

HAVAYOLLARI TAMİR BAKIM SERVİS SAĞLAYICILARI İÇİN BİR ÜRETİM ÇİZELGELEME MODELİ VE ANALİZİ

Kadir ERTOGRAL¹, Murat ERKOC², Doğukan Hazar ÜLKER¹

¹TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara

²Miami Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Miami, ABD

kertogral@etu.edu.tr, merkoc@miami.edu, dogukanulker@gmail.com

(Geliş/Received: 26.11.2014; Kabul/Accepted: 13.08.2015)

ÖZET

Havacılık sektöründe bakım onarım (BO) uçakların güvenli ve devamlı uçuşlarının sağlanması için regülasyona tabi tutulan zorunlu bir faaliyettir. Gerek ticari gerekse askeri uçaklar için belirli aralıklarla bakıma girme zorunluluğu vardır. BO faaliyetleri uçuş firmaları için yakıttan sonra en çok maliyet yaratan alandır. BO sistemlerini klasik üretim sistemlerinden ayıran önemli bir faktör bazı parça ya da modüllerin devinimli (rotatable) envanter şeklinde kullanılmasıdır. Devinimli envanter durumunda, BO işletmesine servis için gelen uçağın ilgili modülü BO'nun takas envanterinde bulunan uçuşa hazır modülle değiştirilir. Bu durumda müşteri olan havacılık şirketi neredeyse anlık değişimle uçuşa ara vermeden faaliyetlerini sürdürür. BO şirketi takas yaptığı devinimli envanter türü modülü bakım onarım sürecinden geçirir ve sonra tekrar takasta kullanılmak üzere gelecek talepler için envanterinde saklar. BO şirketi uçakların devinimli modül takas zamanlarını ve bakım onarım çizelgesini yaparken, uçakların en son bakım geçirdikleri zaman dikkate alındığında regülasyonlara göre bir sonraki bakım için gelebilecekleri en son tarihe veya bu tarihten önce ancak yakın bir zamanda gelip servis almalarını sağlamaya çalışmalıdır. Çünkü vaktinden erken gelişleri havacılık şirketleri ekonomik açıdan tercih etmeyecektir. BO şirketi için sabit bir tamir bakım kapasitesi ve limitli envanter üretim çizelgeleme üzerindeki önemli kısıtlardır. Bu çalışmada yukarıda açıklanan problem toplam erken servis alışların en azlanması amacıyla, belirli bir başlangıç stoğu, kısıtlı üretim kapasitesi, çok tipli devinimli envanter, ve sonlu planlama ufku varsayımları altında modellenmiş, sayısal çözümler yardımıyla problemin analizi yapılmıştır. Devinimli envanter başlangıç seviyesini veya proses kapasitesini bir birim artırmanın azalan marjinal faydası ortaya konulmuş ve bu faydanın proses süresiyle ve proses kapasitesiyle ilişkisi gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Üretim çizelgeleme, tamir bakım, devinimli stok

A PRODUCTION SCHEDULING MODEL AND ANALYSIS FOR THE MAINTENANCE REPAIR AND OVERHAUL SERVICE PROVIDERS

ABSTRACT

Maintenance, repair and overhaul (MRO) are regulated and necessary activities for the airline sector to ensure the safety and continuity of flights. Both military and commercial aircrafts must go through MRO at regulated intervals. MRO activities constitute the second largest cost component for the airline companies after the fuel. One of the important differences between MRO systems and traditional production systems is the use of rotatable inventory for some expensive parts or modules. In the rotatable inventory case, the arriving part for service is directly exchanged with a ready inventory. Thus, the customer airliner continues its flights with almost no break time. The MRO company overhauls the exchanged equipment and places it as ready inventory to be used for future demands. As MRO companies schedule the exchanges of rotatable inventory and overhauls, considering the last date of service, they should try to bring in the aircrafts as close as possible to their regulated final dates for overhauls, since the earlier arrivals will not be preferred economically by the airline companies. The limited production capacity and inventory are the main constraints for scheduling the production. In this study, the problem is modeled with the assumptions of limited initial inventory and production capacity, multiple types rotatable inventory and finite planning horizon, with the objective of minimizing the total earliness. We tested the

problem thorough detailed numerical experiments. We have shown the decreasing marginal benefits for an additional unit of initial rotatable inventory or additional process line and the relationship between this benefit and process time and process capacity.

