da kendi uzmanlık alanlarına odaklandığı ve kaynakların etkin kullanılması ile kazan-kazan durumunun ortaya çıktığı görülmektedir.



Şekil 2.1. PDL ve klasik yaklaşım karşılaştırılması (Randall, Nowicki ve Hawkins, 2011)

Bazı PDL uygulamalarına ilişkin kazançlar Çizelge 2.1’de gösterilmiştir. Daha farklı PDL örneklerine Nowicki (2008) ve Yükselen (2012)’nin çalışmalarından erişilebilir. Çizelge 2.1’e bakıldığında özellikle sistemlerin maliyetinin arttıkça uygulanan konseptin getirisinin çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Burada yer alan F/A-18 E/F, F-117 ve JSTARS sistemleri uçak platformları iken, M1 tank sistemidir. Uçak platformları da hem üretim hem de idame işletme açısından oldukça pahalı sistemlerdir. Zaten bu nedenle PDL’nin çıkış noktasını savunma sanayinde kullanılan sistemler oluşturmuştur. Benzer yaklaşımın, başta sivil havacılık sektörü olmak üzere maliyetli sistemlerin kullanıldığı diğer sektörlerde de kullanılması mümkündür. Ayrıca sistemlerin maliyetleri arttıkça, ömür devri içerisinde yapılacak herhangi bir iyileştirmenin geri dönüşü de o oranda yüksektir.

PDL’ye ilişkin olarak savunma sanayi dergilerinde yayınlar, çeşitli enstitü ve kuruluşlara ait raporlar bulunsa da, akademik incelemelere ilişkin çalışmaların daha sınırlı olduğu görülmektedir.

Çizelge 2.1. Örnek PDL uygulamaları

Sistem	Sözleşme Süresi (yıl)	Kazanç (milyon \$)
<i>F/A-18 E/F</i>	5	52,8
<i>M1 (Tank)</i>	30	17,08
<i>F-117</i>	8	82,2
<i>JSTARS</i>	15	48,8

Nowicki, Kumar, Steudel ve Verma (2006) yapmış oldukları çalışmada, YTP'yi, PDL'ye yönelik ve kâr odaklı olarak yeniden modellemişlerdir. Daha önceki çalışmalarda yedek parça tahsislerine karar verilirken maliyetin minimizasyonu hedeflenirken, söz konusu çalışmada, PDL sözleşmesinde yer alan gelir modelini maksimize edecek şekilde tahsislerin gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Gelir modelleri hazırbulunuşluk değeri üzerinden oluşturulmuş ve farklı hazırbulunuşluk değer aralıklarında fonksiyonun farklı değerler alması sağlanmıştır. Bu kapsamda; lineer, eksponansiyel ve kademeli olmak üzere üç farklı gelir modeli kullanılmıştır. Sonuç olarak kullanılan gelir modelinin yedek parça tahsis kararlarını etkilediği gösterilmiştir.

Kim, Cohen ve Netessine (2007) işveren-aracı (principal-agent) modelini kullanarak PDL, sabit maliyet ve teşvik maliyetli kontrat türlerini analiz etmişlerdir. Çalışmada müşteri işveren rolünde, üretici aracı rolünde değerlendirilmiştir. Kontrat türleri performans ve risk paylaşımına yaklaşım açısından incelenmiştir.

Kumar, Nowicki, Ramirez-Marquez ve Verma (2007) PDL yapısı içerisinde sistemin tasarım alternatiflerini değerlendirmeye yönelik hedef programlama modeli geliştirmişlerdir. Modelin amaçları; toplam sahip olma maliyetini minimize etmek, hazırbulunuşluğu maksimize etmek, ortalama tamir zamanını minimize etmek ve lojistik ayak izini minimize etmek olarak belirlenmiş, veri olarak sisteme ait mühendislik verileri kullanılmıştır.

Sols, Nowicki ve Verma (2007) çalışmalarında, genel literatür taraması gerçekleştirmiş ve PDL'ye ilişkin uygulayıcılarla yaptıkları görüşmelerle PDL uygulamalarında alınan dersleri ortaya koymaya çalışmışlardır. Bu incelemeler neticesinde PDL'nin daha iyi uygulanabilmesine yönelik yeni bir metodoloji önermişlerdir. Çalışmalarında ölçütler ve gelir modelinin PDL uygulamalarının en önemli hususları olduğunu belirtmişlerdir.

Gardner (2008), PDL sözleşmelerindeki riski dengeleyecek şekilde belirlenmesi gereken sözleşme türleri ve sürelerini değerlendirmiştir.

D. R. Nowicki (2008) doktora tez çalışmasında PDL yaklaşımına yönelik farklı optimizasyon modelleri geliştirmiştir. İlk olarak vekâlet teorisi (agency theory) ve kâr odaklı yaklaşım ile parça tabanlı YTP'ye ait yeni bir model oluşturmuştur. Daha sonra benzer şekilde sistem tabanlı YTP'yi modellemiş ve çözüm etkinliğini sağlamaya yönelik bir sezgisel geliştirmiştir. Son olarak yedeklik (redundancy) tahsis problemi ve YTP'yi eş zamanlı çözen bir model ortaya koymuştur.

Sols, Nowicki ve Verma (2008) başarılı bir PDL uygulaması için ödül/ceza modelinin çok iyi tanımlanması gerektiğini ifade etmişlerdir. Bu kapsamda bir ölçütün performansı değerlendirmede yeterli olmayacağı, bunun için n-boyutlu, performansa dayalı gelir modeli oluşturulması gerektiği ve her boyutun farklı bir ölçütü temsil ettiği belirtilmiştir.

Büyükgöral (2009), PDL sözleşmesinin nihai performansını değerlendirmeye yönelik dört aşamalı bir model geliştirmiştir. Bu aşamalar;

- Mevcut değerlendirme modelinin oluşturulması,
- Matematiksel modelin oluşturulması,
- Mevcut değerlendirme modeli ve matematiksel modelin entegrasyonu,
- Analiz ve bulguların yorumlanmasından oluşmaktadır.

Dört aşamalı model iki gerçek hayat örneği üzerinde uygulanmış ve başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Geliştirilen model geleceğe yönelik tahminlerde bulunulmasına ve ilave bakış açıları elde edilebilmesine imkân sağlamaktadır.

Jaquez (2009) seri ve seri-paralel yapıdaki tasarım alternatiflerini değerlendirmeye yönelik çok amaçlı genetik algoritma modeli geliştirmiştir. Modelde yer alan amaçlar, güvenilirliği maksimize etmek, toplam sahip olma maliyetini minimize etmek ve ortalama tamir zamanını minimize etmek şeklindedir.

Hypko, Tilebein ve Gleich (2010) 39 akademik yayını inceleyerek PDL'ye yönelik yeni bir kavramsal model oluşturmuşlardır. Bu modelin temel kriterleri olarak; performans sağlayıcının geçmiş tecrübesi, kontrat süresince ve kontrat sonrasında sistemin sahip olma

durumu, bakım ve kullanıcı personelin sorumluluğu, ödeme modeli, lojistik desteğin uygulanma yeri ve müşteri sayısı dikkate alınmıştır.

Bayram (2010) PDL'nin ülkemizde uygulanma durumunu özellikle mevzuat açısından da değerlendirerek incelemiştir. PDL'nin, mevcut kurumsal kültür ve mevzuat açısından ülkemizde uygulanmasında problemlerle karşılaşılacağı ifade edilmiştir. Buna ilave olarak PDL uygulamasında tedarikçi seçimine yönelik bulanık mantık modeli geliştirilmiştir.

Randall, Pohlen ve Hanna (2010) PDL uygulayan tedarik zincirlerine yönelik teorik bir model önermişlerdir. PDL yaklaşımı ile birlikte tedarik zinciri içerisinde yer alan tüm birimlerin bağımsız hareket eden unsurlar yerine, gerekli sistem performansını ortaya koyacak şekilde birlikte ve uyumlu olarak hareket etmelerinin daha uygun olacağı ifade edilmiştir.

Mirzahosseinian ve Piplani (2011) METRIC tabanlı algoritmaların, sabit arıza oranı, sabit tamir oranı ve sınırsız tamir kapasitesi gibi pratikten uzak varsayımlarını gevşeterek, PDL ortamında yeni bir stok modeli geliştirmiştir. PDL uygulamasında temel zorluklardan birisinin, müşterinin talep edilen performansı ölçebilecek kriterleri ortaya koyabilmesinin olduğu belirtilmiştir.

Sols, Romero ve Cloutier (2012) sistemlerin uzun kullanım ömürleri içerisinde oluşan yetenek açıklarını kapatmaya yönelik oluşturulan teknoloji yenileme programları ile PDL'yi beraber değerlendiren bir model oluşturmuş ve İspanyol F-100 firkateynleri üzerinde bir uygulama gerçekleştirmişlerdir. PDL uygulanan sistemler uzun ömür devrine sahip oldukları için kullanım süreleri içerisinde çeşitli modernizasyon uygulamalarının yapılması sıklıkla karşılaşılan bir durumdur.

Yükselen (2012), PDL uygulamanın uygun olup olmadığını sayısal olarak değerlendiren Microsoft Excel tabanlı bir program geliştirmiştir. Programda PDL konseptini etkileyen çeşitli faktörlere ilişkin sorular oluşturulmuş ve bunlar üzerinden değerlendirmede bulunulmuştur. PDL'nin her sistem için uygulanmasının mümkün olmayabileceği, ancak geliştirilen program ile buna yönelik gerekli karar desteğinin sağlanabileceği ifade edilmiştir.

Timur (2013), Türkiye Havacılık ve Uzay Sanayi Anonim Şirketinin (TUSAŞ) Orta İrtifa Uzun Havada Kalışlı (MALE - Medium Altitude Long Endurance) İnsansız Uçak Sistemi için uygulayabileceği örnek bir PDL modelini, ilgili şirketin lojistik departmanında görevli personele uyguladığı anket yoluyla oluşturmuştur.

Selviaridis ve Wynstra (2014), PDL sözleşmelerine ilişkin detaylı bir literatür taraması yapmışlar ve gelecek dönemde çalışılabilecek alanları ortaya koymuşlardır. Geleceğe yönelik çalışmalar kapsamında; PDL sözleşmelerine ait teorik altyapıların geliştirilmesi gerektiği, PDL’de kullanılacak maliyet modeli ve bunun tedarikçi üzerindeki etkilerine ilişkin modeller geliştirilmesinin faydalı olacağı, PDL ile tedarik zinciri yönetimini beraber ele alan çalışmalara ihtiyaç olduğu, ayrıca PDL’nin inovasyona katkısının da incelenebileceği belirtilmiştir.

Selviaridis ve Norman (2015), gelişmiş lojistik sistemler için yapılacak olan PDL sözleşmelerindeki zorlukları incelemişlerdir. Bu doğrultuda; performans ölçütlerinin belirlenmesi ve bunların ağırlıklandırılması, ortaya konan performans takip edebilecek otomasyon sistemlerinin oluşturulması, uygun teşvik modellerinin belirlenmesi ve servis sağlayıcı tarafından proaktif bir yaklaşım sergilenerek proses ve kaynakların yönetilmesi temel zorluk alanları olarak ortaya konmuştur.

Randall, Hawkins, Haynie, Nowicki, Armenakis ve Geary (2015) PDL’nin birçok farklı yapıdaki oyuncunun olduğu bir takım oyunu olduğunu belirtmişler ve başarı için gerekli faktörleri belirlemek amacıyla deneysel uygulama gerçekleştirmişlerdir. Uygulamada PDL sisteminin uygulandığı 17 büyük projenin yöneticileri ile görüşmüşler ve elde edilen veriler üzerinden değerlendirmelerde bulunarak birimler arası bir PDL takımı modeli oluşturmuşlardır.

Glas ve Kleemann (2017), PDL sözleşmelerine ilişkin kavramsal hususları ve müşteri ile servis sağlayıcı arasındaki entegrasyonu incelemişlerdir. PDL’deki en önemli faktörlerin; açıkça tanımlanmış sorumluluklar ve performans ölçütleri, şeffaf performans ölçümü, iş birliği kültürünün mevcudiyeti ve sahip olunan sistem unsurlarının maksimum kullanımı olduğu belirtilmiştir. PDL’yi tarafların arasındaki entegrasyonun derecesine göre, yalın (düşük entegrasyon) ve özelleştirilmiş (yüksek entegrasyon) olmak üzere iki gruba ayırmışlardır.

Giriş bölümünde çalışmanın esin kaynağının uçak sistemi ve bunun özelinde de F-35 uçağı olduğu belirtilmişti. Birçok ülkenin projenin içerisinde olması ve PDL'nin ana lojistik destek yöntemi olarak seçilmesi nedeniyle, PDL'nin popülerliğinin artmasına neden olan F-35 projesi hakkında da kısa bilgi vermenin uygun olacağı düşünülmektedir. F-35 savaş uçağı projesi 1997 yılında başlatılmış ve ilk uçağın üretimi 2006 yılında ABD Lockheed Martin firması tesislerinde gerçekleştirilmiştir. Proje; ABD, İngiltere, Türkiye, Norveç, Hollanda, İtalya, Danimarka, Kanada ve Avustralya'dan oluşan dokuz ülkenin ortaklığıyla yürütülmektedir. Proje içerisinde yer alan bu ülkelere ilave olarak İsrail, Japonya ve Güney Kore de uçak tedarik edecek olup, diğer bazı ülkelerin satın almaya yönelik değerlendirmeleri de devam etmektedir. Uçaklar ABD'de operasyonel olarak kullanılmaya başlanmıştır. Diğer program ortağı bazı ülkelere de kullanılmaya başlanmış, sistemin iyileştirme ve geliştirme çalışmaları ile pilot ve diğer personelin eğitim çalışmaları devam etmektedir. Henüz üretici firma tarafından uçağın seri üretimine geçilmemiş olup, düşük seviyeli başlangıç üretimi süreci kapsamında faaliyetler yürütülmektedir. Türkiye ilk uçağını 21 Haziran 2018 tarihinde teslim almıştır. Ancak teslim alınan ilk iki uçağın ABD'de kalması, burada pilotların eğitimlerinin tamamlanması sonrasında 2019 yılı sonunda Türkiye'ye getirilmesi planlanmaktadır.

F-35 uçağının kullanılmaya başlanması ile birlikte program çerçevesinde uygulanacak PDL sisteminin de uygulanmasına yakın zamanda başlanmıştır. Ancak 2018 yılı sonu itibari ile PDL sistemi henüz asli lojistik destek sistemi olarak kullanılmaya başlanmamıştır. PDL gözlem amaçlı olarak takip edilmektedir. Hem uçak sistemindeki geliştirmelerin devam etmesi, hem de PDL'nin asıl bilgi ve veri yapısını oluşturacak Küresel Bilgi Sisteminin henüz tam olarak kullanılmaya başlanmamış olması nedeniyle bu şekilde bir uygulama yapılmaktadır. Programın yeterli olgunluğa erişmesinin ardından PDL'nin de tam olarak uygulamaya geçmesi öngörülmektedir. Uygulamanın başlamasının ardından her ülke tarafından, belirlenen performans kriterlerine ilişkin isteklerin bildirilmesi istenecektir. Bu isteklere ve gerçekleşecek değerlere göre bir maliyet oluşacaktır. Bu nedenle PDL konseptine genel olarak hâkim olmanın önemli olduğu düşünülmektedir.

PDL yaklaşımının klasik lojistik yaklaşımdan farklılıklar göstermesi, tamamen klasik yaklaşıma göre teşkilatlanmış ve uzun yıllardır bunu uygulayan yapının yeni bir değişim ve dönüşüme girmesini gerekli kılmaktadır. Ancak bunun nasıl gerçekleştirilmesi gerektiği tüm ülkeler için önemli bir problem alanı olarak ortaya çıkmaktadır. Değişim ile birlikte ülkelerin

PDL'nin uygulanmasına yönelik analitik değerlendirme ihtiyaçları da artan oranda ortaya çıkacaktır.

F-35 uçaklarının Türkiye'de konuşlandırılmaya başlamasının ardından PDL konusundaki benzer ihtiyaçlar ülkemiz için de söz konusu olacaktır. Amaç, PDL kapsamında alınacak hizmetler ile buna karşılık talep edilecek maliyetlerin değerlendirilmesi ve arzu edilen isterlerin maliyet-etkin olarak karşılanması için gerekli karar desteğinin sağlanmasıdır. PDL ile ilgili çalışmalarda temel zorluk, karmaşık yapıya sahip lojistik destek faaliyetlerinin tam olarak maliyetlendirilmesinin mümkün olmaması ve bu nedenle bir maliyet algoritmasının ortaya konulamamasıdır. Bu durum gerek üretici gerekse kullanıcılar için önemli bir sorun alanı yaratmaktadır. Üreticiler kullanıcıların farklı alternatif isterlerinin maliyetlerine ilişkin hususları belirlemede zorlanırken; kullanıcılar da isterlerindeki küçük değişimlerin ortaya koyabileceği maliyet değişikliklerini basit olarak hesaplayamamanın rahatsızlığını hissetmektedirler. Gerçekleştirilecek tüm lojistik faaliyetleri kapsayan ve hesaplanması basit bir maliyet formülü geliştirmek mümkün değildir. Önemli olan husus, bu ihtiyaçlara genel olarak cevap verebilecek bir modelin oluşturulmasıdır. Lojistik destek faaliyetlerinin karmaşıklığı nedeniyle basit tek bir maliyet hesaplamasının yapılamaması ve maliyetin üretici tarafından belirlenmesi, kapalı kutu olarak nitelendirilebilecek bir durumun ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu durum da üretici ve müşteri arasında şeffaflık problemleri yaratabilmekte ve güven tesisini güçleştirebilmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi önemli olan husus, tüm paydaşların birbirleri için daha iyisini ortaya koymak üzere çalışmasıdır. Nihayetinde her iki taraf da klasik yöntemle göre daha kazançlı çıkacaktır.

2.2. Onarım Seviyesi Analizi (OSA)

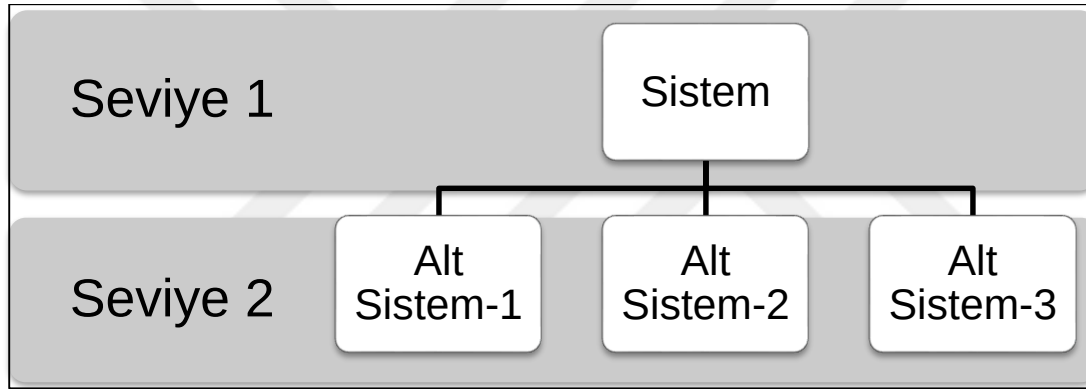
Sistemlerin kullanımı esnasında herhangi bir arıza meydana gelmesi durumunda aşağıdaki sorular ile karşı karşıya kalınmaktadır.

- Arızalı parçayı tamir mi etmeliyim?
- Arızalı parçayı atmalı mıyım?
- Tamir işlemini nerede yapmalıyım?
- Bu işlemleri yapabilmek için kaynakları nasıl yerleştirmeliyim?

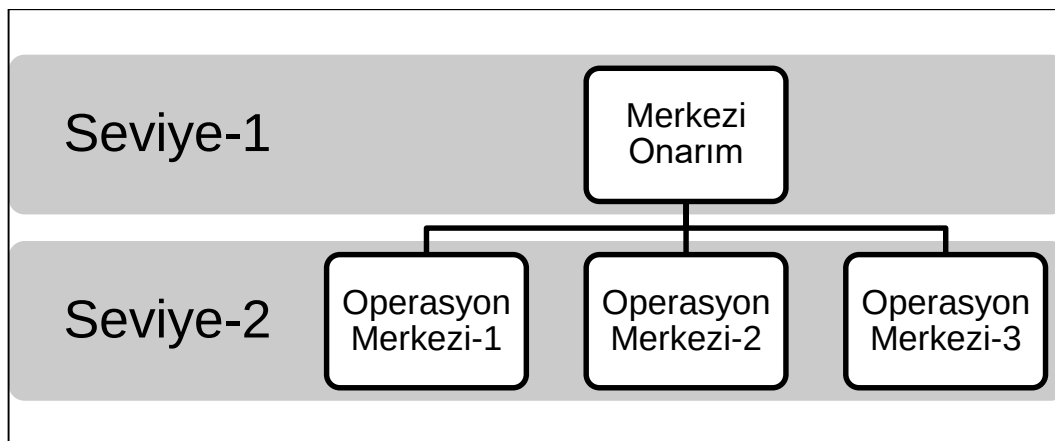
Literatürde bu sorulara cevap bulmayı amaçlayan problem, OSA problemi olarak tanımlanmaktadır. Bu problemde, her bir soru farklı bir alternatif olarak değerlendirilebilir

ve amaç minimum maliyete sahip alternatifin seçilmesi olarak ifade edilebilir. OSA'daki problemler, ürünün yapısı (Şekil 2.2) ve lojistik destek ağının yapısı (Şekil 2.3) olmak üzere iki farklı yönden ele alınabilir. Çok seviyeli problemlerde de genellikle iki seviye veya üç seviyeli yapıların dikkate alındığı görülmektedir.