Keywords: Production scheduling, maintenance repair and overhaul, rotatable inventory.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Endüstriyel bakım herhangi bir ekipmanın sürdürülebilirliği amacıyla devam ettirilen tüm teknik ve buna bağlı yönetim faaliyetlerinin kombinasyonu olarak tanımlanabilir. Tamir bakım faaliyetlerinde amaç söz konusu sistemin fonksiyonel tutulması, ömrünün uzatılması, ve güvenli bir şekilde çalışmasının garantiye alınmasıdır. Her ne kadar BO değer ekleyen bir fonksiyon içermese de sistemlerin devamlılığı için kaçınılmaz bir faaliyettir. Özel olarak havacılık alanında bakım onarım uçakların güvenli ve devamlı uçuşlarının sağlanması için regülasyona tabi tutulan zorunlu bir faaliyettir. Gerek ticari gerekse askeri amaçlı uçaklar için belirli aralıklarla bakıma girme zorunluluğu vardır. Bu aralık hem zaman hem de uçuş sayısı olarak belirlenir. Örneğin; her 5 yılda bir veya her 5.000 uçuş sonrası olaylarından erken gerçekleşene göre servis zorunluluğu olması. Bakım sonrası süre ve uçuş sayısı bir sonraki bakım için sıfırlanır.

BO faaliyetleri uçuş firmaları için yakıttan sonra en çok maliyet yaratan alandır. Bu bakımdan artan rekabetin bir sonucu olarak bu firmalar BO faaliyetlerinde kaliteden ödün vermeden maliyetleri azaltma çabası içine girmiştir. Standard and Poors'un raporuna göre 2009 yılında sadece bakım ve onarım (BO) hizmetlerine dünya çapında harcanan meblağ 111 milyar dolara ulaşmıştır. Bu tutarın 62 milyarı askeri BO, 42.7 milyarı ticari hava ulaşımı ve 6.2 milyarı diğer işletme alanlarında gerçekleşmiştir [1]. Büyük ticari havayolu şirketleri önemli BO faaliyetlerini kendileri yaparken, bu alanda hizmete odaklanmış bağımsız şirketler de bu sektörde yaygındır. Kendi BO faaliyetlerini gerçekleştiren havayolu şirketleri zaman içinde masrafları azaltmak ve operasyonel etkinliklerini iyileştirmek açısından üçüncü partilere de hizmet verecek şekilde kendi BO şirketlerini kurmaya başlamışlardır. Bu BO servis firmaların önde gelenlerinden ikisini Lufthansa Technic ve Air France/KLM oluşturmaktadır. 2006 yılında Türk Hava Yolları da Turkish Technic'i kurarak bu alanda önemli atılıma imza atmıştır. 2014 yılında Turkish Technic firması 2766 bakım gerçekleştirmiş, bu bakımların 121'ini Türk Hava Yolları A.O. dışındaki yurt içi ve dışı havayolları şirketleri için yapmıştır [2][3].