Nielsen ve Shahal (1981) sistem etkinliği ve ömür devri maliyetini göz önüne alarak, tedarik edilebilecek sistemlere karar verebilmeyi amaçlayan model geliştirmişlerdir. Bu kapsamda SIMPLE adını verdikleri bir bilgisayar programı geliştirmişler ve bu programı AIR ve OPUS-VII gibi diğer paket programlar ile karşılaştırmışlardır. Modellemede kullandıkları parametreler içerisinde, arızalar arası ortalama zamanın en etkin parametre olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 2.2. Ürün yapısı



Şekil 2.3. Onarım seviyeleri

Defense Logistics Agency (1982)'nin raporunda tamir et/at kararına ilişkin ekonomik ve ekonomik olmayan kriterler belirlenmiş ve tamir et/at kararının diğer kararlar ile ilişkisi değerlendirilmiştir. Daha önce tamir et/at problemi olarak ele alınan konu, Amerikan Savunma Bakanlığının yayınladığı standart (U.S. DoD, 1988) ile OSA olarak anılmaya başlamış ve öncelikli olarak askeri alanda kullanılmıştır.

Barros (1998), tam sayılı programlama tabanlı onarım seviyesi optimizasyon modeli (LOROM - Level of Repair Optimization Model) oluşturmuş ve CPLEX ile çözmüştür. Modelde basitleştirici varsayımlarda bulunmuş, sabit ve değişken maliyet ayırmasına gitmiştir.

Barros ve Riley (2001) aynı modeli dal-sınır algoritmasını kullanarak çözmüştür. İki seviyeli ürün ve bakım merkezi yapısının kullanıldığı model, askeri dokümanlar göz önünde bulundurularak, gerçekçi bir yaklaşımla oluşturulmuştur. Ayrıca bu problem yapısının daha genel durumlar için de uygulanabileceği, özellikle yöneylem araştırması içerisindeki çok seviyeli ve kapasitesiz yer seçimi problemlerine uygun olduğu belirtilmiştir.

Saranga ve Kumar (2006), Barros (1998)'den farklı olarak, arızalı parçalar için farklı kaynaklar kullanmış ve modeli genetik algoritma ile çözmüştür.

Gutin, Rafiey, Yeo ve Tso (2006), OSA problemini minimum maliyetli benzer biçimli graf problemi olarak fomülize etmiş ve iki onarım seviyeli problemin polinom zamanda çözülebildiğini göstermiştir.

OSA problemine ilişkin kapsamlı bir çalışma Basten (2009)'un doktora tez çalışmasında bulunmaktadır. Tez çalışmasında OSA ve YTP ele alınmıştır. OSA problemi pratikte karşılaşılan bazı durumları kapsayacak şekilde geliştirilmiş ve sonrasında OSA ve YTP'nin sıralı ve bütünleşik optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Basten, Schutten ve van der Heijden (2009), Barros (1998) ile Saranga ve Kumar (2006)'ın çalışmalarından daha genelleştirilmiş bir model sunmuşlardır. Modelde, parçalar birden fazla kaynağı kullanabilirken, bir kaynak birden fazla parça tarafından talep edilebilmektedir.

Brick ve Uchoa (2009) yaptıkları çalışmada, tesis yer seçimi ve OSA problemini beraber ele almıştır. Karışık tamsayılı programlama modeli ile pratikte uygulanabilecek bir çözüm yaklaşımı ortaya konmuştur.

Bouachera, Kishk ve Power (2010), OSA problemini bütünlük genetik algoritma ve tabu arama sezgiselleri ile çözmüştür. Yapılan çalışmada sistemin tüm alt kırımları matris yapısı içerisinde formülize edilmiş ve geliştirilen algoritma MATLAB programında kodlanarak örnek durumlar üzerinden çalıştırılmıştır. Büyük boyutlu problemlerin bile kabul edilebilir süreler içerisinde çözülebildiği gösterilmiştir. Modelin, tamir maliyetleri dışındaki maliyetlerin de ilave edilerek geliştirilmesi gerektiği belirtilmiştir.

Basten, van der Heijden ve Schutten (2011a), OSA'yı minimum maliyetli akış problemi olarak modellemişlerdir. Geliştirdikleri modelin; daha esnek bir yapıya ve oldukça iyi hesaplama etkinliğine sahip olması en büyük avantaj olarak ifade edilmiştir. Basten, van der Heijden ve Schutten (2011b) de aynı modeli kullanmış, fakat başarısız tamir, arızanın bulunamaması, kaynak kısıtı, bir parça için birden fazla hata türü ile tamir işlemi için dış kaynak kullanımı gibi pratikte karşılaşılan bazı durumları da modele eklemişlerdir.

Ituarte-Villarreal ve Espiritu (2011) ekonomik OSA problemi için genetik algoritma tabanlı karar destek modeli ve bilgisayar programı geliştirmişler ve maliyetleri değişken ve sabit maliyetler olarak sınıflandırmışlardır.

2.3. Yedek Parça Tahsis Problemi (YTP)

Yedek parçaların stok problemine ilişkin literatürde oldukça fazla çalışma bulunmaktadır. Bu nedenle mevcut tez çalışmasında, temel yayınlar ile son dönemdeki çalışmalara yer verilmesi hedeflenmiştir.

Konuya ilişkin en temel yayınlardan biri Sherbrooke (1968)'un yapmış olduğu çalışmadır. Çalışmada, tamir edilebilir malzeme kontrolüne yönelik çok seviyeli model (METRIC - Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control) geliştirilmiştir. Bahse konu modelde problemin karmaşıklığını azaltmaya yönelik olarak basitleştirici varsayımlar yapılmıştır. METRIC yöntemi, ilk tedarik hesaplamalarında, mevcut stok sistemini değerlendirmede veya her bir depo için stok seviyelerini yeniden hesaplamada kullanılabilir.

Muckstadt (1973), Sherbrooke (1968)'in tek ürün seviyeli modelini iki seviyeli olacak şekilde geliştirmiş ve yeni modele MOD-METRIC adını vermiştir. Daha sonra geliştirilen VARI-METRIC yöntemi ise beklenen sipariş bakiyelerine ilişkin daha iyi tahmin sunmaktadır. Çünkü daha önceki METRIC yöntemleri sadece ortalama değerleri kullanarak birinci dereceden çözüm gerçekleştirirken, VARI-METRIC yöntemi ortalamalara ilave olarak varyansları da kullanmakta ve ikinci dereceden çözüm gerçekleştirmektedir (Sherbrooke, 1986).

YTP'ye ait detaylı literatür taraması Guide Jr. ve Srivastava (1997) ile Kennedy, Patterson ve Fredendall (2002) tarafından sunulmuştur.

Nowicki, Kumar, Steudel ve Verma (2006) çok-ürün ve bakım merkezi seviyeli YTP'yi PDL'ye yönelik olarak yeniden formüle etmiştir. Modelde amaç, PDL sözleşmesine göre üreticinin kârını maksimize etmek şeklinde belirlenmiştir. Hazırbulunuşluğa bağlı bir gelir modeli formüle edilmiştir. Buna ilave olarak hazırbulunuşluk ve gelir arasındaki bağlantıyı ortaya koymak amacıyla, doğrusal, eksponansiyel ve aşamalı gelir fonksiyonları kullanılmıştır.

Wang (2012) YTP ile önleyici bakım aralıklarını birlikte optimize eden yeni bir stokastik model geliştirmiştir. Modelde karar değişkenleri olarak; sipariş aralıkları, önleyici bakım aralıkları ve sipariş miktarları dikkate alınmıştır.

Nowicki, Randall ve Ramirez-Marquez (2012) METRIC tabanlı yöntemlerin hesaplama etkinliğini arttırmak üzere bir sezgisel geliştirmişlerdir. Bu model %99,9 doğrulukla %94'lük hesaplama etkinliği sağlamaktadır.

Costantino, Di Gravio ve Tronci (2013) İtalya Hava Kuvvetleri için yeni bir YTP modeli geliştirmişlerdir. Yeni modelde tamir merkezlerinin farklı kabiliyetlere ve sertifikasyonlara sahip olduğu hususu dikkate alınmış ve bu durumun tamir edilme imkânlarını etkilediği belirtilmiştir. Buna göre tüm sistem genelinde gerekli hazırbulunuşluğu sağlamak için yok satmaları minimize edecek ve marjinal analiz yaklaşımını kullanan bir model geliştirilmiştir.

Tsai ve Zheng (2013), sistem içerisinde bulunan bakım merkezlerinin istenen servis seviyelerini göz önünde bulundurarak toplam stok maliyetini minimize etmeye çalışan

benzetim optimizasyonu modeli geliştirmiştir. Modelin müteakip çalışmalarında bakım merkezleri arasında malzeme aktarımına da izin verilmesi hususunun eklenebileceği, ayrıca ikiden fazla seviyeler için de geliştirme yapılabileceği belirtilmiştir.

Gu, Zhang ve Li (2015) yapmış oldukları çalışmada, talep belirsizliği altında yedek parça optimizasyonuna yönelik doğrusal olmayan programlama modeli geliştirmişlerdir. İşletme maliyetlerinin yaklaşık %13'n bakım maliyetlerinin oluşturduğu, bu nedenle çok iyi bir planlama yapılması gerektiği ifade edilmiştir.

Sharma, Kulkarni ve Yadav (2017) yapmış oldukları çalışmada kara kuvvetlerinin kullandıkları sistemler için benzetim optimizasyonu ile YTP'yi çözmüşlerdir. Sistemlerin görev aralıklarında bakım işlemlerini yapmaya, bu kapsamda ihtiyaç duyulabilecek parça miktarlarını da benzetim ile tahminlemeye çalışmışlardır. Optimizasyon bölümü için genetik algoritma kullanılmış ve MATLAB'de kodlanmıştır.

Eruguz, Tan ve van Houtum (2018) denizcilik sektöründe kullanılan gemiler gibi hareketli sistemlerin bakımlarına ve yedek parça ihtiyaçlarına yönelik, Markov karar prosesi tabanlı model geliştirmişlerdir.

Sleptchenko, Al ve Zijm (2018) YTP ile iş gücü tahsis problemini beraber ele alarak karma tamsayılı model geliştirmişlerdir.

YTP'de harekt araştırması çalışmalarına ilişkin güncel ve kapsamlı literatür taramasına Hu, Boylan, Chen ve Labib (2018)'nin çalışmasından ulaşılabilir.

2.4. OSA ve YTP'nin Bütünleşik Optimizasyonu

OSA ve YTP genellikle sıralı olarak çözülmektedir. İki problemi eş zamanlı olarak çözen çalışmalar oldukça sınırlıdır. Alfredsson (1997) YTP, OSA ve test ekipmanı tahsis problemini beraber olarak çözen bir model geliştirmiştir.

Kusters (2011) problemi iki blok halinde çözmektedir. Birinci blok, parça tanımlama ve OSA; ikinci blok ise VARI-METRIC yöntemini kullanarak YTP'yi çözmektedir. YTP'nin çözümünden elde edilen sonuçlar birinci bloğa yansıtılarak yeniden çözümü sağlanmakta ve bu işlem durdurma koşulunun sağlanmasına kadar devam etmektedir.

Basten, van der Heijden ve Schutten (2012) de OSA ve YTP'yi birlikte çözen bir model geliştirmişlerdir. Problemin karmaşıklığını azaltmak için tek ürün seviyesi ve iki onarım seviyesi kullanılmıştır. Örnek uygulamada, problemlerin beraber çözümünün sıralı çözüme göre maliyeti ortalama %5,1 azalttığını göstermişlerdir.

Basten, van der Heijden, Schutten ve Kutanoglu (2012) çok ürün ve onarım seviyeli problem için iteratif bir yöntem geliştirmiştir. Yeni yöntem, sıralı yönteme göre ortalama %3'lük azalma sağlarken, Basten, van der Heijden ve Schutten (2012)'e göre ise %0,6'lık bir maliyet artışına neden olmaktadır fakat çözüm zamanı açısından daha etkindir.

Bouachera (2012) bütünleşik problemi kuyruk teorisini kullanarak çözmüştür. Çözümleri, sıralı, iteratif ve bütünleşik olarak ayrı ayrı değerlendirmiştir. Bütünleşik yaklaşım, en iyi iteratif yaklaşımdan %13 daha iyi sonuç verse de, iteratif yaklaşımın çözüm zamanını da göz önünde bulundurulduğunda tatmin edici olduğu değerlendirilmektedir.

Fan, Guo, Yang ve Kang (2013) çok ürün, tek onarım seviyeli problem için konveks programlama algoritması geliştirmiştir. Modelde sipariş bakiyelerinin beklenen değeri minimize edilirken, maliyetler kısıt olarak kullanılmıştır.

Triki, Alalawin ve Ghiani (2013) çok ürün, tek onarım seviyeli problemi benzetim optimizasyonu kullanarak çözmüşlerdir.

Alalawin, Ghiani, Manni ve Triki (2013) OSA ve YTP'yi eş zamanlı olarak çözmek için doğrusal olmayan olasılıklı kısıtlara sahip tam sayılı programlama modeli geliştirmişlerdir. Çalışmaları, Triki, Alalawin ve Ghiani (2013)'nin çalışmaları ile benzerlik göstermektedir, ancak çok onarım seviyesi ele alınmış ve modele bazı ilaveler yapılmıştır.

Cranshaw, Pall ve Wesolkowski (2014) yapmış oldukları çalışmada maliyet ve hazırbulunuşluğu çok amaçlı olarak ele almış ve bütünleşik OSA ile YTP'yi genetik algoritma kullanarak çözmüştür.

Bu tezin kapsamına en yakın çalışma olarak Ghaddar, Sakr ve Asiedu (2016)'nın YTP ve OSA probleminin birlikte çözümüne ilişkin geliştirdikleri yaklaşım dikkate alınabilir. Söz konusu çalışmada öncelikle YTP için genetik algoritma tabanlı bir optimizasyon modeli oluşturulmuştur. Bu modelin METRIC tabanlı algoritmaların kullandığı marjinal analiz ile

benzer sonuçları ürettiği gösterilmiş, ancak önerilen model ile ikinci aşama olan YTP ve OSA'nın beraber çözümüne ilişkin daha kolay geçiş yapılabileceği belirtilmiştir. Bütünleşik problem karma tamsayılı doğrusal olmayan optimizasyon yaklaşımı ile çözülmüştür. Çalışmanın geleceğe yönelik öneriler bölümünde YTP ve OSA'nın bütünleşik çözümüne yönelik yaklaşımın gerçekçi bir benzetim modeli ile birleştirilebileceği ifade edilmiştir.

Ghaddar, Sakr ve Asiedu (2016)'nın makalesinden önce başlayan mevcut tez çalışmasında, söz konusu makalenin öneriler kısmında yer alana benzer şekilde birçok farklı değişkeni dikkate alan bir benzetim optimizasyonu modeli oluşturulmuş, ayrıca iki problemin bütünleşik çözümüne yönelik model geliştirilmiştir. Böylece tez çalışmasının motivasyonunu oluşturan konuların literatürde ihtiyaç duyulan hususlar olduğu ortaya çıkmış, çalışma alanının belirlenmesinde proaktif bir yaklaşım sergilenmiştir.

3. ÇOK AMAÇLI ONARIM SEVİYESİ ANALİZİ (OSA) MODELİ

OSA modeli birçok farklı sistem için uygulanmaktadır. Bu tez çalışmasında kavramsal bir model oluşturulmuş olmakla birlikte, temelde uçak sistemi bakım aktiviteleri göz önünde bulundurulmuştur. Kavramsal model üzerinde gerekli değişiklikler yapılarak ihtiyaç duyulan sisteme yönelik kullanımın kolaylıkla gerçekleştirilebileceği düşünülmektedir.

OSA problemine ilişkin şu ana kadar yapılan çalışmalarda, genellikle maliyetin minimizasyonu amaç olarak dikkate alınmıştır. Bildiğimiz kadarıyla sadece Cranshaw, Pall ve Wesolkowski (2014) yapmış oldukları çalışmada maliyet ve hazırbulunuşluğu çok amaçlı olarak ele almış ve bütünlük OSA ile YTP'yi genetik algoritma kullanarak çözmüştür. Ancak PDL modeli daha genel bir amaç yapısına ihtiyaç duymaktadır. Şayet PDL anlaşmasındaki ödeme modeli bilinmiş olsa, problem tek amaçlı olarak modellenerek çözümlenebilir ve ölçütlerin her biri amaç fonksiyonunun bir parametresi olarak ele alınabilirdi. Ancak PDL sisteminin çok karmaşık faaliyetlerin birleşiminden oluşması, tüm faaliyetleri basit anlamda maliyetlendirebilecek bir yöntemin bulunmaması nedeniyle, üreticilerin bir fiyat algoritması geliştirmesi pek mümkün olmamaktadır. Bu nedenle, açık olarak ortaya konamayan bu algoritma içerisinde yer alabileceği ve lojistik destek faaliyetlerinde temel teşkil ettiği değerlendirilen ölçütlerin ele alınması ve bunların optimizasyonunun sağlanmasının uygun olacağı düşünülmüştür. Bu kapsamda, her bir ölçütün bir amacı temsil ettiği değerlendirilen çok amaçlı bir model oluşturulması hedeflenmiştir.

Gerek tasarım aşaması gerekse operasyon ve lojistik destek aşamasında icra edilecek lojistik analizlerde ele alınabileceği değerlendirilen beş husus bulunmaktadır. Bunlar güvenilirlik (reliability), bakım yeteneği (maintainability), kullanılabilirlik (usability), desteklenebilirlik (supportability), üretkenlik (producibility) ve ekonomiklik (affordability) (Blanchard ve Fabrycky, 1998). Bu durumdan hareketle, PDL'ye yönelik oluşturulacak çok amaçlı modelin belirtilen hususlar ile ilişkili olması gerektiği değerlendirilmiştir.

Kullanılacak olan sistemin ele alınacağı aşamanın da amaçların belirlenmesinde etkili olduğu düşünülmektedir. Yeni tasarım edilen bir sisteme ait amaçlar ile hâlihazırda kullanımda olan bir sisteme ait amaçların bazı noktalarda farklılık göstermesi beklenen bir durumdur. Bu tez çalışmasında geliştirilen model, üretimi tamamlanmış, operasyon ve

lojistik destek aşamasının başında bulunan sistem düşünülerek oluşturulmuştur. Ancak modelde kullanılan ürün yapısının bir tasarım alternatifi olarak da değerlendirilebileceği ve alternatif tasarımlar arasından seçim yapmak amacıyla ömür devrinin üretim öncesi aşamasında da kullanılabileceği düşünülmektedir. Modelde kullanılacak amaçlar ve bu amaçların Blanchard ve Fabrycky (1998) tarafından ortaya konan beş husus kapsamında kullanılma gerekçeleri aşağıda açıklanmıştır.

AMAÇ-1: Lojistik destek maliyetinin minimizasyonu.

AMAÇ-2: Ortalama tamir zamanının minimizasyonu.

AMAÇ-3: Lojistik ayak izinin minimizasyonu.

Güvenilirliğin temel unsuru arıza oranlarıdır. Modelin birinci ve üçüncü amaçlarında arıza oranı dikkate alınmaktadır. Sadece güvenilirliği maksimize etmek düşünülmemiştir. Çünkü bu amaç genellikle Tasarım Optimizasyonunda veya Yedeklik Tahsis (redundancy allocation) problemlerinde kullanılmaktadır.

Bakım yeteneğinde amaç, meydana gelen arızaların kısa sürede ve etkin bir şekilde giderilmesidir. Modelin ikinci amacı bunu hedeflemektedir.

Kullanılabilirlik hususu ergonomik yapılanma ile ilgilidir. Ele alınan problemde böyle bir hususa gerek olmadığı, bu durumun sistemin/ürünün tasarım aşamasında dikkate alındığı değerlendirilmektedir.

Desteklenebilirlik metriğinin amacı, sistemin operasyon aşaması veya bakım aşamasındaki faaliyetlerinin minimum gereklilikler ile karşılanması veya kolaylıkla yerine getirilmesi olarak düşünülebilir. Modelin üçüncü amacında yer alan lojistik ayak izinin küçültülmesi hedefi bu amaca yöneliktir.

Üretkenlik metriğinin de problemin yapısına uygun olmadığı düşünülmektedir. Çünkü üretimi tamamlanmış ve kullanıma hazır olan sistemlere yönelik olarak model oluşturulmuştur.

Ekonomiklik metriğine ilişkin amaç, modelin birinci amacıdır. Bu amaç ile sabit ve değişken maliyetlerin minimize edilmesi hedeflenmektedir.

Yukarıda belirtilen ölçütlere ilave olarak hazırbulunuşluk (availability) ölçütüne de ihtiyaç duyulabilir. Ancak hazırbulunuşluk ölçütünün OSA problemi için kapalı formu bulunmamaktadır ve yaklaşık formüllerle hesaplanmaktadır. Bu nedenle mevcut modelde bu ölçüte yer verilmemiştir.

3.1. Modelin Varsayımları

- Merkezi depo ve operasyon merkezi olmak üzere iki seviyeli onarım merkezi yapısı bulunmaktadır.
- Modelde iki seviyeli ürün yapısı mevcuttur.
- Herhangi bir onarım merkezinde alınacak karar sonrasında sabit ve değişken maliyetler dikkate alınmaktadır.
- Bazı parçalar arasında baba-oğul (father-son) ilişkisi mevcuttur ve baba statüsündeki parça için alınan kararın bağlı oğul parçalar için de alınması gerekmektedir. Bu durumun tersi söz konusu değildir.
- Ürün yapısı içerisinde mevcut tüm parçaların ayrık nitelikte olduğu kabul edilmektedir.
- Lojistik ayak izi sadece atılma kararı alınan parçalar için dikkate alınacaktır.
- Tüm tamir işlemleri onarım merkezi yapısı içerisinde yapılacaktır. Tamir işlemleri için dış kaynak kullanımı söz konusu değildir.
- Bütün tamir işlemlerinin başarılı olduğu kabul edilmektedir.
- Sistem parametreleri, sistemin ömür devri boyunca sabit kalmaktadır.
- Arızaların hemen teşhis edilebildiği kabul edilmiştir.
- Lojistik destek kaynaklarının her zaman ihtiyacı karşıladığı, kaynak eksikliğinin mevcut olmadığı kabul edilmiştir.
- Maliyetler ile tamir zamanı arasında ters yönlü ilişki vardır.

3.2. Kullanılan Notasyonlar

Karar Değişkeni:

$$X_{p,k} = \begin{cases} 1 & \text{şayet } p \text{ parçası için } k \text{ kararı seçilirse,} \\ 0 & \text{d. d.} \end{cases}$$

İndeks:

$$k = \begin{cases} 1 & 1'inci \text{ aşamada tamir etme} \\ 2 & 1'inci \text{ aşamada atma} \\ 3 & 2'nci \text{ aşamada tamir etme} \\ 4 & 2'nci \text{ aşamada atma} \end{cases}$$

Parametreler:

P_i : Baba statüsündeki parçalardan oluşan set.

P_j : Oğul statüsündeki parçalardan oluşan set.

$DM_{p,k}$: p parçası için k kararı verilmesi durumunda ortaya çıkan değişken maliyet.

$SM_{p,k}$: p parçası için k kararı verilmesi durumunda ortaya çıkan sabit maliyet.

λ_p : p parçasının sistemin ömür devri boyunca beklenen toplam arıza sayısı.

w_p : p parçasının ağırlığı.

$OTZ_{p,k}$: p parçasına yönelik k kararına ilişkin ortalama tamir zamanı.

3.3. Matematiksel Model

Amaç-1: Lojistik destek maliyetinin minimizasyonu.

$$f_1(x) = \min \sum_{p=1}^n \sum_{k=1}^4 [(DM_{p,k} \lambda_p) + SM_{p,k}] X_{p,k} \quad (3.1)$$

Amaç-2: Ortalama tamir zamanının minimizasyonu.

$$f_2(x) = \min \sum_{p=1}^n OTZ_{p,k} (X_{p,1} + X_{p,3}) \quad (3.2)$$

Amaç-3: Lojistik ayak izinin minimizasyonu.

$$f_3(x) = \min \sum_{p=1}^n (w_p \lambda_p) (X_{p,2} + X_{p,4}) \quad (3.3)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{k=1}^4 X_{p,k} = 1 \quad p = 1, 2, \dots, n \quad (3.4)$$

$$X_{p,k} \leq X_{ap,k} \quad p \in P_i \text{ ve } ap \in P_j \quad (3.5)$$

$$X_{p,k} \in \{0,1\} \quad (3.6)$$

Birinci amaçta lojistik destek maliyetlerinin minimizasyonu hedeflenmiştir. Maliyetler sabit ve değişken maliyetler olmak üzere iki farklı şekilde dikkate alınmıştır. Sabit maliyet, herhangi bir arıza durumunda kullanılan temel kaynakların maliyeti olarak değerlendirilmiştir. Bir kere arıza oluşması ile devreye girmekte olup, arıza tekrarlarından bağımsızdır. Değişken maliyet ise bir arıza meydana geldiği zaman sadece o arıza için yapılan işlemlere ilişkin maliyettir ve arıza oranları ile birlikte dikkate alınmaktadır.

İkinci amaçta herhangi bir parçanın arıza yapması durumunda, o parçanın tamiri için geçen ortalama tamir zamanlarının toplamının minimize edilmesi hedeflenmiştir.

Üçüncü amaçta ise lojistik ayak izi kapsamında dikkate alınan parça ağırlıklarının toplamının, arızalı parçalar açısından ele alınarak minimize edilmeye çalışılması hedeflenmiştir. Bir parça arıza yaptığı zaman o parçanın yenisi ile değiştirilmesi ve arızalı parça ile ilgili gerekli işlemin yapılması neticesinde bir hareketlilik oluşacak ve bu durum da lojistik ayak izini şekillendirecektir. Geliştirilen modelde bu hareketliliğin temel parametresi olarak parça ağırlıkları dikkate alınmıştır. İhtiyaca göre başta parça hacimleri olmak üzere farklı parametrelerin de dikkate alınması söz konusu olabilecektir.

Ortalama tamir zamanının minimize edilmesi için ekipman ve yetenek artırımı gerekecek, bu durum sabit ve değişken maliyetleri artıracak, böylelikle amaçlar arasında bir çelişme söz konusu olacaktır.

Kısıt (4) arızalı parçalar için bir karar alınmasını sağlamaktadır. Yani bir parça arıza yaptığı zaman OSA problemi içerisinde yer alan dört karardan birisinin mutlaka alınması

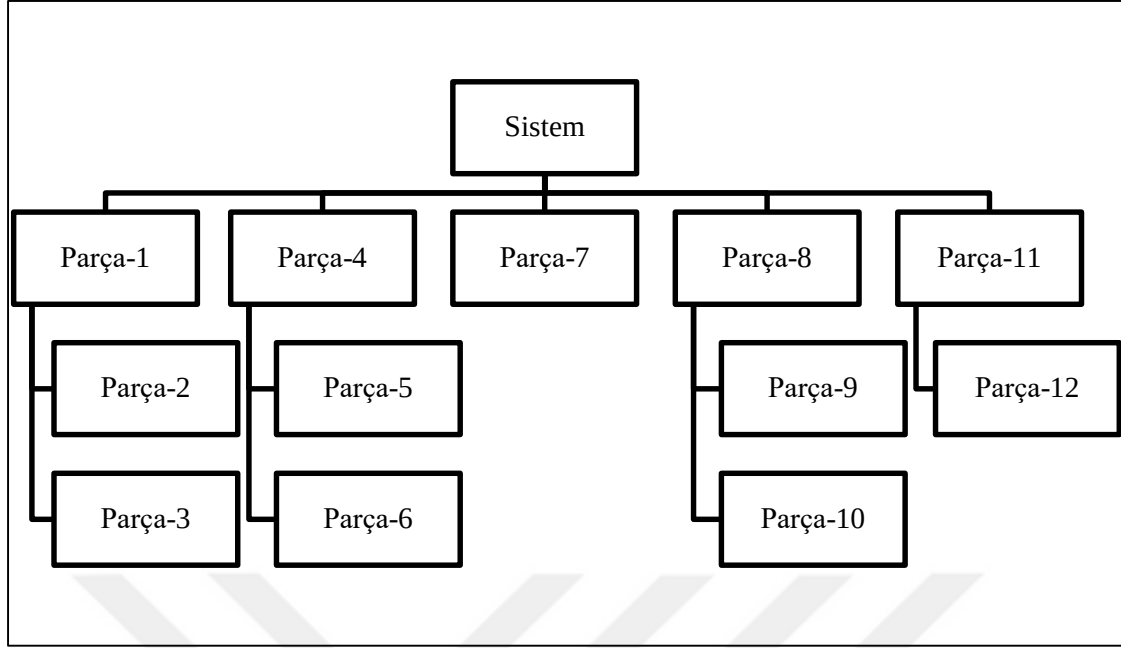
gerekmektedir. Kısıt (5), baba-oğul ilişkisi bulunan parçalar için Kısıt (4)'de alınan karara göre hareket edilmesini mümkün kılmaktadır. Kısıt (6)'da ise karar değişkenlerinin 0 veya 1 değerlerini alabileceği ifade edilmektedir.

3.4. Modelin Çözümü ve Sonuçların Analizi

Bu bölümde, matematiksel modelin çözümüne ilişkin gerçekleştirilen uygulama ve bunun sonuçları açıklanacaktır. Firmaların ürettikleri ürünlere ilişkin bilgileri ticari gizlilik nedeniyle paylaşmaması nedeniyle gerçekleştirilen uygulamada düzgün dağılım kullanılarak rassal olarak Çizelge 3.1'deki veriler yaratılmıştır. Düzgün dağılımın aralıkları belirlenirken, birinci seviye olan operasyon merkezi ile ikinci seviye olan merkezi bakım yeri arasında ekipman ve personel açısından kabiliyet farklılığı olmasının gerçek durumu daha iyi yansıtabileceği düşünülerek hareket edilmiştir. Yani merkezi bakım yerinin tüm operasyon merkezlerine hizmet vereceği için daha donanımlı olması beklenmelidir. Bu durum da gerek arızalı parçalar için alınacak kararları, gerekse tamir sürelerini etkileyecektir. Daha kabiliyetli olan bakım merkezinin operasyon merkezlerine göre daha kısa sürede tamir işlemini gerçekleştirmesi muhtemel bir durumdur.

Ayrıca uygulama gerçekleştirilirken öncelikle küçük boyutlu bir problem seti üzerinde çalışılarak modelin doğrulanması, daha sonrasında ise daha büyük boyutlu ve pratiğe yakın bir problem seti ile modelin geçerlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda ilk olarak Şekil 3.1'de görülen ürün yapısına göre 12 adet parça için uygulama gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.1'i incelediğimizde; birinci, dördüncü, yedinci, sekizinci ve on birinci parçaların “baba” olarak nitelendirilebilecek birinci seviyedeki parçalar olduğu diğer parçaların ise “oğul” olarak nitelendirilebilecek ikinci seviyedeki parçalar olduğu görülmektedir. İkinci ve üçüncü parçalar birinci parçaya, beşinci ve altıncı parçalar dördüncü parçaya, dokuz ve onuncu parçalar sekizinci parçaya, on ikinci parça ise on birinci parçaya bağlı olarak çalışmaktadır. Yedinci parçanın ise herhangi bir alt parçası bulunmamaktadır. Modelde yer alan kısıt (5), yukarıda açıklanan baba-oğul ilişkilerine göre işlem tesis etmektedir.



Şekil 3.1. Ürün yapısı (12 Parça)

Uygulamada kullanılacak 12 adet parça için düzgün dağılım kullanılarak oluşturulan rassal veriler Çizelge 3.1’de sunulmuştur.

Çok amaçlı modelin çözümünde Epsilon Kısıt yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, bir amacı optimize etmeye çalışırken diğer amaçları kısıt olarak ele almaktadır. Kısıt olarak ele alınan amaç fonksiyonlarının sağ taraf sabitleri parametrik olarak değiştirilerek çözüm uzayında arama yapılmaktadır.

Epsilon kısıt yönteminin bazı zayıf yönlerini iyileştirmek amacıyla Mavrotas ve Florios (2013) tarafından AUGMECON2 yöntemi geliştirilmiştir. Girdi parametrelerinin düzenli olarak değiştirilmesi ile AUGMECON2 yöntemi, çok amaçlı tam sayılı programlama problemlerinde kesin çözümü bulabilmektedir. Çünkü gerçekleştirilen parametrik analizde her bir çözüm noktası tek tek ziyaret edilmekte ve böylece çözüm uzayının tamamında arama yapılmaktadır. Şayet çözüm zamanı kısaltılmak istenirse, söz konusu çözüm noktalarının tamamının yerine belirli aralıklarla çözüm noktalarının ziyaret edilmesi sağlanarak sezgisel bir çözüm sağlanabilir. Bu durumun özellikle tam sayılı programlama problemleri için esneklik sağladığı ve hem kesin çözüm hem de sezgisel çözüm için aynı yaklaşımın kullanılabildiği görülmektedir.

Çizelge 3.1. Parametre bilgileri

	Sabit Maliyetler (SM) (bp)				Değişken Maliyetler (DM) (bp)				OTZ (sa)		w_p (kg)	λ_p
	Karar (k)				Karar (k)				Karar			
Parça	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2		
1	1117	944	828	789	174	147	129	123	1	5	9	11
2	1983	1825	2015	1566	314	289	319	248	6	5	6	7
3	1764	1559	1806	1451	293	259	300	241	8	1	9	3
4	1955	1727	2005	1610	317	280	325	261	5	4	10	8
5	1910	1692	1962	1570	298	264	306	245	7	1	2	1
6	1980	1674	2187	2093	317	268	350	335	2	1	3	3
7	1858	1833	2026	1321	298	294	325	212	4	2	9	12
8	1598	1561	1803	1406	258	252	291	227	3	6	5	13
9	1513	1076	1842	1639	239	170	291	259	5	5	10	7
10	1620	943	1578	1409	268	156	261	233	2	2	2	2
11	1672	1477	2407	1520	275	243	396	250	5	2	4	2
12	1822	1300	3088	1816	300	214	508	299	6	1	6	4

Modelin çözümü için tercih edilen AUGMECON2 yönteminin temel adımları aşağıya çıkarılmıştır.

- Ardışık sırasal (lexicographic) optimizasyon yöntemi ile amaç fonksiyonu aralıklarının belirlenmesi.
- Amaç fonksiyonu aralığı içerisindeki arama adım büyüklüklerinin belirlenmesi.
- Belirlenen arama aralıklarında çok amaçlı problemin çözülmesi.

Yöntemin adımlarına bakıldığında, amaç fonksiyonu aralığı küçük olduğu zaman tam sayılı programlama problemi için tüm noktalar aranarak kesin çözüme ulaşılmasının

sağlanabileceği; ancak amaç fonksiyonu aralığının geniş olması durumunda çözüm zamanının oldukça artacağı anlaşılmaktadır. Bu nedenle daha önce belirlenmiş bir aralık genişliğinde arama yapmanın da mevcut problem kapsamında değerlendirmeye esas olabilecek sayı ve nitelikte çözümler üretebileceği düşünülmüştür. Tabiki bu durumda bazı noktalar aranmadığı için elde edilen çözüm sezgisel nitelik taşıyacaktır.

Modelin çözümüne yönelik olarak GAMS kütüphanesinde bulunan AUGMECON2 yöntemi kodu alınmış ve üzerinde problemin yapısına yönelik değişiklikler yapılarak çalıştırılması sağlanmıştır. Tüm bu çalışmalar 1,8 GHz Intel Core i5 özelliklere sahip bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Modelin çözümünü kontrol etmek amacıyla oluşturulan basit problemdeki değişken sayısının az olması nedeniyle öncelikle kesin sonuç elde edilmeye çalışılmış, daha sonra farklı aralıklarla çözüm uzayı aranarak arama aralıklarının optimum çözüm üzerindeki etkisi incelenmeye çalışılmıştır.

İlk başta dikkate alınan 12 parça için model çalıştırıldığında, problem kapsamında kesin çözüm içerisinde yer alan 40 adet pareto optimum sonuca yaklaşık 75 sn.de ulaşılmıştır. Modelin çözümünde ortaya çıkan amaç fonksiyonları aralıkları Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Amaç fonksiyonu aralıkları (Ödemeler tablosu – Payoff table)

	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$
$MIN f_1(x)$	32361	22	276
$MIN f_2(x)$	34810	0	538
$MIN f_3(x)$	34984	35	0

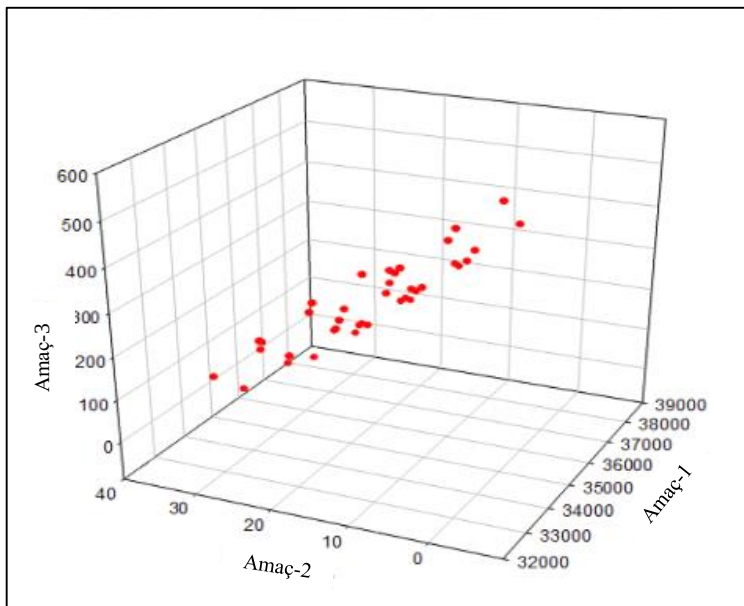
Farklı arama aralıklarının kullanılması ile elde edilen sonuçlar Çizelge 3.3’te gösterilmiştir. Bir parça için dört farklı karar olması nedeniyle karar değişkeni sayısı eldeki parça sayısının dört katıdır. Kısıt sayısını belirleyen husus ise baba-oğul ilişkisine sahip parça sayısına göre değişmektedir. Arama aralığı, daha önce belirlenmiş amaç fonksiyonu değer aralığında arama yapılacak adım sayısını göstermektedir.

Çizelge 3.3. Farklı arama aralıkları sonuçları (12 parça)

Parça Sayısı	Karar Değişkeni Sayısı	Kısıt Sayısı	Arama Aralığı	Pareto Optimum Çözüm Sayısı	Çözüm Süresi (sn)
12	48	9	10	28	9,13
12	48	9	20	37	19,54
12	48	9	50	39	52,08

Çizelge 3.3 incelendiğinde, 20 ve 50 arama aralıklarında kesin çözümde elde edilen 40 adet çözüme oldukça yakın sayıda çözümler üretildiği görülmektedir. Ancak bu durumun amaç fonksiyonu aralığına bağımlı olduğu ve bu nedenle 20 veya 50 arama aralığının kesin çözüme yakın sayıda çözüm ürettiği hususunun genelleştirilemeyeceği söylenebilir. Problemin boyutunun büyümesi sonucunda amaç fonksiyonu aralıkları da genişleyebilecek ve buna bağlı olarak kesin çözüm sayısından uzaklaşan sonuçlar elde edilebilecektir.

Çözüm kapsamında en sık arama aralığı olan 50 aralığa ait çözümlerin grafiksel gösterimi ise Şekil 3.2’de sunulmuştur. Modelde üç amacın bulunması grafiksel gösterimdeki sonuçların çok net olarak algılanamamasına neden olsa da pareto optimum çözümlerin belirli bir aralık dahilinde değişimler gösterdiği, çok dağınık sonuçların olmadığı görülmektedir.



Şekil 3.2. 50 Arama aralığına ait çözümler

12 parçalık basit problem üzerinde yukarıda açıklanan çözümleme gerçekleştirildikten sonra model, 500 ve 1000 parça gibi pratikte karşılaşılabilecek muhtemel daha büyük parça büyüklükleri için çalıştırılmıştır. Parametre değerleri ilk yaklaşımda olduğu gibi düzgün dağılım ile aynı aralıklar kullanılarak oluşturulmuş, ayrıca baba-oğul ilişkisine sahip parçalar da yine rassal olarak belirlenmiştir. Modelin çözümüne ilişkin sonuçlar Çizelge 3.4'te gösterilmiştir.