BO servisinde havayolu şirketleri için en önemli üç kriter kalite, bakım süresi (BS) (turnaround time) ve bakım masrafı olarak adlandırılabilir. Bu konuda yakın zamanda yapılan araştırma ve anketler havayolu şirketleri BO servis sağlayıcılarından gün ve hafta bazında değil saat-dakika bazında servis

beklediklerini ortaya koymaktadır [4]. Uçuş firmaları için BO maliyetini artıran en önemli faktör bakım masrafının yanı sıra bakım süresince uçakların kullanılmamasından dolayı kaybedilen gelirdir. Bu açıdan BS çok önemli bir kriterdir. Ticari bir uçağın kullanılmadığı her gün işletici havayolu firması için duruma göre birkaç on bin dolardan birkaç yüz bin dolara kadar değişen bir yüksek gelir kaybına neden olabilmektedir. Dolayısıyla BO faaliyetlerinin etkin planlanması sadece kalite ve güvenlik açısından değil ekonomik süreklilik açısından da önemli bir yer tutmaktadır.

BO işletmelerinde BS performansının iyileştirilmesi kompleks ve özel optimizasyon teknikleri gerektiren bir problemdir. Bu problemin zorluk sebepleri olarak karmaşık ve büyük ölçekli söküm, onarım, ve montaj süreç planları, stokastik etkenler (örneğin; rassal talep gelişleri, beklenmedik yedek parça ihtiyacı, vb.), devinimli (rotatable) envanter yönetimi ve girift bileşen yapıları gösterilebilir. BO operasyonlarının yürütülmesinde envanter yönetimi büyük öneme sahiptir. 2009'daki bir araştırma BO tedarik zincirinde 47 milyar dolarlık envanter olduğu raporlamıştır [5]. BO sistemlerini klasik üretim sistemlerinden ayıran önemli bir faktör de bazı pahalı parça veya modüller için, örneğin iniş takımları, devinimli envanter kullanılmasıdır. BS performansının iyileştirilmesi amacıyla, BO şirketleri tamir bakıma gelen uçaklardaki onarım gerektiren parçayı veya modülü elde bulundurulmuş envanter ile değiştirmektedir ki buna takas politikası denir. Daha sonra çıkartılan parça bakım onarım sürecinden geçtikten sonra tekrar BO envanterine eklenir. Bu tür stoklara devinimli envanter denir. Sonuçta bu tür pahalı modüllerde envanter tedarik suretiyle değil, dönüşüme tabi tutularak yenilenmiş olmaktadır. Bu envanter kontrolü açısından önemli bir farklılıktır. Malzeme akışı üretim sistemlerinde çoğunlukla tek yönlü iken bu tür devinimli envanterler için BO işletmelerinde akış eşit miktarda stokta ve stoktan olmak üzere iki yönlüdür [6]. Dolayısıyla envanter yönetimi kapalı dönüşümlü tedarik zinciri yapısındadır [7]. Hizmet servis seviyesini iyileştirmek için alınabilecek yeni devinimli envanter, bu kapalı dönüşümlü tedarik zincirine eklenebilir ve böyle bir durumda sistemde bulunan dönüşümlü envanter sayısı artmış olacaktır. Aşağıda önerdiğimiz matematiksel model kayan planlama ufku şeklinde uygulanabilir ve herhangi bir zamanda eklenecek devinimli envanter başlangıç stoğuna eklenerek, model takip eden planlama ufku için yeniden çözülmesi gerekecektir.

Son yıllarda gittikçe artan bir uygulama olarak müşteri servisini hızlandırmak için özellikle havacılık

firmaları BO şirketlerinin ellerinde takas için devinimli envanter/modül bulundurmalarını şart koşmaya başlamışlardır [8]. Çoğu durumda BO ve müşterileri devinimli modül değişimine olanak sağlayan bir kontrat altında çalışırlar. Bu kontrat yapısı altında, BO işletmesine servis için gelen uçaklardaki modüller BO'nun takas envanterinde (exchange inventory) bulunan uçuşa hazır devinimli modülle değiştirilir ve müşteri olan havacılık şirketi nerdeyse anlık değişimle uçuşa ara vermeden faaliyetlerini sürdürür. Bu yaklaşım müşteri açısından BS'i neredeyse tamamen elimine ettiğinden müşteri firma tarafından tercih edilen ve son yıllarda oldukça yaygınlaşan bir stratejidir. Fakat böyle bir süreç BO şirketi için çok dikkatli ve zaman açısından baskı yaratan bir iş planlama ve envanter kontrol gerektirir.