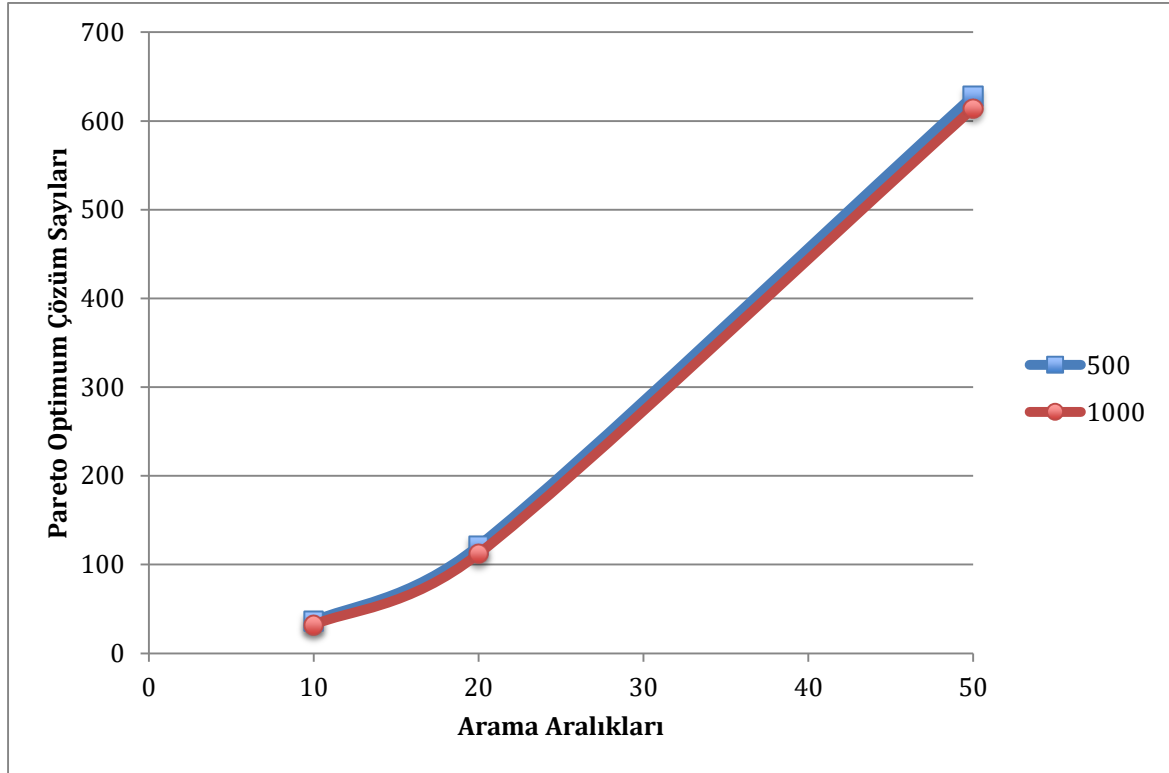
Çizelge 3.4. Farklı arama aralıkları sonuçları (500 ve 1000 parça)

Parça Sayısı	Karar Değişkeni Sayısı	Kısıt Sayısı	Arama Aralığı	Pareto Optimum Çözüm Sayısı	Çözüm Süresi (sn)
500	2000	37	10	36	17,76
500	2000	37	20	121	68,42
500	2000	37	50	628	660,38
1000	4000	59	10	32	278,66
1000	4000	59	20	112	1604,91
1000	4000	59	50	614	30195,2

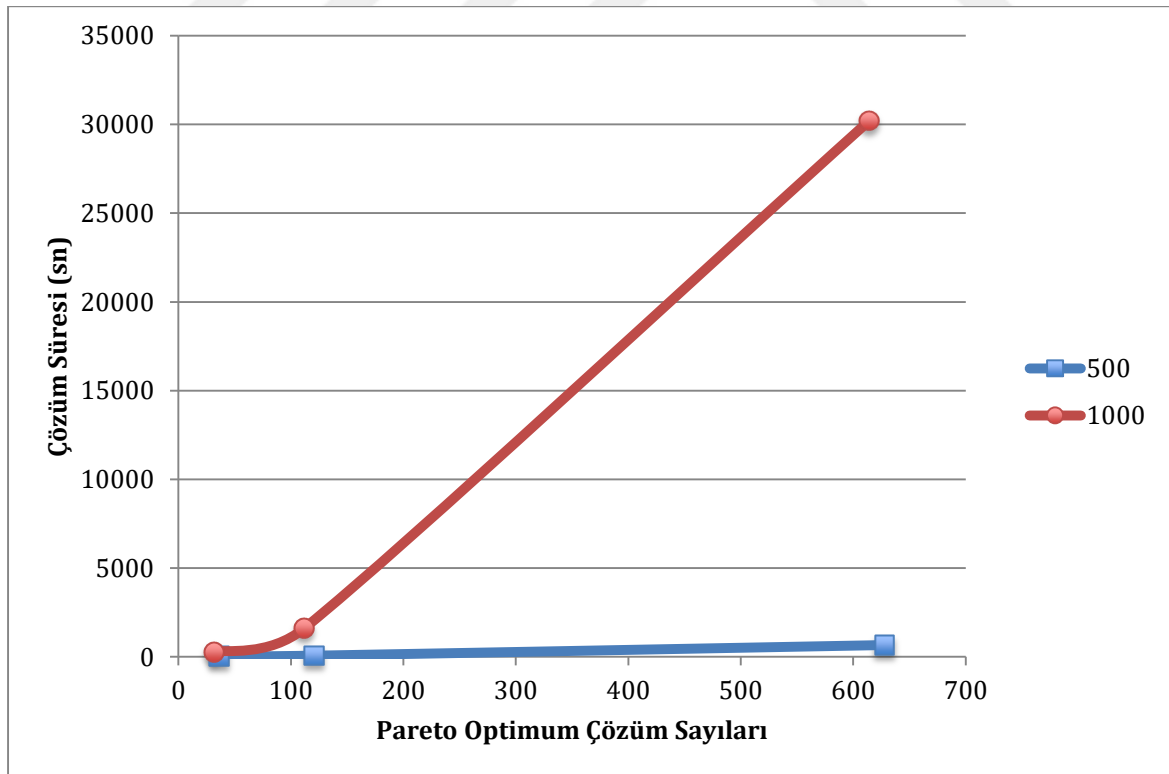
Modelde kullanılan parça sayısı arttıkça amaç fonksiyonu aralığı da genişlemektedir. Bu nedenle kesin çözüme ulaşılması kabul edilebilir zaman dilimi içerisinde mümkün olmamaktadır. Nitekim mevcut problem kesin çözümü bulmak için 48 saat çalıştırılmış, ancak çözüme ulaşamadığı için program sonlandırılmıştır. Ayrıca modelin sonuçlarının girdilere bağlı olarak değişkenlik gösterebileceği de dikkate alınmalıdır.

Büyük boyutlu problemlerde, arama aralığı sıkılaştıkça elde edilen pareto optimum çözüm sayısı ve çözüm süresinin arttığı görülmektedir. Arama aralıkları ile elde edilen pareto optimum çözümler arasındaki ilişki Şekil 3.3'te, elde edilen pareto optimum çözümler ile çözüm süresi arasındaki ilişki ise Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Bu karşılaştırmalar sonuçlar üzerinde etkili olan hususların ortaya konması amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.3 incelendiğinde, elde edilen pareto optimum çözüm sayısının, problemde yer alan parça sayısından çok kullanılan arama aralığına göre artış gösterdiği görülmektedir. Çünkü gerek 500 gerekse 1000 parça için elde edilen pareto optimum çözüm sayısı, farklı arama aralıklarında büyük benzerlik göstermektedir.



Şekil 3.3. Arama aralığı – pareto optimum çözüm sayısı



Şekil 3.4. Pareto optimum çözüm sayısı – çözüm süresi

Şekil 3.4 incelendiğinde ise çözüm süresinin elde edilen pareto optimum çözüm sayısı yanında kullanılan parça sayısına bağlı olarak da artış gösterdiği görülmektedir. Özellikle 100'ün üzerindeki pareto optimum çözüm sayıları için çözüm zamanının ekponansiyel olarak artışı söz konusudur.





4. YEDEK PARÇA TAHSİS PROBLEMİ (YTP) MODELİNİN ÇOK AMAÇLI BENZETİM OPTİMİZASYONU

YTP literatürde oldukça fazla çalışmanın yapıldığı bir problemidir. Ancak literatür taramasında da ele alındığı gibi probleme etki eden tüm hususları içeren çalışmaların oldukça kısıtlı olduğu görülmektedir. Problem içerisinde temel kısıtlayıcı hususlardan birisinin parçaların tamir zamanı olduğu düşünülmektedir. Yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunda bu durum göz ardı edilmiş ve tamir zamanları dikkate alınmadan çözümler üretilmiştir. Tamir zamanlarının da dikkate alındığı çalışmalarda ise problemin karmaşıklığı nedeniyle basit yaklaşımlar geliştirilmiştir. Literatürde incelendiği kadarıyla, çok seviyeli, tamir kapasitesini ve kaynakları dikkate alan, çok amaçlı ve performansa dayalı lojistik sistemi içerisinde ele alınabileceği değerlendirilen ölçütleri kullanan genelleştirilmiş bir modelin bulunmadığı görülmüştür. Bu tez çalışmasının çıktıları bakımından literatüre bu yönüyle de katkıda bulunduğu düşünülmektedir.

Servis kısıtı bulunan sistemlerin analitik olarak çözümünde genellikle kuyruk sistemi yaklaşımı kullanılmaktadır. Ancak ele alınması planlanan problemin kapsamı göz önünde bulundurulduğunda, kuyruk teorisinin uygun olmayacağı ve benzetim optimizasyonu yaklaşımının uygulanabileceği değerlendirilmiştir. Problemi etkileyebilecek ve matematiksel modellerde varsayımlar ile ortaya konan hususların modele dahil edilmesinde benzetimin esnekliğinden faydalanılabilmesi amacıyla söz konusu yaklaşım sergilenmiştir.

Tez çalışmasının üçüncü bölümünde yer alan OSA problemi için önerilen modelde olduğu gibi mevcut problem için de uçak sistemi düşünülmüş ve modelin yapısı buna göre oluşturulmuştur. Ürün ve onarım merkezi için iki seviyeli yapı dikkate alınmıştır. Ürünün birinci seviyesi uçak sistemlerinde kullanılan ve alt sistem (Line Replaceable Unit-LRU) olarak adlandırılan parçalardan oluşurken, ikinci seviyesi ise alt sistemlerin altında görev yapan ve alt bileşen (Shop Replaceable Unit-SRU) olarak tanımlanan parçalardan oluşmaktadır. Şekil 3.1'deki yapı incelendiğinde; 1, 4, 7, 8 ve 11 numaralı parçalar alt sistem, bunların altında yer alan 2, 3, 5, 6, 9, 10 ve 12 numaralı parçalar ise alt bileşen olarak nitelenebilir. Alt sistemler baba, alt bileşenler oğul parçalar olarak değerlendirilmekte ve aralarında mevcut tez çalışmasının üçüncü bölümünde yer alan OSA modelinde olduğu şekilde bir baba-oğul ilişkisi bulunmaktadır. Ayrıca pratikte söz konusu olan üslerde bulunan uçak sayıları farklılıklarının da probleme etkisini sağlayabilmek için üslerde farklı sayıda

uçak konusu dikkate alınmıştır. Bu kapsamda; Üs-1'de 24 uçak ve Üs-2'de 16 uçak bulunacak şekilde modelleme yapılmıştır.

Problem, benzetim modeli ve optimizasyon algoritması olmak üzere iki temel parça üzerinden çözülmeye çalışılmıştır. Optimizasyon modelinde yalnızca amaçlar yer almakta, benzetim modelinde bu amaçlarda kullanılan parametrelerin değerleri hesaplanmaktadır. Optimizasyon modelinin amaçları, toplam maliyetin minimizasyonu ve toplam uçuş saatinin maksimizasyonu olarak belirlenmiştir. Maliyet genellikle kullanılan bir amaç fonksiyonu iken toplam uçuş saatinin bu çalışmaya özgü bir yaklaşım olduğu düşünülmektedir. Diğer çalışmalarda olduğu gibi maliyet ile birlikte hazırbulunuşluk amacının göz önüne alınmamasının nedeni, hazırbulunuşluk ile istenen görev performansı arasında direkt bir bağlantı kurulamamasıdır. Operasyonel anlamda önemli olan husus istenen yer ve zamanda görevin icra edilebilmesidir. Hazırbulunuşluğun bu duruma etkisi söz konusu olsa da bu etkinin boyutunu net olarak ve sayısal anlamda ifade edebilmek pek mümkün değildir. Optimizasyon modelinde kullanılacak amaç fonksiyonlarının kapalı bir formu olmadığı için ve karmaşık bir sistem içerisinde birbirini etkileyen birçok farklı unsurun etkileşimleri sonucu ortaya çıktıkları için benzetim modelinin kullanılması tercih edilmiştir.

4.1. Benzetim Modeli

Benzetim modelinin oluşturulmasında bir üste yapılan uçuş faaliyetinin temel karakteristikleri dikkate alınmıştır. Literatüre katkı sağlamak ve benzetim modelinin esnekliğinden faydalanabilmek için tamir zamanı ve bakım personelinin durumu gibi hususlar da modele dahil edilmiştir.

Benzetim modeli oluşturulurken, öncelikle paket benzetim programı kullanılmaya çalışılmıştır. Birçok hazır fonksiyona sahip olması ve görsel olarak da gözlemlenebilmesi paket programlar için bir avantaj olarak değerlendirilmektedir. Ancak, mevcut modeldeki karmaşık ilişkilerin oluşturulması ve bunlar arasında farklı fonksiyonların tanımlanması konusundaki zorluklar ve kısıtlamalar nedeniyle, paket benzetim programı yerine bir programlama dilinin kullanılmasının daha uygun olacağı düşünülmüştür. Bu kapsamda, genellikle veri analizlerinde kullanılan, ancak bünyesinde programlamanın da yapılabildiği “R” programlama dili tercih edilmiştir. “R” programlama dilinin tercih edilmesinin nedenleri, kullanıcı ara yüzünün iyi olması, oldukça geniş bir kullanım ağına sahip olduğu

için kullanıcı forumları ve kütüphanelerinin fazla olması ile ücretsiz ve kullanılan bilgisayar platformundan bağımsız bir programlama dili olmasıdır.

Benzetim modelinin varsayımları aşağıdadır;

- İki üs ve bir ana bakım merkezi olmak üzere iki seviyeli bir onarım yapısı mevcuttur.
- Birinci üste 24 uçak, ikinci üste 16 uçak bulunmaktadır.
- Parçalar iki seviyelidir. Birinci seviyede bir parça, ikinci seviyede birinci seviyedeki parçaya bağlı olan iki parça bulunmaktadır. Birinci seviyede 15 parçanın bulunduğu durumda ikinci seviyede 30 parça ve toplamda 45 parça olmaktadır.
- Ürün yapısı içerisinde mevcut tüm parçaların ayrık nitelikte olduğu kabul edilmektedir.
- Parçaların arıza yapma oranları, üs ve ana bakım merkezinde ilgili parçalardan oluşan stok miktarları rassal olarak oluşturulmuştur.
- Ayrıca uçak sisteminin istenen zamandaki hazırbulunurluğunu değerlendirmek amacıyla rassal olarak görev planları oluşturulmuştur. Görevler 2'li kol ve 4'lü kol olacak şekilde, üsteki uçak sayıları göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. 2'li kol görev için 2 uçağın kullanılacağını, 4'lü kol ise görev için 4 uçağın kullanılacağını ifade etmektedir.
- Benzetim modeli, çalışma günleri ve hava şartları nedeniyle uçuş yapılamayacak olan gün sayısı dikkate alınarak 200 gün için çalıştırılmıştır.
- Ayrıca gün içerisindeki faaliyetlerin hesaplamalara etkisini ortaya koyabilmek için gün iki dilime ayrılmıştır. Benzetim zamanı süre yerine iki dilimden oluşan 200 gün olarak düşünülmüş ve toplamda 400 dilimlik benzetim koşturulmuştur. Her bir dilim ayrık olay olarak dikkate alınmış ve benzetim elemanlarının durumları dilim değişimlerinde güncellenmiştir.

4.1.1. Benzetim modeli parametreleri

Benzetim modelinde kullanılacak parametre değerlerinin belirlenmesine yönelik araştırma yapılmıştır, ancak literatürde bu tez çalışması ile benzer nitelikte, mevcut modelde yer alan parametreleri içeren bir çalışma veya problem seti mevcut olmadığı için parametrelere ilişkin referans değer bulunamamıştır.

Bazı çalışmalarda yer alan tek bir parametre değeri dikkate alınabilecek olsa da bunun mevcut problemin içerisinde anlamlı ve problemin bütünselliğine uygun bir durum oluşturmayacağı görülmüştür. Bu kapsamda, mevcut modelde yer alan ve detayları aşağıda

açıklanmış olan parametre değerleri veya değer aralıkları, toplam sekiz kişiden oluşan konunun uzmanı personele uygulanan Delphi tekniği ile belirlenmiştir.

Stokta bulundurma maliyeti

Bir parçanın üs veya bakım merkezi depolarında bulundurulmasının benzetim süresi içerisindeki maliyetidir. Maliyetler 10 ile 30 avro arasında düzgün dağılım ($U(10,30)$) ile rassal olarak üretilmiştir.

Sipariş verme maliyeti

Şayet arızalı parça üs veya bakım merkezi deposunda bulunmamakta ise parçanın sipariş verilerek tedarik edilmesi gerekmektedir. Tedarik zamanı göz ardı edilmiş, bunun maliyet olarak yansıyacağı kabul edilerek sipariş verme maliyeti için 100 avro sabit değer olarak dikkate alınmıştır.

Arızalı parça değiştirme maliyeti

Herhangi bir parçanın arıza yapması durumunda yenisi ile değiştirilmesi gerekmektedir. Bu maliyet ile bakım personelinin gerçekleştirdiği faaliyetlerin ekonomik değeri hesaba katılmıştır. Arızalı parçanın üste değiştirilmesi durumunda 5 avro, bakım merkezinde değiştirilmesi durumunda 10 avro sabit maliyet olarak dikkate alınmıştır.

Onarım seviyesi kararı

Arızalı olan parçanın tamir edilmesi veya atılmasına ilişkin alınacak karardır. Bu kararlar şöyledir;

1. Üste tamir etme
2. Üste atma
3. Bakım merkezinde tamir etme
4. Bakım merkezinde atma

Problemin ilk aşamasında bu karar her bir parça için rassal olarak yaratılmış ve parametre olarak kullanılmıştır. Ancak ikinci aşamada, yani YTP ile OSA'nın beraber çözümünde bu parametre karar değişkeni olarak dikkate alınmıştır.

Onarım seviyesi kararı maliyeti

Onarım seviyesine ilişkin kararın maliyeti olarak değerlendirilmiş ve her bir seçenek için 5-20 avro arasında düzgün dağılımla ($U(2,20)$) veriler üretilmiştir.

Arıza matrisi

Her bir parça için üstel dağılım kullanılarak oluşturulan bu matriste yer alan değer, ilgili parçanın belirtilen zamanda arıza yapacağını göstermektedir. Birinci seviyedeki parçalar için arıza yapma süresi üstel dağılım ile 50 saat [$Expo(50)$], ikinci seviyedeki birinci seviye parçalar için 20 saat [$Expo(20)$] ve ikinci seviye parçalar için 10 saat [$Expo(10)$] olarak alınmıştır.

Görev planı

Her gün ve gün içerisindeki iki farklı zaman dilimi için yani benzetimin her bir adımı için oluşturulmuş plandır.

- Birinci üs: Her gün için düzgün dağılım ile 4-7 arasında ($U(4,7)$) 2'li kol görevleri, 1-2 arasında ($U(1,2)$) 4'lü kol görevleri üretilmiş ve günün iki farklı zaman dilimine atanmıştır.
- İkinci üs: Her gün için düzgün dağılım ile 2-6 arasında ($U(2,6)$) 2'li kol görevleri, 0-2 arasında ($U(0,2)$) 4'lü kol görevleri üretilmiş ve günün iki farklı zaman dilimine atanmıştır.

Görev süresi

Her bir görev için ortalaması 2 saat, standart sapması 0,5 saat olacak şekilde ($Norm(2, 0.5)$) oluşturulan görev yapma süreleridir. Bu süreler görev sonrasında arıza matrisinde yer alan sürelerden düşülmektedir.

Tamir/değiştirme zamanı

Tamir/değiştirme kararı verilen parçanın bir benzetim zaman dilimi boyunca işlem gördüğü kabul edilmiş, bu süre sonunda ilgili parça stoka ilave edilmiştir. Ancak yedek parça tamir işleminin yapıldığı yerde değıl, bir üst seviyedeki bakım merkezinde ise tamir faaliyetinin 4

benzetim zaman dilimi sonrasında yapıldığı; eğer hiçbir depoda mevcut değil de sipariş ile tedarik edilecek ise 10 benzetim zaman dilimi sonrasında yapıldığı kabul edilmiştir.

Bakım personeli

İlgili benzetim zaman diliminde bakım personelinin hazırbulunurluğunu dikkate almak için düzgün dağılımla 0 ile 1 arasında ($U(0,1)$) rassal değer üretilmiştir. Şayet rassal değer 0,2'den küçük ise bakım personelinin hazır olduğu, aksi durumda ise bakım personelinin bir zaman dilimi sonrasında hazır olacağı kabul edilmiştir.