Müşterinin BO talebi ve takas zamanlamasının müşteri ile koordine halinde yönetilmeli ve yönlendirilmelidir. BO servis şirketinin elinde her zaman kullanıma hazır devinimli modül bulunmayabilir. Örneğin, BO şirketinin tüm devinimli envanteri herhangi bir anda bakım onarım sürecinde olabilir. Diğer yandan bu tür kontratlarda müşterinin BO talebi geldiğinde BO şirketinin elinde takas yapabileceği kullanıma hazır devinimli modül bulundurması zorunludur. Bunu garanti etmek için BO şirketi her devinimli modül türü için müşterileri ile talep zamanlarını koordine eder ve taleplerin gelişini çizelgelemeye tabi tutar. Bir anlamda müşteri firmalara BO randevusu verir.

Bu proses önemli kısıtlar altında yönetilmek zorundadır. Öncelikle şirket çoğu zaman belirli bir tip devinimli modül için birden fazla müşteriye hizmet vermektedir. Bu durumda talep koordinasyonu her bir devinimli modül tipi için birden fazla müşteri ile yapılması gerekir. Ayrıca daha önce değinildiği gibi müşteri şirketler devinimli modüllerinin bakım onarım veya yenilenmesi için regülasyonlara tabidirler. Dolayısı ile uçakların bakımı konusunda ihlal edemeyecekleri ve gecikme yapma imkânlarının olmadığı son tarihler vardır. Diğer yandan bakım ve onarım, gelire direk değer katan bir işlem olmadığı için havayolu şirketleri masraf etkinliği açısından bu işlemleri mümkün olduğunca en son ana bırakmak isterler. Bunun temel nedeni her bakım onarım döngüsünde, devinimli modül kullanım oranını maksimize etmek istemeleridir. Böylece kullanım veya uçuş başına gider minimize edilmeye çalışılır. Bu BO şirketleri için iki taraflı bir baskıya yol açar. Bir yanda servis regülasyonlarından dolayı takas işlemi belirli bir tarihten sonraya atılmaz. Diğer yanda erken tarihe verilecek servis tarihleri müşterilerin efektif devinimli modül kullanım arzuları ile çelişir. Yani erken servis çizelgelemede bir ceza unsuru haline gelir. Erken servis BO şirketinin tuttuğu envanter seviyesini artırmak suretiyle azaltılabilir. Devinimli modüllerin yüksek fiyatları göz önüne alındığında BO şirketlerinin tutulacak envanter

seviyesini çok dikkatli belirlenmesi gerekmektedir. BO şirketinin üretim çizelgelemesi büyük ölçüde taşıdığı envantere bağlıdır. Bu da iş çizelgelemesi ve envanter optimizasyonunun eş zamanlı yapılması gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır.

Klasik üretim sistemleri için planlama, çizelgeleme ve envanter kontrolüne yönelik optimizasyon çalışmaları ve uygulamaları literatürde ve pratikte çokça çalışılmış olduğu halde BO alanı nispeten ihmal edilmiş bir alan olarak dikkat çekmektedir. Bu çalışmamızda önerilen üretim çizelgeleme modeli bu alandaki boşluğu doldurmaya yönelik, literatürdeki az sayıdaki ilgili modelden birisidir. Çalışmamızda BO şirketlerinde iş çizelgeleme ve envanter kontrol probleminin entegre şekilde ele alan literatür için yeni bir model geliştirilmiştir. Model verilen bir başlangıç envanter seviyesine göre, bakım onarım son tarihleri baz alınarak birden çok tipte devinimli envanter modülü ve müşterileri içeren talep varışlarının ve modül tamir ve bakım çizelgelemesinin optimizasyonu amaçlar. Optimizasyonun amacı envanter ve tamir bakım kapasite kısıtları altında toplam erken takasları minimize etmektir. Model farklı parametrelerle çalıştırılarak problem analiz edilmiştir. 2. bölümde konuyla ilgili literatür incelenmiştir. Problemin tanımı ve matematiksel modeli sırasıyla bölüm 3 ve 4'te verilmiştir. Bölüm 5'te problemin analizi bir seri sayısal çözüm üzerinden yapılmıştır. Takip eden sonuç bölümünde çalışma özetlenip gelecek olası çalışmalara ışık tutulmuştur.