Minimum ve maksimum stok seviyeleri

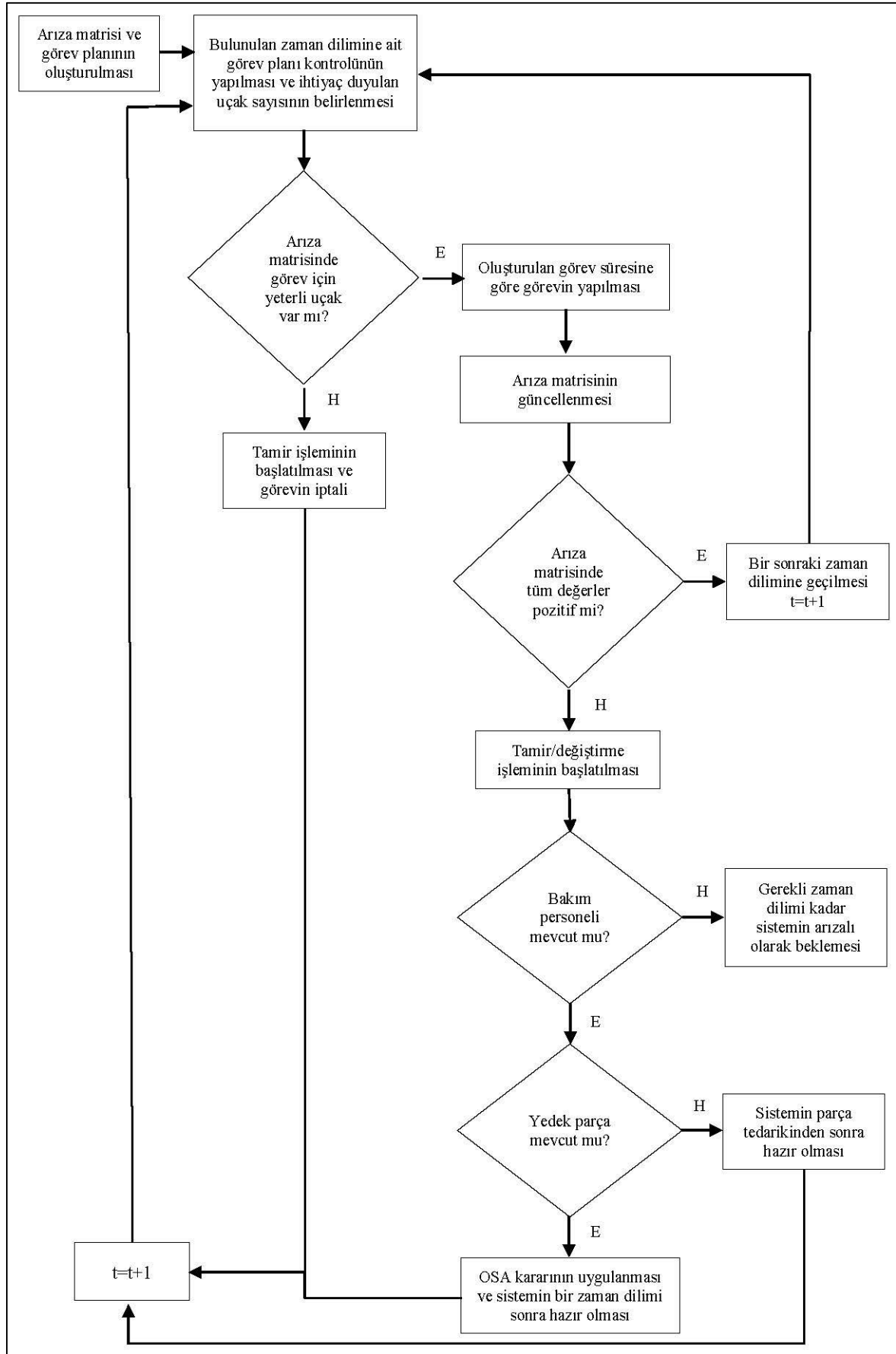
Her bir depoda yer alacak minimum ve maksimum parça sayılarını ifade etmektedir. Çözüm uzayını anlamlı şekilde küçültmek için bu şekilde bir yaklaşım geliştirilmiş, minimum stok seviyesi sıfır olarak dikkate alınmıştır. Maksimum stok seviyesi ise deney tasarımı ile belirlenmiş olup, izleyen kısımlarda açıklanacaktır.

Benzetim modelinin karar değişkeni, her bir depoda yer alacak parça sayıları olarak belirlenmiştir. Problemin ikinci aşamasında onarım seviyesi kararı da karar değişkeni olarak dikkate alınmış ve YTP ile OSA problemi bütünleşik olarak çözülmüştür.

4.1.2. Benzetim modeli adımları

Çalışmada kullanılan benzetim modelinin genel işleyiş adımları Şekil 4.1'de verilmiş ve detayları aşağıda açıklanmıştır. Açıklanan işlemler “R” programlama dilinde kodlanarak benzetim modeli koşturulmuştur. Benzetim optimizasyonu için oluşturulan modelin “R” kodu EK-1'dedir.

- Benzetim modeli parametreleri 4.1.1.'de verilmiştir.
- Benzetime ilişkin ilk zaman dilimi ile birlikte *görev planı* kontrol edilmekte ve o zaman diliminde uçuşun olup olmadığı, var ise 2'li kol mu yoksa 4'lü kol mu olduğu sorgulanmaktadır.



Şekil 4.1. Benzetim modeli aşamaları

- Sorgulama sonucunda ihtiyaç duyulan uçak sayısı ilgili üs için oluşturulmuş olan parçalara ait *arıza matrisinden* bakılmakta ve uçak sayısı kadar pozitif satır mevcut ise görev başlamaktadır. Yeterli sayıda uçak yok ise *tamir* işlemi devreye girmekte fakat görev icra edilememektedir.
- Görevin başlaması ile birlikte uçağın *görev süresi* kadar zaman faaliyette olduğu kabul edilmektedir. O zaman dilimi sonunda üretilen görev süresi kadar zaman, ilgili uçağın *arıza matrisinde* yer alan tüm parça değerlerinden çıkarılmaktadır. Bu işlem sonrasında parçalardan herhangi birisi pozitif değer taşımıyorsa tamir işlemi devreye sokulmaktadır.
- Tamir/değiştirme işleminin başlatılması için öncelikle bakım personelinin varlığı kontrol edilmektedir. Bu konu detayı yukarıdaki kısımda yer alan *bakım personeli* parametresinde açıklanmıştır.
- Bakım personelinden sonra arızalı parçanın depoda bulunup bulunmadığı kontrol edilmektedir. Bu kontrol sonucunda *tamir/değiştirme zamanı* parametresinde açıklanan akışa göre işlem yapılmaktadır.
- Son olarak da arızalı parça için geçerli olan onarım seviyesi kararına bağlı olarak işlem yapılmaktadır. Parçanın tamir edilmesi kararı uygulanacak ise parça ilgili seviyede tamir edilmekte ve tamir işlemi sonrasında depoya yeni bir parça olarak ve arıza matrisindeki değeri tekrar rassal olarak üretilerek eklenmektedir.
- Yukarıda açıklanan tüm kontrol ve işlemlerin ardından bir zaman dilimi sona ermekte ve benzetimin bir sonraki zaman dilimine geçilmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi benzetim modeli 200 gün için çalıştırılmaktadır ve her gün için iki farklı zaman dilimi mevcuttur.

4.2. Optimizasyon Algoritması

Benzetim optimizasyonu modelinin amaç fonksiyonları olarak toplam maliyet ve toplam uçuş saati dikkate alınmıştır. Özellikle YTP ile ilgili yapılan önceki çalışmaların büyük bölümünde hazırbulunuşluğu maksimize etmenin temel amaç olarak ele alındığı görülmektedir. Ancak sistemin hazırbulunuşluğu ile sistemden istenen fonksiyonun gerçekleştirildiği süre arasında doğrudan bir bağlantı kurulamamaktadır. Örneğin bir sistemin gün içerisinde %75 hazırbulunuşluğu sağlandığı zaman toplamda 10 saatlik bir operasyon süresi elde edilebileceği gibi aynı hazırbulunuşluk oranı ile 8 saatlik bir operasyon süresi de elde edilebilecektir. Çünkü hazırbulunuşlukta sistemin toplam elde bulundurulduğu zaman ile arızalı olduğu zaman arasındaki oran dikkate alınmaktadır. Oysa ki pratikte önemli

olan hususlardan birisi sistemin arzu edilen zamanda hazırbulunuşluğunun sağlanmasıdır. Yani gün içerisinde hazır olmayan bir sistemin ihtiyaç duyulmayan gece zamanında hazır olmasının bir katkısı bulunmamaktadır. Bu nedenle YTP için oluşturulan çok amaçlı benzetim optimizasyonu modelinin amaçlarından birisi toplam uçuş saati olarak belirlenmiştir. Uçak sistemlerinden temel beklenti mümkün olan en fazla sorti sayısı ve süresini üretebilmektir.

Amaçların belirlenmesinden sonra modelin optimizasyon bölümünde kullanılacak yöntemin belirlenmesi gerekmektedir. Problem büyüklüğü ve karmaşıklığı göz önünde bulundurularak optimizasyon için sezgisel bir yöntemin kullanılmasına karar verilmiştir. Sezgisel yöntem kararından sonra ortaya çıkan ilk soru, bu yöntemin tek çözüme dayalı bir algoritma mı olacağı, yoksa popülasyon tabanlı bir algoritma mı olacağıdır. Bu hususun belirlenmesinde karar değişkenin yapısı dikkate alınmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi benzetim optimizasyonunda dikkate alınan karar değişkeni her bir depoda yer alacak parça sayılarıdır. Popülasyon tabanlı algoritmaları düşündüğümüzde, sadece bir parçanın herhangi bir depodaki bir birimlik değişimi bile farklı bir çözüm noktası olarak ele alınabilecektir. Fakat bu şekilde ortaya çıkacak yeni çözüm noktaları amaç fonksiyonları üzerinde kayda değer bir değişim oluşturmayabilir. Bu nedenle mevcut modelin çözümünde tek çözüme dayalı bir yöntemin kullanılmasına karar verilmiş ve bu kapsamda literatürde sıklıkla kullanılan Tavlama Benzetimi yöntemi seçilmiştir.

Tavlama Benzetimi, katıların ısıtılması ve sonra yavaş yavaş soğutulması esasına dayanan katıların fiziksel tavlama sürecinden esinlenmiş olan bir stokastik arama yöntemidir. Bu yöntemde, amaç fonksiyonunda arzu edilmeyen yönde bir değişim gösteren bir komşu çözüm de zaman zaman rassal olarak kabul edilmektedir. Böylece arama uzayının farklı noktalarına gidilmesi hedeflenmektedir.

Tavlama benzetimi yönteminde; başlangıç sıcaklığı, soğutma oranı, iterasyon sayısı gibi parametrelere ihtiyaç duyulmaktadır. Modelin çözümünde, bu parametrelerin belirlenmesine ilişkin deney tasarımı oluşturulmuş olup, bunlarla ilgili ayrıntılar izleyen kısımlarda verilecektir. Bu parametrelerin belirlenmesinin yanında diğer önemli bir konu da algoritma içerisinde komşu çözümleri üretecek komşuluk yapısının belirlenmesidir. Bu çalışmada komşu çözümleri oluşturmak için Gaussian perturbation yöntemi kullanılmıştır. Karar değişkeninde yer alan değerlerin her bir depoda yer alan parça sayıları olduğu

düşünüldüğünde, Gaussian perturbation yöntemi kullanılarak oluşturulan yeni komşu çözüm noktasında da farklı parça sayılarından oluşan bir çözüm mevcut olacaktır. Gaussian perturbation yönteminde maksimum ve minimum stok seviyeleri arasındaki fark dikkate alınarak ve normal dağılım kullanılarak yeni çözüm noktası oluşturulmaktadır.

Modelin çözümünde Tavlama Benzetimi algoritması kullanılırken önemli olan bir diğer konu ise yeni çözüm ile eski çözüm arasındaki farkın belirlenmesi ve buna bağlı olarak kabul/ret mekanizmasının çalıştırılmasıdır. Tek amaçlı klasik problemlerde yeni ve eski çözüm arasındaki fark basit bir çıkarma işlemi ile ortaya konmaktadır. Ancak çok amaçlı problemlerde problemin yapısına bağlı olarak farklı yaklaşımların kullanılması söz konusu olabilmektedir. Alternatif yaklaşımlardan ilki tek amaçlı problemlerde olduğu gibi amaç fonksiyonlarının farklarının alınması ve bu farkların toplamına göre bir değerlendirmenin yapılması şeklinde olabilir. Mevcut problemde olduğu gibi amaç fonksiyonlarının değerleri arasında büyük farklılıkların olması durumunda bu yaklaşımın çok sağlıklı olmayabileceği, birimlerden bağımsız bir yaklaşımın kullanılmasının daha uygun olacağı düşünülmüştür.

Bu kapsamda çözüm noktaları arasındaki fark hesaplanırken, Çakır, Altıparmak ve Dengiz (2011)'in çalışmasında olduğu gibi amaç fonksiyonları arasındaki farkların yüzdelik değişimleri üzerinden kabul/ret olasılığı kullanılmıştır. Tavlama benzetimi algoritmasında kullanılacak delta değerinin hesaplanmasına ilişkin denklem Eş. 4.1'de, kabul/ret olasılığına ilişkin değerlendirme ise Eş. 4.2'de gösterilmiştir.

$$\Delta\% = \left[\frac{f_{yeni} - f_{eski}}{f_{eski}} \right] \times 100 \quad (4.1)$$

$$P(Kabul) = e^{-\Delta\%/T} \quad (4.2)$$

4.3. Benzetim Modelinin Çalıştırılması

Gerçek veriler kullanılmadığından dolayı sonuçların girdilere bağlı olarak değişebileceği, ancak oluşturulan kavramsal yapının gerçek verilerin temin edilmesi durumunda etkinlikle kullanılabileceği düşünülmektedir.

Oluşturulan benzetim modeli optimizasyon algoritmasında kullanılacak bir araçtır. Optimizasyon algoritmasında değerlendirmeye alınan çözüm noktasına ilişkin amaç fonksiyonu değerleri benzetim modeli ile elde edilmiştir. Yukarıda belirtilen iki amacı optimize edecek şekilde optimizasyon algoritması belirlenmiş, durdurma koşulu gerçekleşinceye kadar döngüye devam edilmiştir.

4.3.1. Benzetim optimizasyonu ve tavlama benzetimi parametrelerinin belirlenmesi

Hwang ve Yoon (1981) tarafından ilk olarak ortaya konan ve yaygın olarak kullanılan çok kriterli karar verme tekniklerinden biri olan TOPSIS yöntemi belirlenen kriterler doğrultusunda alternatiflerin ideal çözüme uzaklıklarına göre değerlendirme yapmaktadır. Bu değerlendirme pozitif ve negatif ideal çözümlerden uzaklığa göre yapılmaktadır. Mevcut çalışmada ise TOPSIS yöntemi, benzetim optimizasyonu parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmıştır.

Bu doğrultuda öncelikle tavlama benzetimi algoritmasının parametreleri ile benzetim modelinin koşum sayısının belirlenmesi gerekmektedir. Belirlenecek parametreler olarak; başlangıç sıcaklığı, soğutma oranı, tavlama benzetimi algoritması iterasyon sayısı, maksimum stok seviyesi ve benzetim modeli koşum sayısı dikkate alınmıştır. Her bir parametre için Çizelge 4.1’de belirtilen üç farklı seviyede değerler hesaplamaya alınmıştır.

Ayrıca benzetim optimizasyonunda dikkate alınması gereken parça sayısının da önemli olduğu düşünülmektedir. Bunun için de benzetim parametrelerinin belirlenmesinde olduğu gibi Delphi tekniği ile konunun uzmanlarından yardım alınmıştır. Bu kapsamda modelde kullanılabilecek parça sayısı olarak 300 parça belirlenmiştir. Aslında uçak sistemi gibi büyük ve karmaşık bir sistem içerisinde oldukça fazla sayıda parça bulunmaktadır. Ancak bu parçaların hepsi için bu çalışma kapsamında bir analiz yapılmasına gerek duyulmamaktadır. Bu parçaların büyük çoğunluğu için ekonomik olmayan analiz yaklaşımları ile çözümler üretilmektedir. Örneğin parçaların çok ucuz olması veya teknik olarak arıza durumunda yapılacak işlemin çok kesin olarak belli olması durumunda ayrıca bir ekonomik analiz gerçekleştirmeye gerek yoktur. Pratikte de bu durum bu şekilde gelişmekte olup, özellikle katma değer yaratacak ve ekonomik analize ihtiyaç duyulan parçalar dikkate alınmaktadır.

Çizelge 4.1’de yer alan parametre seviyeleri için Design Expert 10 programında iki faktör etkileşimi (two factor interaction-2FI) kullanılarak 56 farklı dizayn noktası oluşturulmuştur. Deney tasarımı kullanılarak söz konusu dizayn noktalarının listesi EK-2’de sunulmuştur. Amaç, benzetim optimizasyonunda temel alınacak dizayn noktasının belirlenmesi için bir analiz yapılması ve bu analizin sonucuna göre en iyi dizayn noktasının belirlenerek çalışmanın geri kalan bölümünde tüm hesaplamaların bu değerlere göre gerçekleştirilmesini sağlamaktır.

Çizelge 4.1. Analiz parametrelerine ait seviyeler

Parametreler	Seviye-1	Seviye-2	Seviye-3
Başlangıç Sıcaklığı	50	100	200
Soğutma Oranı	0,6	0,8	0,95
İterasyon Sayısı	50	100	200
Maksimum Stok Seviyesi	10	30	50
Benzetim Sayısı	10	20	30

Model çalıştırılırken benzetim koşullarının ortalaması amaç fonksiyonu değerleri olarak dikkate alınmıştır. Ayrıca çözüm noktaları arasında adil bir karşılaştırma yapabilmek için benzetim modelinde üretilen rassal değerlerin, optimizasyon algoritmasının çalıştırıldığı tüm noktalar için aynı olması sağlanmıştır. Çünkü iki farklı çözüm noktasını tamamen farklı bir senaryo uzayı üzerinden karşılaştırmanın, bir başka ifade ile çözüm noktasını iyileştirerek global optimum noktasını ararken yapılacak hareketlerde kullanılacak benzetimin de aynı olması gerektiği değerlendirilmiştir.

En iyi dizayn noktasının seçimi için TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) yöntemi kullanılmıştır. İnceleyebildiğimiz kadarıyla, TOPSIS’in bu amaç için kullanılan ilk çalışma olması yönüyle de bu tezin literatüre katkı sağladığını söylemek mümkündür.

Modelin çözümünde en genel hal olarak 300 parçanın alınacağı daha önce açıklanmıştı. Ancak daha gürbüz bir yaklaşım sergilemek, parça büyüklükleri arasındaki farkların da

etkilerini gözlemlemek için en iyi dizayn noktasının seçiminde 30, 60, 150 ve 300 parça büyüklüğü kullanılmıştır.

Öncelikle 56 dizayn noktasında yer alan parametre değerleri kullanılarak her bir parça büyüklüğü için çözüm gerçekleştirilmiş ve sonuçta elde edilen toplam uçuş saati ve toplam uçuş maliyeti değerleri kaydedilmiştir. Daha sonra amaç fonksiyonu ağırlıkları eşit alınarak ve her bir parça büyüklüğü için ayrı ayrı olacak şekilde TOPSIS analizi gerçekleştirilmiştir.