2. LİTERATÜR (LITERATURE)

BO servis optimizasyonu literatürde son yıllarda özellikle ağır sanayideki sermaye ve varlık artırımı ile araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Önceki yıllarda dikkat daha çok klasik üretim sistemlerine verilmiştir. Bunun ana sebebi üretim sistemleri firmalara direk değer eklerken BO servisi üretim sistemlerinin devamlılığını sağlamak için yapılması gereken destek sınıfı kapsamında bir fonksiyon ve masrafa yol açtığı için kaçınılan bir işlem olagelmiştir. Rekabetin arttığı ve sürdürülebilirliğin önem kazandığı son yıllarda ise BO daha çok önemseneğe başlamıştır. Bu alanda literatürdeki ilk çalışmalar daha çok bir firmanın kendi bakım faaliyetlerinin planlanmasına yöneliktir. Bu konuda yapılan çalışmalarının oldukça bilgilendirici bir özeti Dekker [9] tarafından rapor edilmiştir. Dekker, BO sektöründe karar vermeyi destekleyecek araç ve optimizasyon metodlarının seksenli ve doksanlı yıllarda sınırlı olduğunu belirtirken, gelişen teknik sistemler ve rekabet dolayısıyla gelecek yıllarda BO servis optimizasyona daha fazla önem verileceğini tahmin etmiştir. Bunu takip eden bir çalışmada Dekker ve Scarf [10] söz konusu alanda araştırmacıları bekleyen problem alanlarını tartışmışlardır. Bu konuda en önemli problemi şirketlerin operasyonlarını en az şekilde

etkileyecek ve mevcut kapasiteyi en hesaplı şekilde kullandıracak bakım plan ve çizelgelemesi olarak tespit etmişlerdir ki bizim çalışmamızda önerilen model bu kapsamda düşünülebilir.

Son yıllarda BO sistemleri konusunda yapılan çalışmaların önemli bir kısmı ya yedek parça envanterine odaklanmakta ([11][12]) veya stratejik düzlemde havacılık şirketleriyle BO firmaları arasındaki kontrat modellerini ele almaktadır ([1], [13], [14]). Şu ana kadarki tespitimize göre devinimli envanter kontrolünü ele alan ve bu problemi BO firması açısından operasyonel seviyede ilk inceleyen Rupp [15] olmuştur. Bu çalışmada talep gelişleri Poisson proses olarak modellenmiş ve stokastik sistemin analizi benzetim metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Problem tamamen envanter odaklı olup talep yönetimi ve üretim çizelgeleme unsurları analize dahil edilmemiştir. Herhangi bir masraf analizi yapılmamış, servis seviyelerine odaklanılmıştır. Diğer bir çalışmada Romo ve Erkoc [16] rassal talep gelişleri altında devinimli envanter ve servis kapasite kararlarını gelir maksimizasyonunu amaçlayan bir modelle ele almış ve analitik çözümünü çalışmışlardır. Birçok küçük parça için BO şirketine talep gelişleri büyük ölçüde rassal olabilir. Fakat büyük devinimli modül bakım servislerinde talepler çoğunlukla randevu üzerinden olur ve genelde çok önceden bu devinimli modüllerin son BO servis tarihleri bilinir.