30, 60, 150 ve 300 parça büyüklüğü için TOPSIS yöntemi ile elde edilen sıralamalar kayıt altına alınmış ve deney tasarımında yer alan tüm dizayn noktalarının satır değerleri toplanarak ilgili dizayn noktasına ait son sıralama değerleri bulunmuştur. Daha küçük sıralama değerine sahip olan dizayn noktasının tercih edilecek olması nedeniyle genel sıralama, TOPSIS analizi sonucunda belirlenen sıralama toplamalarına göre küçükten büyüğe göre dizilmiştir. Söz konusu sıralamaya ait liste EK-3'te verilmiştir. Yapılan analiz neticesinde en düşük sıralama değerine sahip olan ve Çizelge 4.2.'de verilen 9'uncu dizayn noktası, benzetim optimizasyonu çözümünde kullanılacak temel parametre değerleri olarak belirlenmiştir. Çalışmanın kalan bölümünde yapılacak analizler bu dizayn noktasındaki parametre değerleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.2. En iyi dizayn noktası

Başlangıç Sıcaklığı	Soğutma Oranı	İterasyon Sayısı	Maksimum Stok Seviyesi	Benzetim Sayısı
100	0,8	100	10	10

4.3.2. YTP'nin çok amaçlı benzetim optimizasyonu

Çizelge 4.2'de yer alan parametre değerleri kullanılarak YTP'nin çok amaçlı benzetim optimizasyonu 30, 60, 150 ve 300 parça büyüklüğü için ayrı ayrı olarak hesaplanmıştır. Böylece gerek tekil çözümün gerekse izleyen kısımda sunulacak bütünsel çözümün parça büyüklüklerine bağlı olarak gösterebilecekleri değişimler izlenmek istenmiştir. Ayrıca daha rafine bir çözüm kümesi oluşturabilmek için modelin 10 kez çözümü gerçekleştirilmiş ve her seferde elde edilen pareto optimum çözümler kaydedilmiştir. Nihai olarak elde edilen tüm çözümler arasında da domine edilen çözümler çıkarılmış ve rafine ve daha gürbüz bir

pareto optimum çözüm seti elde edilmiştir. Bu şekilde gerçekleştirilen analiz sonucunda elde edilen pareto optimum çözümler Çizelge 4.3'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.3. YTP'nin çok amaçlı benzetim optimizasyonu sonuçları

30 Parça		60 Parça		150 Parça		300 Parça	
Toplam Uçuş Saati	Toplam Maliyet (euro)	Toplam Uçuş Saati	Toplam Maliyet (euro)	Toplam Uçuş Saati	Toplam Maliyet (euro)	Toplam Uçuş Saati	Toplam Maliyet (euro)
2195	13 653 816	1738	24 108 753	1322	53 580 995	1106	97 578 915
2197	13 788 848	1757	24 114 482	1323	53 695 906	1114	97 815 567
2215	13 857 571	1759	24 176 018	1331	53 908 596	1116	98 202 904
2216	14 083 721	1765	24 594 050	1337	54 040 605	1124	98 922 825
2221	14 215 145	1767	24 704 640	1340	54 546 243	1126	99 178 011
		1777	24 795 882	1343	54 763 166	1135	100 204 862
		1778	25 604 902	1346	54 892 396	1143	101 043 728
				1347	55 330 826	1144	101 241 762
				1350	55 681 870		
				1355	56 108 866		

Çizelge 4.3'teki sonuçlara baktığımızda parça sayısı arttıkça toplam uçuş saatinin azaldığı, toplam maliyetin ise arttığı gözlemlenmektedir. Çünkü parça sayısı arttıkça sistemin karmaşıklığı da artmakta, buna bağlı olarak sistemin operasyonel olarak kullanıma verilebilme olasılığı negatif yönde etkilenmektedir. Bir parçanın bile arızalı olması durumunda uçuş faaliyeti gerçekleştirilememektedir. Benzer şekilde parça sayısı arttıkça maliyete etki eden sayı da arttığı için toplam maliyetin de artması kaçınılmazdır. Ayrıca parça sayısı ile elde edilen pareto optimum çözüm sayısı arasında da net bir ilişki olduğundan söz etmek mümkün değildir.

4.3.3. YTP ve OSA'nın bütünleşik çok amaçlı benzetim optimizasyonu

Oluşturulan modelin 4.3.2. kısmında yer alan çözümünde OSA kararı rassal olarak oluşturulmuş ve karar değişkeni olarak dikkate alınmamıştır. Karar değişkeni olarak sadece her bir parçadan ilgili depoda yer alacak miktar dikkate alınmıştır. YTP ve OSA'nın bütünleşik optimizasyonunda ise OSA kararı da bir karar değişkeni olarak dikkate alınmış ve ilgi parça hakkındaki OSA kararı matrise eklenen yeni bir sütun olarak kabul edilmiştir.

Ayrıca OSA probleminin kendi yapısı içerisinde mevcut olan baba-oğul parçalar arasındaki kısıt da modele eklenmiştir. Modelin çözümündeki diğer hususlarda herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Bütünleşik çok amaçlı benzetim optimizasyonu sonucunda elde edilen pareto optimum çözümler Çizelge 4.4’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.4. YTP ve OSA’nın bütünleşik çok amaçlı benzetim optimizasyonu sonuçları

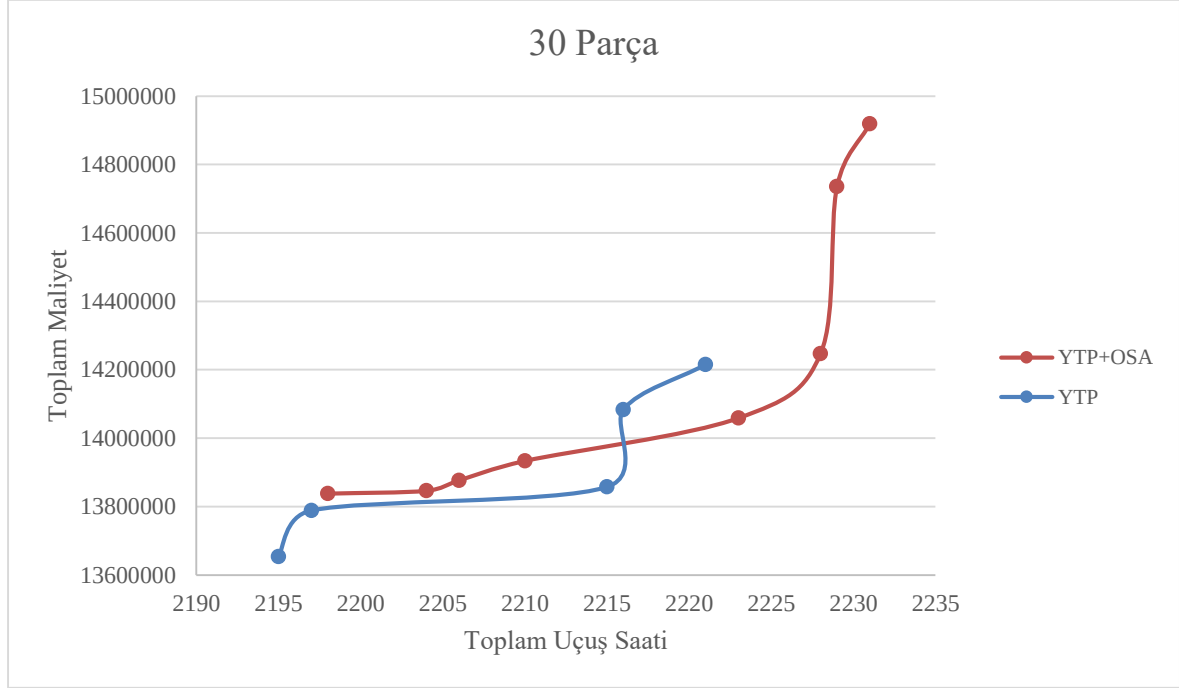
30 Parça		60 Parça		150 Parça		300 Parça	
Toplam Uçuş Saati	Toplam Maliyet (euro)	Toplam Uçuş Saati	Toplam Maliyet (euro)	Toplam Uçuş Saati	Toplam Maliyet (euro)	Toplam Uçuş Saati	Toplam Maliyet (euro)
2198	13 837 979	1752	23 723 947	1303	52 183 377	1093	96 640 240
2204	13 846 321	1756	24 239 532	1315	52 828 569	1104	97 029 855
2206	13 876 724	1758	24 246 532	1325	53 063 028	1115	97 280 338
2210	13 933 485	1768	24 280 569	1327	53 221 644	1123	97 810 666
2223	14 058 723	1771	24 545 657	1332	53 292 266	1129	98 441 788
2228	14 247 266	1774	24 611 717	1334	53 567 063	1137	99 290 950
2229	14 735 539	1777	24 675 968	1350	53 714 970	1147	100 640 256
2231	14 919 440	1780	25 010 490	1352	55 020 842		
		1781	25 279 199	1353	55 235 998		
		1783	25 728 298	1354	55 270 983		
				1359	55 404 671		

Çizelge 4.4’deki sonuçlara baktığımızda da bir önceki kısımda elde edilen sonuçlar ile benzer bir durum olduğu görülmektedir. Yani parça sayısı arttıkça toplam uçuş saati azalmakta ve toplam maliyet artmaktadır. Yine tekil çözümdeki sonuçlarla benzer şekilde parça sayısı ile elde edilen pareto optimum çözüm sayısı arasında bir ilişki bulunmamaktadır. Sadece YTP için gerçekleştirilen çok amaçlı benzetim optimizasyonu ile YTP ve OSA’nın bütünleşik çözümü arasındaki farkın incelenmesine aşağıdaki kısımda yer verilmiştir.

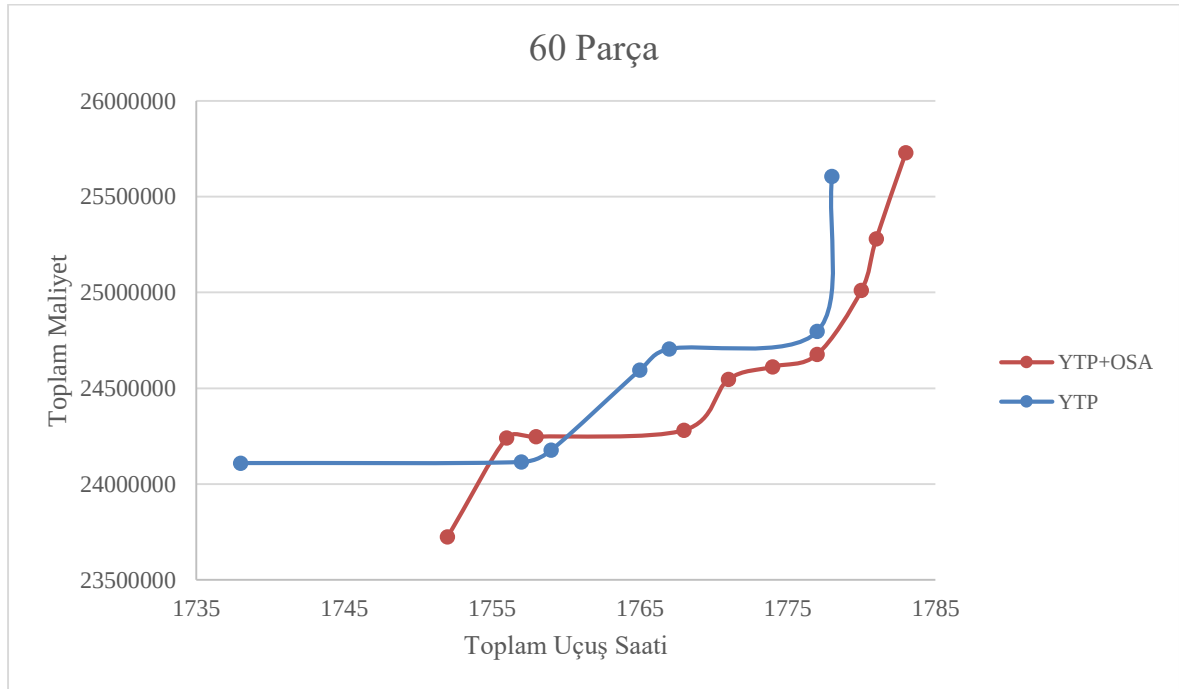
4.3.4. İki yaklaşımın karşılaştırılması

Bu kısımda, bütünleşik çözüm yaklaşımının elde edilen sonuçlara etkisinin olup olmadığı, bir etki söz konusu ise bunun hangi yönde olduğu incelenmiştir. Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4’de yer alan pareto optimum çözümlerin parça büyüklüklerine göre grafiksel gösterimi sırasıyla Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’te sunulmuştur.

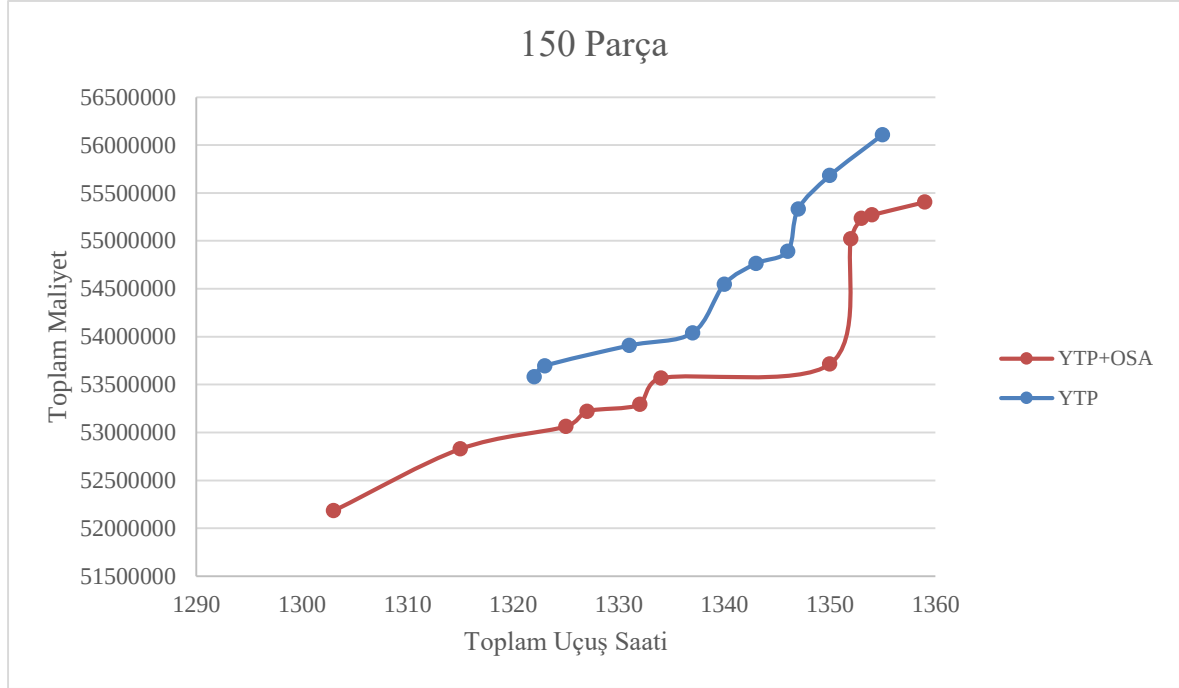
Grafiklerde yer alan “X” eksenindeki değerler toplam uçuş saatini göstermekte olup modelde amaç bu değerini maksimize edilmesidir. “Y” eksenindeki değerler ise toplam maliyeti göstermektedir ve bu amacın da minimize edilmesi istenmiştir. Bu nedenle arzu edilen, grafiklerin güneydoğu kısmına yakın sonuçların elde edilmesidir.



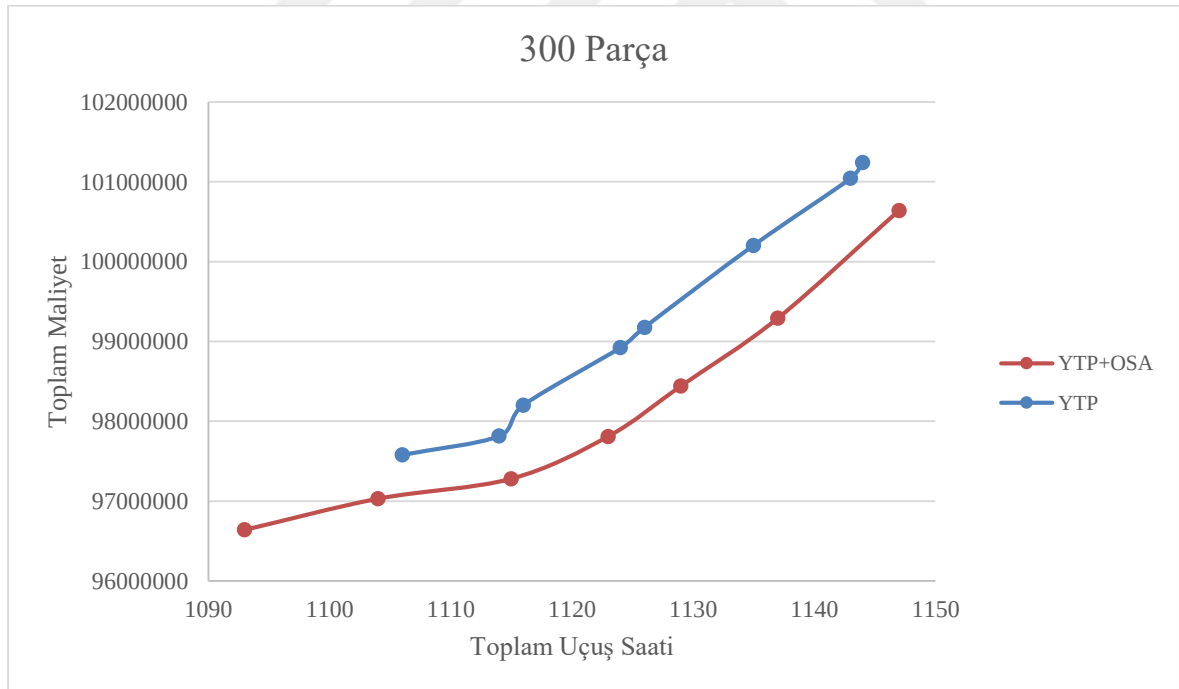
Şekil 4.2. 30 parça için karşılaştırma



Şekil 4.3. 60 parça için karşılaştırma



Şekil 4.4. 150 parça için karşılaştırma



Şekil 4.5. 300 parça için karşılaştırma

Grafikler genel olarak incelendiğinde, toplam uçuş saatindeki küçük değişimlerin bile kayda değer bir maliyet artışı ile söz konusu olduğu görülmektedir. Toplam uçuş saati askeri görevler için çok önemli bir veridir ve her bir saat, hatta her bir dakika kritik öneme sahip olabilmektedir. Bu nedenle planlayıcılar tarafından üretilen uçuş saati önemli olup, maliyet

konusu birinci öncelikli bir kısıt olarak dikkate alınmayabilmektedir. Fakat bu durumun operasyonel zamanlarda uygulanabileceği, normal zamanlarda ise maliyet olarak daha düşük olan alternatiflerin tercih edilebileceği değerlendirilmektedir. Bu noktada ihtiyaç ile maliyet arasında bir denge kurma gerekliliği de ortaya çıkmaktadır. Yapılacak olan görevlerin niteliğine göre yeri geldiği zaman maliyet bilgilerine göre planlamaların şekillendirilmesi söz konusu olabilecektir. Bu nedenle maliyet etkin ve sürdürülebilir bir sistem oluşturmak büyük önem taşımaktadır.

30 parça için Şekil 4.2'deki grafik incelendiğinde, tekil çözüm ile bütünsel çözüm arasında belirgin bir baskınlığın olmadığı görülmektedir. Ancak parça büyüklükleri arttıkça bütünsel çözümün daha iyi çözümler üretmeye başladığı görülmüştür. Grafiklerin incelenmesi neticesinde elde edilen bütünsel çözümün daha iyi sonuçlar ürettiği sonucunun matematiksel olarak da ortaya konulmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda öncelikle YTP'nin tekil çözümü ile YTP ve OSA'nın bütünsel çözümüne ilişkin elde edilen pareto optimum çözümler her bir parça büyüklüğü için birleştirilmiştir. Elde edilen çözüm havuzu içerisinde domine edilen çözümler çıkarılmış ve nihai bir pareto optimum çözüm kümesi oluşturulmuştur. Daha sonra oluşturulan yeni çözüm kümesinde yer alan pareto optimum çözümlerin, tekil veya bütünsel çözümlerin hangisinden hangi oranda desteklendiği belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan değerlendirmenin sonuçları Çizelge 4.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. Nihai pareto optimum çözüm kümesi temsil oranları

	YTP	YTP+OSA
30 Parça	34%	66%
60 Parça	20%	80%
150 Parça	0%	100%
300 Parça	0%	100%

Parça büyüklüğü arttıkça bütünsel çözümün daha iyi sonuçlar ürettiği Çizelge 4.5'te de görülmektedir. 30 parça için oluşturulan nihai pareto optimum çözüm kümesinin %66'sı bütünsel çözümden gelmekte iken, 60 parça için bu oran %80'e çıkmaktadır. 150 ve 300 parça için ise oluşturulan nihai pareto optimum çözüm kümesinin tamamı bütünsel çok

amaçlı benzetim optimizasyonu modelinden oluşmaktadır. Pratikte dikkate alınabilecek parça sayısı olarak 300 parçanın belirlendiği göz önünde bulundurulduğunda, bütünleşik çözümün daha iyi sonuçlar ürettiği çıkarımı doğrulanmıştır.





5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Uzun ömür sürelerine sahip ve pahalı sistemlerin ömür devri içerisinde icra edilen faaliyetlerinin detaylı olarak planlanması ve maliyet etkin bir sürekliliğin sağlanması gerekmektedir. Son dönemde dünyadaki ekonomik gelişmeler, ülkeler ve işletmelerin maliyet etkin bir sistem yönetimi geliştirmeleri gerekliliğini ortaya koymuştur. Artık sadece ilk satın alma maliyetleri değil, ömür devri içerisinde gerçekleştirilen tüm faaliyetler daha detaylı olarak ele alınmaya başlamıştır. Bu doğrultuda ömür devri maliyeti içerisinde önemi bir yeri olan idame işletme safhasına yönelik maliyetlerin azaltılması en önemli amaçlardan biri haline gelmiş ve bu problemin çözümüne ilişkin farklı yaklaşımlar geliştirilmeye başlanmıştır. Söz konusu yaklaşımlardan biri olan ve günümüzde uygulama alanı gittikçe artan Performansa Dayalı Lojistik (PDL), mevcut çalışmanın temel ilgili alanını oluşturmuştur.