Bu makalede önerilen çalışmaya en yakın çalışmalar geçmişte Joo [17], Luh vd. [18] ve Arts vd. [19] tarafından yapılmıştır. Joo [17], problem ifadesi bölümünde bahsedilen tek tip devinimli modül türü problem için optimum talep çizelgelemesini çalışmıştır. Problemden amaç toplam erkenliliğin minimize edilmesidir. Envanter seviyesi veri olarak

(exogenous) alınmış ve karar sürecine dahil edilmemiştir. Ayrıca çok tipli devinimli modül ve bunların paralel bakımının yol açtığı kapasite kısıtları da çalışmaya dahil edilmemiştir. Luh vd. [18] matematiksel modelleme kullanarak eş zamanlı çizelgeleme ve devinimli envanter problemini çalışmışlardır. Ancak önerilen çalışmadan farklı olarak talep gelişlerini veri olarak almışlar ve müşterilere randevu verme kararı modele dahil edilmemiştir. BO servisini konvansiyonel şekliyle ele almışlardır. Yani çalışmaları takaslama sistemi temelinde yapılmamıştır. Çizelgeleme daha çok servis faaliyetlerinin planlanmasına yöneliktir. Ayrıca ele alınan modelde servisin son tarihi geçmesi cezaya tabi olarak olurlu görülmüştür. Araştırmacılar Lagrangean gevşetme tekniğine bağlı çözüm algoritmaları önermektedirler. Daha öncede açıklandığı gibi son yıllarda BO firmaları takas politikaları izlemektedirler ve bu yüzden müşterilere randevu vererek talep gelişlerini çizelgelemektedirler [6]. Takasın ana amacı BO son tarihlerini geçmemeyi garantiye almaktır. Bu açıdan bu sistem altında uygulamada gecikmelere izin verilmez.

Yakın bir zamanda yapılan diğer bir çalışmada Arts vd. [19] eş zamanlı kapasite ve devinimli envanter kontrolü problemi için bütünleşik planlama modeli geliştirmişlerdir. Modelde uygulamaya paralel olarak, gecikmeye izin verilmemektedir. Ancak erkenliklik direk olarak amaç fonksiyonuna dahil edilmemiştir. Kapasite iş gücü (adam-saat) bazında ele alınmıştır. Servis çizelgeleri bütünleşik planlama gereği ay bazında yuvarlanmıştır. Analiz daha çok üretim çizelgeleme için değil taktik seviyede kapasite planlamaya yöneliktir. Önerilen çalışmada ise taleplerin tam tarihleri temel gün bazında alınmış, operasyonel bir model geliştirilerek toplam erkenliklik

Tablo 1. Devinimli envanter çalışmalarının karşılaştırılması (Comparison of the literature on rotatable inventory)

| | Detaylı BO ve takas çizelgeleme | Birden çok tip envanter | Kapasite kısıtı | Erken gelişlerin en azlanması | Bütünleşik üretim ve kapasite planlama |
|--------------------------|--|--------------------------------|------------------------|--------------------------------------|---|
| Arts vd. [19] | | X | X | | X |
| Joo [17] | X | | X | X | |
| Luh vd. [18] | | | | | |
| Romo ve Erkoc [16] | X | | | X | |
| Rupp [15] | | X | X | | |
| MacDonnell ve Clegg [11] | | X | X | | |
| Bu çalışmamız | X | X | X | X | |

amaç fonksiyonu olarak kullanılarak üretim çizelgelenmesi hedeflenmiştir. Devinimli envanter içeren literatür aşağıdaki tabloda özetlenmiştir. Literatürde çalışmaların bir karşılaştırması tablo 1 de verilmiştir.

Özetlemek gerekirse bu çalışmada literatüre BO sektöründe birden fazla tipte devinimli stoğu içeren, üretim kapasite limitini göz önüne alan ve havayolları şirketlerinin uçaklardan en fazla yararlanmalarını amaçlayan yeni bir üretim çizelgeleme problemi sunulmuştur. Bu problem için bir karmaşık tamsayılı planlama modeli geliştirilerek problemin parametrelerinin etkileri analiz edilmiştir.

3. PROBLEM TANIMI VE MODELLEME YAKLAŞIMI (PROBLEM DEFINITION AND MODELING APPROACH)

Problemin temel girdisi çok tipli devinimli envantere sahip modüller için belirli bir planlama ufku boyunca olan talep serisi, daha doğrusu bu taleplerin karşılanabileceği son günlerle ilgili bilgidir. Probleme temel amaç devinimli envanter takaslarının mümkün olduğunca takas için son güne yakın yapılmasının sağlanması ve tamir bakımın çizelgelenmesidir. Bu yapılırken uyulacak ana kısıtlar tamir bakım kapasitesinin aşılması ve devinimli stok dengesinin korunmasıdır. Modellemede temel yaklaşım olarak sonlu periyotlu bir planlama ufku varsayılmıştır. Bu planlama ufku her bir periyot gün olarak düşünülmüştür. Ancak aynı modelle planlama periyodunun daha büyük bir zaman dilimi, örneğin hafta veya yarım gün, alınması da mümkündür. Hangi periyodun daha uygun olacağı kullanıcı tarafından belirlenebilir. Burada önemli olan talep tarihlerinin ve tamir bakım süresinin aynı birim periyot cinsinden temsil edilmesidir. Problemin amacını göz önüne alarak, temel kararlardan ilki için her bir takas talebinin hangi gün gerçekleştirildiğini takip edecek

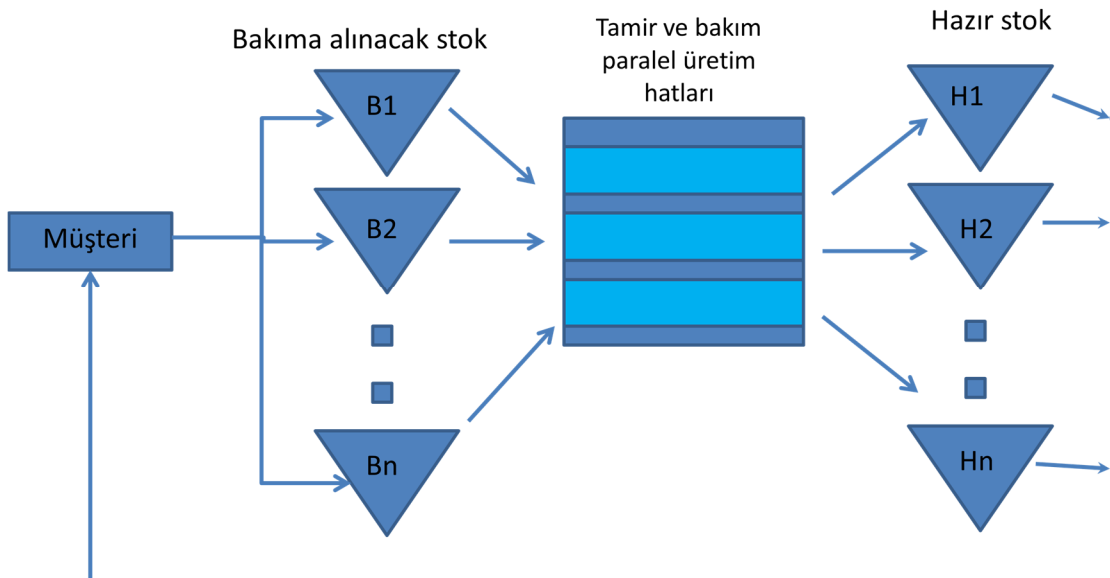
ikili değer alan bir değişken kullanılmıştır. Diğer temel karar ise her bir tip envanter için her bir tamir bakımın ne zaman başlayıp biteceğinin belirlenmesidir. Bu karar her periyotta her bir tip devinimli envanterden kaç tanesinin tamir bakımına başladığını takip eden bir değişken yardımıyla modellenmiştir. Tamir bakım kapasitesi, eşdeğer paralel kaynaklar olarak modellenmiştir. Bu kaynaklar tamir bakım sisteminde işçi takımlarını veya üretim hatlarını temsil eder. Her bir tamir bakımın süresi envanterin tipine bağlıdır ve sabittir, tamir bakımın hangi üretim hattı tarafından yapıldığına bağlı değildir. Bir üretim hattı bir tamir bakım aktivitesine başladığında bu işi bitirene kadar başka bir tamir bakıma başlayamayacağı varsayılmıştır. Problemi klasik üretim çizelgeleme problemlerinde ayıran en önemli özellik devinimli stokların stok denge kısıtıyla ilgilidir. Planlama ufku başında her bir envanter tipinden belirli sayıda başlangıç stoğu olduğu varsayılmaktadır. Devinimli stok envanteri sistemde üç durumda bulunabilir; takas edilmeye hazır, tamir bakım sürecinde veya tamir bakım bekler durumda. Her takasta, takasa hazır bekleyen envanter bir azalır ve tamir bakım bekleyen envanter uçaktan çıkartılan modül nedeniyle bir artar. Ayrıca takasa hazır envanter, her periyot tamir bakımı biten envanter kadar artacaktır. Devinimli stoğun hareketi ve sistem şekil 1’de gösterilmiştir. Burada B_i ve H_i sırasıyla bakım bekleyen ve takasa hazır, i . tip envanter seviyesini göstermektedir.