Bu tez çalışmasında, literatürdeki eksiklikler göz önünde bulundurularak, Onarım Seviyesi Analizi (OSA) ve Yedek Parça Tahsis Problemi (YTP) PDL yaklaşımı çerçevesinde ele alınmıştır. Yapılan tüm modellemelerde, PDL yaklaşımı içerisinde lojistik destek faaliyetlerinden tümüyle sorumlu olacak üretici açısından değerlendirmelerde bulunulmuştur. Ancak geliştirilen modelin müşteriler tarafından da kullanılabileceği ve sonuçların PDL anlaşmasına yönelik görüşmelerde değerlendirilebileceği düşünülmektedir. Ancak müşteri tarafından söz konusu değerlendirmelerin yapılabilmesi için ilgili sistemin ürün yapısına ait mühendislik verilerinin de bilinmesi gerekmektedir.

Tezin üçüncü bölümünde, OSA problemi ilk defa PDL yaklaşımı içerisinde çok amaçlı olarak modellenmiştir. Modelin amaçları olarak; lojistik destek maliyetlerinin minimizasyonu, ortalama tamir zamanının minimizasyonu ve lojistik ayak izinin minimizasyonu dikkate alınmıştır. Oluşturulan çok amaçlı modelin çözümü için Epsilon Kısıt yönteminin geliştirilmiş hali olan AUGMECON2 yöntemi kullanılmıştır. Küçük boyutlu problemlerde kesin çözüme kısa sürede ulaşılabılırken, büyük boyutlu problemlerde aynı durum söz konusu olmamıştır. Modelde kullanılan parça sayısı arttıkça amaç fonksiyonu aralığı da genişlemektedir. Bu nedenle kesin çözüme ulaşılması kabul edilebilir zaman dilimi içerisinde mümkün olmamıştır. Bu durumda da AUGMECON2 yönteminin esnekliğinden faydalanılmış ve çözüm uzayı içerisinde farklı arama aralıkları kullanılarak bir nevi sezgisel yaklaşım ortaya konmuştur. Büyük boyutlu problemlerde, arama aralığı

sıkılaştıkça elde edilen pareto optimum çözüm sayısı ve çözüm süresinin arttığı görülmüştür. Çözüm süresinin elde edilen pareto optimum çözüm sayısı yanında kullanılan parça sayısına bağlı olarak da artış gösterdiği belirlenmiştir. Bu yaklaşım ile elde edilen sonuçlar, PDL ile ilgili çalışmalarda, özellikle adil bir ödeme algoritmasının oluşturulmasına katkıda bulunabilecektir. Model sonuçları doğrultusunda teşvik sisteminin de şekillendirilebileceği düşünülmektedir. Ayrıca ortaya konana çözüm yaklaşımı, sistem içerisinde yer alan ekonomik analiz gerektirecek nitelikteki parçaların bakım konseptlerinin oluşturulmasında da kullanılabilecektir.

Çalışmanın dördüncü bölümünde de YTP'nin çözümüne ilişkin çok amaçlı benzetim optimizasyonu modeli oluşturulmuştur. Benzetim yaklaşımının esnekliğinden faydalanılarak daha önce dikkate alınmamış çeşitli parametreler de modele dahil edilmiştir. İlk aşamada YTP'nin tekil çözümü Tavlama Benzetimi yöntemi kullanılarak, benzetim optimizasyonu şeklinde gerçekleştirilmiştir. Benzetim optimizasyonda yer alan Tavlama Benzetimi ve benzetim modeli parametrelerinin belirlenmesinde deney tasarımı gerçekleştirilmiş ve sonuçların değerlendirilmesinde TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Yapılan analiz neticesinde, parça sayısı arttıkça toplam uçuş saatinin azaldığı, toplam maliyetin ise arttığı gözlemlenmiştir. Çünkü parça sayısının artışı sistemin karmaşıklığını da artırmakta ve kullanım oranlarını olumsuz olarak etkilemektedir. İkinci aşamada ise OSA kararı mevcut karar değişkeninin bir parametresi olarak dikkate alınmış ve YTP ve OSA'nın bütünleşik çözümü gerçekleştirilmiştir. Küçük parça sayılarında tekil ve bütünleşik çözüm arasında belirgin bir baskınlık durumu gözlemlenemezken, parça büyüklükleri arttıkça bütünleşik yaklaşımın daha iyi çözümler üretmeye başladığı görülmüştür. Pratikte ekonomik analiz kapsamında ele alınabilecek parça sayısının büyüklüğü dikkate alındığında, bütünleşik çözümün daha iyi sonuçlar ortaya koyduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak, yapılan tez çalışmasının literatüre temel katkıları aşağıda verilmiştir.

- OSA probleminin PDL bakış açısı ile çok amaçlı olarak modellenmesi.
- YTP'nin PDL yaklaşımında kullanılabilecek şekilde çok amaçlı olarak modellenmesi.
- YTP ve OSA problemlerinin bütünleşik çözümü.
- Deney tasarımı sonuçlarının değerlendirilmesinde TOPSIS yönteminin kullanılması.

PDL yaklaşımının kendini tam olarak kanıtladığı söylenemese de önümüzdeki dönemde kullanılacak farklı sistemlerde uygulanacağı bilinmektedir. Bu nedenle PDL'ye ilişkin

birçok çalışma yapılabileceği, uygulamanın genişlemesi sonucunda farklı problem alanlarının ortaya çıkabileceği düşünülmektedir. Bu durum araştırmacılara yeni çalışma alanları vaat etmektedir. PDL yaklaşımının yaygınlaşması ile birlikte önümüzdeki dönemde icra edilebilecek çalışmalar aşağıda listelenmiştir. Yapılan çalışmanın aşağıda belirtilen yönlerle birlikte geliştirilmesi ve gelecek çalışmalara potansiyel sağlaması mümkündür.

- OSA probleminin modellenmesinde farklı amaçlar araştırılabilir.
- OSA probleminin başka bir lojistik analiz metoduyla birlikte ele alınması incelenebilir.
- Çözümler neticesinde ortaya çıkan pareto optimum çözümlerin detaylı analizine yönelik yaklaşımlar araştırılabilir.
- YTP için oluşturulan benzetim modeline yönelik farklı bir benzetim programı veya programlama dili kullanılabilir.
- Benzetim optimizasyonunda kullanılan tavlama benzetimi yerine farklı sezgisel algoritmalar araştırılabilir.
- YTP probleminin başka bir lojistik analiz metoduyla birlikte ele alınması incelenebilir.
- Benzetim optimizasyonunda kullanılan tavlama benzetimi algoritmasının geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılabilir.
- PDL yaklaşımında kullanılabilecek farklı amaçlar araştırılabilir.



KAYNAKLAR

1. Alalawin, A., Ghiani, G., Manni, E., and Triki, C. (2013). *Design of the logistics support of complex engineering systems*. Maintenance Performance Measurement and Management Conference, Lappeenranta, Finland.
2. Alfredsson, P. (1997). Optimization of multi-echelon repairable item inventory systems with simultaneous location of repair facilities. *European Journal of Operational Research*, 99(3), 584–595.
3. Barros, L. (1998). The optimization of repair decisions using life-cycle cost parameters. *IMA Journal of Mathematics Applied in Business & Industry*, 9(4), 403–413.
4. Barros, L., and Riley, M. (2001). A combinatorial approach to level of repair analysis. *European Journal of Operational Research*, 242–251.
5. Basten, R. J. I. (2009). *Designing logistics support systems: Level of repair analysis and spare parts inventories*. Dissertation, University of Twente, Netherlands.
6. Basten, R. J. I., Schutten, J. M. J., and van der Heijden, M. C. (2009). An efficient model formulation for level of repair analysis. *Annals of Operations Research*, 172(1), 119–142.
7. Basten, R. J. I., van der Heijden, M. C., and Schutten, J. M. J. (2011a). A minimum cost flow model for level of repair analysis. *International Journal of Production Economics*, 133(1), 233–242.
8. Basten, R. J. I., van der Heijden, M. C., and Schutten, J. M. J. (2011b). Practical extensions to a minimum cost flow model for level of repair analysis. *European Journal of Operational Research*, 211(2), 333–342.
9. Basten, R. J. I., van der Heijden, M. C., and Schutten, J. M. J. (2012). Joint optimization of level of repair analysis and spare parts stocks. *European Journal of Operational Research*, 222(3), 474–483.
10. Basten, R. J. I., van der Heijden, M. C., Schutten, J. M. J., and Kutanoglu, E. (2012). An approximate approach for the joint problem of level of repair analysis and spare parts stocking. *Annals of Operations Research*, 224(1), 121–145.
11. Bayram, M. (2010). *Performansa dayalı lojistik, ulusal kamu tedarik sistemindeki yeri ve bulanık mantık ile tedarikçi seçimi uygulaması*. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
12. Berkowitz, D., Gupta, J. N. D., Simpson, J. T. and McWilliams, J. (2005). Defining and implementing performance-based logistics in government. *Defense Aquisition Review Journal*, 11(3), 255-267.
13. Blanchard, B. S., and Fabrycky, W. J. (1998). *Systems engineering and analysis (3rd ed.)*. New Jersey: Prentice-Hall.

14. Bouachera, T. (2012). *Whole life costing optimisation with integrated logistics support considerations*. Dissertation, Robert Gordon University, UK.
15. Bouachera, T., Kishk, M., and Power, L. (2010). *Level of Repair Analysis based on Genetic Algorithm with Tabu Search*. Paper presented at the World Congress on Engineering, London, U.K.
16. Brick, E. S., and Uchoa, E. (2009). A facility location and installation of resources model for level of repair analysis. *European Journal of Operational Research*, 192(2), 479–486.
17. Büyükgöral, F. (2009). *A 4-step process evaluation model to assess the success of performance based logistics contracts*. Master's Thesis, Air Force Institute of Technology, USA.
18. Costantino, F., Di Gravio, G., and Tronci, M. (2013). Multi-echelon, multi-indenture spare parts inventory control subject to system availability and budget constraints. *Reliability Engineering & System Safety*, 119, 95–101.
19. Cranshaw, D., Pall, R., and Wesolkowski, S. (2014). On the application of a multi-objective genetic algorithm to the lora-spares problem. *Operations Research Proceedings 2012*, 509–514.
20. Çakır, B., Altıparmak, F., and Dengiz, B. (2011). Multi-objective optimization of a stochastic assembly line balancing: A hybrid simulated annealing algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 60(3), 376–384.
21. Defense Logistics Agency (1982). *Criteria for repair vs. discard decisions task 65-15*. Virginia: Defense Technical Information Center.
22. Eruguz, A. S., Tan, T., and Houtum, G. Van (2018). Integrated maintenance and spare part optimization for moving assets. *Institute of Industrial and Systems Engineers Transactions*, 50(3), 230–245.
23. Fan, J., Guo, L., Yang, Y., and Kang, R. (2013). EBO optimization considering the joint of LORA and spare stocks. *Chemical Engineering Transactions*, 33, 631–636.
24. Gardner, C. P. (2008). *Balancing Government Risk with Contractor Incentives in Performance-Based Logistics Contracts*. Master's Thesis, Air Force Institute of Technology, USA.
25. Ghaddar, B., Sakr, N., and Asiedu, Y. (2016). Spare parts stocking analysis using genetic programming. *European Journal of Operational Research*, 252(1), 136–144.
26. Glas, A. H., and Kleemann, F. C. (2017). Performance-based contracting: Contextual factors and the degree of buyer supplier integration. *Journal of Business & Industrial Marketing*, 677–692.
27. Gu, J., Zhang, G., and Li, K. W. (2015). Efficient aircraft spare parts inventory management under demand uncertainty. *Journal of Air Transport Management*, 42, 101–109.

28. Guide Jr., V. D. R., and Srivastava, R. (1997). Repairable inventory theory: Models and applications. *European Journal of Operational Research*, 102, 1–20.
29. Gutin, G., Rafiey, A., Yeo, A., and Tso, M. (2006). Level of repair analysis and minimum cost homomorphisms of graphs. *Discrete Applied Mathematics*, 154(6), 881–889.
30. Hu, Q., Boylan, J. E., Chen, H., and Labib, A. (2018). OR in spare parts management : A review. *European Journal of Operational Research*, 266(2), 395–414.
31. Hwang, CL., Yoon, K. (1981). *Methods for multiple attribute decision making*. In: *multiple attribute decision making*. Heidelberg:Springer.
32. Hypko, P., Tilebein, M., and Gleich, R. (2010). Clarifying the concept of performance-based contracting in manufacturing industries: A research synthesis. *Journal of Service Management*, 21(5), 625–655.
33. Ituarte-Villarreal, M.C., and Espiritu, Jose F. (2011). *A Decision support system for the level of repair analysis problem*. 41st International Conference on Computers and Industrial Engineering, Los Angeles, CA, USA.
34. Jaquez, D. V. (2009). *Multiple Objective Optimization of Performance Based Logistics*. *Industrial Engineering*. Master's Thesis, The University of Texas, USA.
35. Kennedy, W. J., Patterson, J. W., and Fredendall, L. D. (2002). An overview of recent literature on spare parts inventories. *International Journal of Production Economics*, 76, 201–215.
36. Kim, S.-H., Cohen, M. A., and Netessine, S. (2007). Performance contracting in after-sales service supply chains. *Management Science*, 53(12), 1843–1858.
37. Kumar, U. D., Nowicki, D. R., Ramirez-Marquez, J. E., and Verma, D. (2007). A goal programming model for optimizing reliability, maintainability and supportability under performance based logistics. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 14(3), 251–261.
38. Kusters, R. A. M. (2011). *The design of a logistic support system*. Master's Thesis, Eindhoven University of Technology, Netherlands.
39. Mavrotas, G., and Florios, K. (2013). An improved version of the augmented epsilon-constraint method (AUGMECON2) for finding the exact pareto set in multi-objective integer programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, 219(18), 9652–9669.
40. Mirzahosseini, H., and Piplani, R. (2011). A study of repairable parts inventory system operating under performance-based contract. *European Journal of Operational Research*, 214(2), 256–261.
41. MSI. (2018). Sektör, ömür devri yönetimi platformu ile yeni görevler üstlenmeye hazır. MSI. 2018-12-17. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.milscint.com%2Ftr%2Fsektor-omur-devri-yonetimi-platformu-ile-yeni-gorevler-ustlenmeye-hazir%2F&date=2018-12-17>. Son Erişim Tarihi: 17.12.2018.

42. Muckstadt, J. A. (1973). A model for a multi-item, multi-echelon, multi-indenture inventory system. *Management Science*, 20(4), 472–481.
43. Nielsen, V. D., and Shahal, H. (1981). *Application of life support cost, provisioning, and repair/discard models to weapon system procurement decisions by small countries, management*. Master's Thesis, Naval Postgraduate School, USA.
44. Nowicki, D., Kumar, U. D., Steudel, H. J., and Verma, D. (2006). Spares provisioning under performance-based logistics contract: profit-centric approach. *Journal of the Operational Research Society*, 59(3), 342–352.
45. Nowicki, D. R. (2008). *Optimization models in support of performance based logistics (PBL) contracts*, Dissertation, University of Wisconsin, USA.
46. Nowicki, D. R., Randall, W. S., and Ramirez-Marquez, J. E. (2012). Improving the computational efficiency of metric-based spares algorithms. *European Journal of Operational Research*, 219(2), 324–334.
47. Randall, W. S., Hawkins, T. G., Haynie, J. J., Nowicki, D. R., Armenakis, A. A., and Geary, S. R. (2015). Performance-based logistics and interfirm team processes : an empirical investigation. *Journal of Business Logistics*, 36(2), 212–230.
48. Randall, W. S., Nowicki, D. R. and Hawkins, T. G. (2011). Explaining the effectiveness of performance-based logistics: A quantitative examination. *The International Journal of Logistics Management*, 22(3), 324–348.
49. Randall, W. S., Pohlen, T. L., and Hanna, J. B. (2010). Evolving a theory of performance-based logistics using insights from service dominant logic. *Journal of Business Logistics*, 31(2), 35–61.
50. Saranga, H., and Kumar, U. D. (2006). Optimization of aircraft maintenance/support infrastructure using genetic algorithms - level of repair analysis. *Annals of Operations Research*, 143(1), 91–106.
51. Selviaridis, K., and Norrman, A. (2015). Performance-based contracting for advanced logistics services: Challenges in its adoption, design and management. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 45(6), 592-617.
52. Selviaridis, K., and Wynstra, F. (2014). Performance-based contracting: a literature review and future research directions. *International Journal of Production Research*, 1–36.
53. Sharma, P., Kulkarni, M. S., and Yadav, V. (2017). A simulation based optimization approach for spare parts forecasting and selective maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*, 168, 274–289.
54. Sherbrooke, C. C. (1968). Metric: A multi-echelon technique for recoverable item control. *Operations Research*, 16(1), 122–141.
55. Sherbrooke, C. C. (1986). Vari-metric: Improved approximations for multi-indenture, multi-echelon availability models. *Operations Research*, 34(2), 311–319.

56. Sleptchenko, A., Al, A., and Zijm, H. (2018). Joint planning of service engineers and spare parts. *European Journal of Operational Research*, 271(1), 97–108.
57. Sols, A., Nowicki, D. R., and Verma, D. (2007). Defining the fundamental framework of an effective performance-based logistics (PBL) contract. *Engineering Management Journal*, 19(2), 40-50.
58. Sols, A., Nowicki, D., and Verma, D. (2008). N-dimensional effectiveness metric-compensating reward scheme in performance-based logistics contracts. *Systems Engineering*, 11(2), 93–106.
59. Sols, A., Romero, J., and Cloutier, R. (2012). Performance-based logistics and technology refreshment programs: Bridging the operational-life performance capability gap in the Spanish F-100 frigates. *Systems Engineering*, 15(4), 422–432.
60. Timur, S. (2013). *Performansa dayalı lojistik (PDL) yönetimi ve türkiye havacılık ve uzay sanayi anonim şirketi uygulamaları*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
61. Triki, C., Alalawin, A., and Ghiani, G. (2013). *Optimizing the performance of complex maintenance systems*. 5th International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization, Hammamet.
62. Tsai, S. C., and Zheng, Ya-Xin (2013). A simulation optimization approach for a two-echelon inventory system with service level constraints. *European Journal of Operational Research*, 229(2), 364–374.
63. U.S. DoD (1988). MIL-STD-1390D Level Of Repair Analysis (LORA). (ABD Savunma Bakanlığı. Onarım Seviyesi Analizi Askeri Standardı).
64. U.S. DoD (2003). Directive 5000.01. (ABD Savunma Bakanlığı. 5000.01 Numaralı Direktif).
65. Wang, W. (2012). A stochastic model for joint spare parts inventory and planned maintenance optimisation. *European Journal of Operational Research*, 216(1), 127–139.
66. Yükselen, K. G. (2012). *An assessment tool of performance based logistics appropriateness*. Master's Thesis, Air Force Institute of Technology, USA.





EK-1. Benzetim optimizasyonuna ait “R” kodu

Benzetim optimizasyonu kapsamında kullanılan modelin; tavlama benzetimi, çok amaçlı tavlama benzetimi, uygunluk, genel ve uçuş benzetimi olarak oluşturulan modüllerine ait kodlama bilgileri aşağıya çıkarılmıştır. Modelin farklı dizayn noktaları için çalıştırılmasında, tavlama benzetimi ve genel olarak isimlendirilen modüllerin ilgili yerlerinde değişiklikler yapılması gerekmektedir.

Tavlama Benzetimi

```
rm(list=ls())
source('mosa.R')
source('fitness.R')
source('utils.R')
# -- Tavlama Benzetimi Parametreleri --
ITERATIONS = 100
INITIAL_TEMPERATURE = 100
COOLING_FACTOR = 0.8
TOTAL_EVALUATIONS = ITERATIONS + 1
# -- benzetim zamanı takibi --
eval.count = 0
start.time = as.numeric(Sys.time())
target.func <- function(inv.vector) {
  val = fitness(inv.vector)
  eval.count <- eval.count + 1
  time.spent = (as.numeric(Sys.time()) - start.time)
  print(sprintf("time: %0.0f:%0.0f (mins:secs); progress: %0.2f%%; val: (total.cost:
$%0.4g, flight.hours: %0.4g h); rate: $%0.4g/h", time.spent %/% 60, time.spent %/% 60,
eval.count / TOTAL_EVALUATIONS * 100, val[1], -val[2], val[1]/-val[2]))
  val
}
neighbor.func <- function(inv) {
  sd = 0.05 * (MAX_INVENTORY - MIN_INVENTORY)
  neigh.inv = round(rnorm(n = IDIM, mean = inv, sd = sd))
  neigh.inv[neigh.inv > MAX_INVENTORY] = MAX_INVENTORY
```

EK-1. (devam) Benzetim optimizasyonuna ait “R” kodu

```

    neigh.inv[neigh.inv < MIN_INVENTORY] = MIN_INVENTORY
    neigh.inv
}
main <- function(){
  start.time <- as.numeric(Sys.time())
  initial = sample(MIN_INVENTORY:MAX_INVENTORY, size=IDIM, replace=TRUE)
  fitness.init()

  sa.res = mosa(initial = initial,
    target = target.func,
    neighbor = neighbor.func,
    max.iter = ITERATIONS,
    init.temp = INITIAL_TEMPERATURE,
    cooling = COOLING_FACTOR)
  fitness.destroy()
  res = list()
  res$value = t(sapply(sa.res$pareto, function(it) it$value))
  res$par = t(sapply(sa.res$pareto, function(it) it$par))
  res$pareto.optimal = rep(TRUE,nrow(res$value))
  res$time = as.numeric(Sys.time()) - start.time
  save(res, file = "./target/sa-inventory.RData")
  save.moo.result.csv(res, file = "./target/sa-inventory.csv")
  res
}

```

Çok Amaçlı Tavlama Benzetimi (MOSA)

```

mosa <- function(initial, target, neighbor, max.iter = 100, init.temp = rep(200, times =
length(initial)), cooling = 0.95, cool.int = 5) {
  if (any(is.na(initial))) {
    stop("Initial candidate solution contains NAs")
  }
  if (is.null(target)) {
    stop("target function not provided")
  }
}

```

EK-1. (devam) Benzetim optimizasyonuna ait “R” kodu

```

}
if (is.null(neighbor)) {
  stop("neighbor function not provided")
}
if (max.iter <= 0) {
  stop("Invalid number of maximum iterations: ", max.iter, ". Value should be
positive.")
}
if (any(init.temp <= 0)) {
  stop("Invalid initial temperature: ", init.temp, ". Value should be positive.")
}
if (any(cooling <=0 || cooling >= 1)) {
  stop("Invalid cooling factor: ", cooling, ". Valid range is (0, 1).")
}
start.time = as.numeric(Sys.time())
x = initial
xval = target(x)
odim = length(xval)
pareto = list(list(par = x, value = xval))
temp = init.temp
for (it in 1:max.iter) {
  y = neighbor(x)
  if (any(is.na(y))) {
    stop("NAs introduced by the neighbor function")
  }
  yval = target(y)
  proj = sum((yval - xval)/xval)*100
  if (proj < 0 || runif(1) < exp(-proj/temp))
    x = y
    xval = yval
    pareto = updated.pareto(pareto, list(par = x, value = xval))
}

```

EK-1. (devam) Benzetim optimizasyonuna ait “R” kodu

```

    if(it %% cool.int == 0){
      temp = temp * cooling
    } else {
      temp = temp
    }
  }
}
list(pareto = pareto,
     time = as.numeric(Sys.time()) - start.time
)
}
dominates <- function (val1, val2) {
  all(val1 <= val2) && any(val1 < val2)
}
updated.pareto <- function (curr.pareto, new.item) {
  curr.front = lapply(curr.pareto, function(it){it$value})
  if (all(sapply(curr.front, function(it)!dominates(it, new.item$value)))) {
    mask = as.logical(sapply(curr.front, function(it) !dominates(new.item$value, it),
simplify = TRUE))
    new.pareto = curr.pareto[mask]
    if(all(as.logical(sapply(new.pareto, function(it){it$value != new.item$value})))) {
      new.pareto = append(new.pareto, list(new.item))
    }
    new.pareto
  } else {
    curr.pareto
  }
}
}
Uygunluk (FITNESS)
library(parallel)
source("common.R")
source("flight-simulation.R")
TARGET_FUNC_SAMPLES = 10

```

EK-1. (devam) Benzetim optimizasyonuna ait “R” kodu

```

PARALLEL_FLIGHT_SIM = TRUE
fitness.init <- function() {
  if (PARALLEL_FLIGHT_SIM) {
    par.cluster <- makeCluster(detectCores() - 1)
    cat("Using parallel cluster execution: ")
    print(par.cluster)
  }
}

fitness.destroy <- function() {
  if (PARALLEL_FLIGHT_SIM) {
    cat('Stopping cluster: ')
    print(par.cluster)
    stopCluster(par.cluster)
  }
}

fitness <- function(inventory, elor){
  if (PARALLEL_FLIGHT_SIM) {
    fun = flight.simulation
    sim.samp = parSapply(cl = par.cluster, 1:TARGET_FUNC_SAMPLES, FUN =
function(i){fun(inventory, i)})
  } else {
    sim.samp = sapply(1:TARGET_FUNC_SAMPLES, FUN =
function(i){flight.simulation(inventory = inventory, randomSeed = i, ELOR = elor)})
  }
  val = apply(sim.samp, MARGIN = 1, FUN = mean)
  round(val * c(1, -1))
}

```

Genel (COMMON)

NUMBER_OF_LOCATIONS = 3

NUMBER_OF_LRUS = 20

NUMBER_OF_SRUS = 1+2

IDIM = NUMBER_OF_LOCATIONS * NUMBER_OF_LRUS * NUMBER_OF_SRUS

EK-1. (devam) Benzetim optimizasyonuna ait “R” kodu

```
ODIM = 2
MIN_INVENTORY = 0
MAX_INVENTORY = 10
MIN_ELOR = 1
MAX_ELOR = 4
ELOR_ENABLED = TRUE
```

Uçuş Benzetimi (FLIGHT.SIMULATION)

```
flight.simulation <- function(inventory,randomSeed, ELOR = NULL, plot=FALSE){
  numberOfBases=2
  numberOfSystems=c(24,16)
  numberOfdays=200
  timesPerDay=2
  numberOfTICS=numberOfdays*timesPerDay
  time=1:numberOfTICS
  set.seed(randomSeed)
  numberOfLRUs=dim(inventory)[2]
  numberOfSRUs=dim(inventory)[3]
  inventoryHoldingCost=array(sample(10:30,2*numberOfLRUs*numberOfSRUs,TRUE),
  dim=c(2,numberOfLRUs,numberOfSRUs))
  orderCost=100
  replacementCost=c(5,10)
  if (is.null(ELOR)) {
    ELOR=array(sample(1:4,numberOfLRUs*numberOfSRUs,TRUE),dim=c(numberOfLRUs
    ,numberOfSRUs))
  }
  ELORCost=array(sample(5:20,
  numberOfLRUs*numberOfSRUs,TRUE),dim=c(4,numberOfLRUs,numberOfSRUs))
  reparationTime1=array(0,dim=c(numberOfSystems[1],numberOfLRUs,numberOfSRUs))
```

EK-1. (devam) Benzetim optimizasyonuna ait “R” kodu

```

reparationTime2=array(0,dim=c(numberOfSystems[2],numberOfLRUs,numberOfSRUs))
isWaitingForReparation1=array(0,dim=c(numberOfSystems[1],numberOfLRUs,numberOf
SRUs))
isWaitingForReparation2=array(0,dim=c(numberOfSystems[2],numberOfLRUs,numberOf
SRUs))
expDistSRUs=c(50,20,10) #LRU SRU1 SRU2
failureMatrix1=array(0,dim=c(numberOfSystems[1],numberOfLRUs,numberOfSRUs))
failureMatrix2=array(0,dim=c(numberOfSystems[2],numberOfLRUs,numberOfSRUs))
#for BASE 1
for (i in 1:numberOfLRUs) {
  for (j in 1:numberOfSRUs) {
    failureMatrix1[,i,j]=round(rexp(numberOfSystems[1], 1./expDistSRUs[j]) , digits = 0)
  }
}
#for BASE 2
for (i in 1:numberOfLRUs) {
  for (j in 1:numberOfSRUs) {
    failureMatrix2[,i,j]=round(rexp(numberOfSystems[2], 1./expDistSRUs[j]) , digits = 0)
  }
}
costOfReparation =array(0,dim=c(numberOfTICS))
costOfHolding =array(0,dim=c(numberOfTICS))
numberOfFixedParts=array(0,dim=c(numberOfTICS))
numberOfReplacedParts=array(0,dim=c(numberOfTICS))
numberOfSuccessfulMissions=array(0,dim=c(numberOfTICS))
numberOfCanceledMissions=array(0,dim=c(numberOfTICS))
flightHours=array(0,dim=c(numberOfTICS))
for (t in 1:numberOfTICS) {
  mission1=array(0,dim=c(2))
  mission2=array(0,dim=c(2))
  mission1[1]=sample(4:7,1)
  mission1[2]=sample(1:2,1)

```

EK-1. (devam) Benzetim optimizasyonuna ait “R” kodu

```

mission2[1]=sample(2:6,1)
mission2[2]=sample(0:2,1)
missionPlan1=array(0,dim=c(timesPerDay))
missionPlan2=array(0,dim=c(timesPerDay))
missionPlanTime1=array(0,dim=c(timesPerDay))
missionPlanTime2=array(0,dim=c(timesPerDay))
indexPlan1=1:timesPerDay
indexPlan2=1:timesPerDay
#for BASE 1
if (mission1[1]>0){
  for (i in 1:mission1[1]) {
    ind=sample(1:(timesPerDay-(i-1)),1)
    missionPlan1[indexPlan1[ind]]=2
    missionPlanTime1[indexPlan1[ind]]=rnorm(1,mean = 2, sd = 0.5)
    indexPlan1=indexPlan1[-ind]
  }
}
if (mission1[2]>0){
  for (j in 1:mission1[2]) {
    ind=sample(1:(timesPerDay-mission1[1]-(j-1)),1)
    missionPlan1[indexPlan1[ind]]=4
    missionPlanTime1[indexPlan1[ind]]=rnorm(1,mean = 2, sd = 0.5)
    indexPlan1=indexPlan1[-ind]
  }
}
#for BASE 2
if (mission2[1]>0){
  for (i in 1:mission2[1]) {
    ind=sample(1:(timesPerDay-(i-1)),1)
    missionPlan2[indexPlan2[ind]]=2
    missionPlanTime2[indexPlan1[ind]]=rnorm(1,mean = 2, sd = 0.5)
    indexPlan2=indexPlan2[-ind]
  }
}

```

EK-1. (devam) Benzetim optimizasyonuna ait “R” kodu

```

    }
  }
  if (mission2[2]>0){
    for (j in 1:mission2[2]) {
      ind=sample(1:(timesPerDay-mission2[1]-(j-1)),1)
      missionPlan2[indexPlan2[ind]]=4
      missionPlanTime2[indexPlan1[ind]]=rnorm(1,mean = 2, sd = 0.5 )
      indexPlan2=indexPlan2[-ind]
    }
  }
  costOfHolding[t]=sum(
  inventoryHoldingCost[1,,]*inventory[1,,]+
  inventoryHoldingCost[1,,]*inventory[2,,]+
  inventoryHoldingCost[2,,]*inventory[3,,])
  failures1=failureMatrix1[,,]< 1
  failures2=failureMatrix2[,,]< 1
  for (m in 1:dim(missionPlan1)) {
    reparationTime1[reparationTime1>0]=reparationTime1[reparationTime1>0]-1
    # BASE 1
    enlistedPlanes=c()
    if (missionPlan1[m]!=0){
      for (k in 1:numberOfSystems[1]) {
        numberOfFails=sum(failures1[k,,]==1)
        if((numberOfFails==0) &&
        (length(enlistedPlanes)<missionPlan1[m]) &&
        (sum(reparationTime1[k,,]==0) )){
          enlistedPlanes=c(enlistedPlanes,k)
        }
      }
      if((sum(failures1[k,,]==1)!=0) && (length(enlistedPlanes)<missionPlan1[m])) {
        fixedParts=0
        for (i in 1:numberOfLRUs) {
          for (j in 1:numberOfSRUs) {

```

EK-1. (devam) Benzetim optimizasyonuna ait “R” kodu

```

if(failures1[k,i,j]){
  if (isWaitingForReparation1[k,i,j]==0){
    isReadyToFix=1
  }else{
    isReadyToFix=0
  }
  personel=runif(1,min=0,max=1)
  if(personel<=0.2){
    isReadyToFix=1
  }
  if(personel>0.2 && isWaitingForReparation1[k,i,j]==0){
    isReadyToFix=0
    reparationTime1[k,i,j]=reparationTime1[k,i,j]+1
  }
  if (inventory[1,i,j]>0){
    if (isReadyToFix==1 && reparationTime1[k,i,j]==0){
      inventory[1,i,j]=inventory[1,i,j]-1
      failureMatrix1[k,i,j]=rexp(1, 1./expDistSRUs[j])
      costOfReparation[t]=costOfReparation[t]+replacementCost[1]
      isWaitingForReparation1[k,i,j]==0
    }
  }else{
    if (inventory[3,i,j]>0){
      if (reparationTime1[k,i,j]==0 && isWaitingForReparation1[k,i,j]==0){
        reparationTime1[k,i,j]=4
        isWaitingForReparation1[k,i,j]=1
      }
      if (reparationTime1[k,i,j]==0 && isReadyToFix==1 &&
isWaitingForReparation1[k,i,j]==1){
        inventory[3,i,j]=inventory[3,i,j]-1
        failureMatrix1[k,i,j]=rexp(1, 1./expDistSRUs[j])
        costOfReparation[t]=costOfReparation[t]+replacementCost[2]

```


EK-1. (devam) Benzetim optimizasyonuna ait “R” kodu

```

    }
  }
  if (length(enlistedPlanes)==missionPlan1[m]){
    failureMatrix1[enlistedPlanes,,]=failureMatrix1[enlistedPlanes,,]-
missionPlanTime1[m]
    numberOfSuccessfulMissions[t]=numberOfSuccessfulMissions[t]+1
    flightHours[t]=flightHours[t]+(missionPlanTime1[m]*missionPlan1[m])
  }else{
    numberOfCanceledMissions[t]=numberOfCanceledMissions[t]+1
  }
}#end of day
# BASE 2
enlistedPlanes=c()
if (missionPlan2[m]!=0){
  for (k in 1:numberOfSystems[2]) {
    numberOfFails=sum(failures2[k,,]==1)
    if((numberOfFails==0) && (length(enlistedPlanes)<missionPlan2[m]) &&
      (sum(reparationTime2[k,,]==0) )){
      enlistedPlanes=c(enlistedPlanes,k)
    }
  }
  if((sum(failures2[k,,]==1)!=0) && (length(enlistedPlanes)<missionPlan2[m])) {
    fixedParts=0
    for (i in 1:numberOfLRUs) {
      for (j in 1:numberOfSRUs) {
        if(failures2[k,i,j]){
          if (isWaitingForReparation2[k,i,j]==0){
            isReadyToFix=1
          }else{
            isReadyToFix=0
          }
        }
        personel=runif(1,min=0,max=1)
        if(personel<=0.2){

```

EK-1. (devam) Benzetim optimizasyonuna ait “R” kodu

```

    isReadyToFix=1
}
if(personel>0.2 && isWaitingForReparation2[k,i,j]==0){
    isReadyToFix=0
    reparationTime2[k,i,j]=reparationTime2[k,i,j]+1
}
if (inventory[2,i,j]>0 ){
    if (isReadyToFix==1 && reparationTime2[k,i,j]==0){
        inventory[2,i,j]=inventory[2,i,j]-1
        failureMatrix2[k,i,j]=rexp(1, 1./expDistSRUs[j])
        costOfReparation[t]=costOfReparation[t]+replacementCost[1]
        isWaitingForReparation2[k,i,j]==0
    }
} else {
    if (inventory[3,i,j]>0){
        if (reparationTime2[k,i,j]==0 && isWaitingForReparation2[k,i,j]==0){
            reparationTime1[k,i,j]=4
            isWaitingForReparation1[k,i,j]=1
        }
        if (reparationTime2[k,i,j]==0 && isReadyToFix==1 &&
isWaitingForReparation2[k,i,j]==1){
            inventory[3,i,j]=inventory[3,i,j]-1
            failureMatrix2[k,i,j]=rexp(1, 1./expDistSRUs[j])
            costOfReparation[t]=costOfReparation[t]+replacementCost[2]
            isWaitingForReparation2[k,i,j]==0
        }
    } else {
        if (reparationTime2[k,i,j]==0 && reparationTime2[k,i,j]==0 ){
            reparationTime2[k,i,j]=10
            isWaitingForReparation2[k,i,j]=1
        }
        if (inventory[1,i,j]==0 && isWaitingForReparation2[k,i,j]==1 ){

```

EK-1. (devam) Benzetim optimizasyonuna ait “R” kodu

```

        inventory[1,i,j]=inventory[1,i,j]+1
        costOfReparation[t]=costOfReparation[t]+orderCost
    }
}
}
if(reparationTime2[k,i,j]==0){
    if (ELOR[i,j]==1){
        inventory[2,i,j]=inventory[2,i,j]+1
        costOfReparation[t]=ELORCost[ELOR[i,j],i,j]
    }
    if (ELOR[i,j]==2){
        costOfReparation[t]=ELORCost[ELOR[i,j],i,j]
    }
    if (ELOR[i,j]==3){
        inventory[3,i,j]=inventory[3,i,j]+1
        costOfReparation[t]=ELORCost[ELOR[i,j],i,j]
    }
    if (ELOR[i,j]==4){
        costOfReparation[t]=ELORCost[ELOR[i,j],i,j]
    }
}
}
}
}
}
}
}
if (length(enlistedPlanes)==missionPlan2[m]){
    failureMatrix2[enlistedPlanes,,]=failureMatrix2[enlistedPlanes,,]-
missionPlanTime2[m]
    numberOfSuccessfulMissions[t]=numberOfSuccessfulMissions[t]+1
    flightHours[t]=flightHours[t]+(missionPlanTime2[m]*missionPlan2[m])
} else {

```

EK-1. (devam) Benzetim optimizasyonuna ait “R” kodu

```
        numberOfCanceledMissions[t]=numberOfCanceledMissions[t]+1
    }
}
}
}
totalCost=sum(costOfReparation)+sum(costOfHolding)
return(c(totalCost,sum(flightHours)))
}
```



EK-2. Deney tasarımı için kullanılan dizayn noktaları

Dizayn Noktası	Başlangıç Sıcaklığı	Soğutma Oranı	İterasyon Sayısı	Maksimum Stok Seviyesi	Benzetim Sayısı
1	50	0,6	200	10	10
2	50	0,8	100	50	30
3	50	0,8	50	50	10
4	100	0,95	50	10	30
5	200	0,95	200	10	10
6	200	0,6	50	10	30
7	200	0,8	100	50	20
8	50	0,6	200	30	20
9	100	0,8	100	10	10
10	50	0,6	100	30	30
11	50	0,95	100	10	10
12	200	0,8	100	30	10
13	100	0,6	50	50	10
14	50	0,95	100	30	20
15	50	0,95	200	50	10
16	200	0,95	100	50	30
17	50	0,8	200	30	10
18	50	0,95	50	30	30
19	100	0,8	50	30	10
20	100	0,8	100	30	20
21	50	0,95	50	10	20
22	100	0,6	200	50	20
23	100	0,6	50	10	20
24	100	0,8	200	10	30
25	200	0,8	200	30	30
26	200	0,8	100	10	30
27	200	0,6	100	50	10
28	100	0,95	200	50	30
29	200	0,95	100	10	20
30	100	0,6	100	30	10
31	200	0,6	200	30	10
32	50	0,8	200	50	20
33	200	0,6	50	50	20
34	100	0,8	50	50	20
35	100	0,95	100	30	30
36	200	0,8	200	10	20
37	100	0,95	100	50	10
38	100	0,6	50	30	30
39	100	0,95	200	10	20
40	200	0,8	200	50	10
41	200	0,8	50	50	30
42	200	0,6	100	30	20
43	200	0,95	50	30	10
44	200	0,8	50	30	20
45	50	0,6	50	50	30
46	200	0,95	200	30	20
47	50	0,6	100	50	20
48	50	0,95	200	10	30
49	50	0,8	100	10	20
50	50	0,6	50	30	10
51	100	0,95	50	50	20
52	200	0,6	200	50	30
53	100	0,95	200	30	10
54	200	0,8	50	10	10
55	50	0,8	50	10	30
56	100	0,6	100	10	30

EK-3. TOPSIS değerdendirmesi sonuqları

Dizayn Noktası	Toplam TOPSIS Sıralaması
9	17
1	22
54	22
11	30
39	32
55	32
48	35
26	36
56	40
6	41
29	44
36	44
24	46
23	53
5	54
21	61
49	61
4	79
50	87
31	92
35	93
19	100
43	100
53	101
10	105
46	107
30	110
14	113
17	113
20	113
12	115
25	117
38	117
42	117
18	124
8	128
44	138
40	158
15	167
32	171
22	172
16	176
27	176
28	176
51	183
3	185
13	186
33	187
45	187
37	193
7	197
2	200
52	201
41	203
34	211
47	216

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : MALYEMEZ, Cem
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 11.07.1981, Ardahan
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 440 39 70
 e-mail : cemmalyemez@yahoo.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi/Endüstri Mühendisliği	Devam ediyor
Yüksek lisans	AFIT–OH, ABD /Harekât Araştırması	2011
Lisans	Hava Harp Okulu/Endüstri Mühendisliği	2003

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2003-Halen	Hava Kuvvetleri Komutanlığı	Subay

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Malyemez, C., Baykoç, Ö.F. (2016, 13-15 Temmuz). *Performansa dayalı lojistik (PDL) sisteminde onarım seviyesi analizi*. Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği 36. Ulusal Kongresi (YA/EM 2016), İzmir.

Hobiler

Kitap okuma, spor, sinema, satranç.



GAZİ GELECEKTİR..