4. PROBLEMİN MATEMATİKSEL MODELİ (MATHEMATICAL MODEL FOR THE PROBLEM)

Önerilen matematiksel modelde, aşağıdaki gösterim kullanılmıştır;

Setler ve indisler;

T : Planlama ufkundaki periyot sayısı



Şekil 1. Devinimli stok akış sistemi (Flow system for the rotatable inventory)

J : Farklı tip devinimli envanter sayısı
 $N(j)$: j tipi envanter için takas talep edilen periyotlar kümesi
 i : Talep indisi $i, i \in N(j)$.
 j : Tip indisi, $j=1,2,\dots,J$.
 t : Periyot indisi, $t=1,2,\dots,T$.

Parametreler;

s_j : j tipi envanterden başlangıç stok miktarı
 k : Paralel eşdeğer üretim hattı/takımı sayısı
 p_j : j tipi envanter için periyot sayısı cinsinden tamir bakım süresi
 d_{ji} : j tip envanterin i . talebi için son değişim günü
 w_{ji} : j tip envanterin, i . talebine karşılık gelen müşteri için ağırlık değeri.

Karar değişkenleri;

X_{jit} :
 $\begin{cases} 1 & \text{Eğer } j \text{ tip envanterin } i. \text{ talebini } t \text{ anında takasla} \\ & \text{karşılanıyorsa} \\ 0 & \text{Aksi halde} \end{cases}$

Y_{jt} : j tip envanterden t periyodu başında bakıma başlayanlarının sayısı.

H_{jt} : j tip envanterden t periyodu sonunda değişime hazır stok miktarı.

B_{jt} : j tip envanterden t periyodu başı itibariyle bakım bekleyen stok miktarı.

Uçak tamir bakım servisleri için önerdiğimiz üretim çizelgeleme modeli aşağıda verilmiştir;

Modelin amaç fonksiyonu, müşterilerin hangi tarihlerde çağrılacağına karar vererek, tüm müşteriler üzerinden toplam ağırlıklandırılmış erken çağırmanın minimize edilmesidir. Kısıt (1) her tip envanterin, her talebinin, o talep için daha önceden belirlenmiş olan son değişim gününe kadar karşılanmasını ve değişimini sağlamaktadır. Kısıt (2), periyot t de bakım bekleyen j tipi envanter sayısını belirlemek için kullanılmaktadır. Burada bir önceki periyotta bakım bekleyen envanter sayısına, içinde bulunulan periyotta gelen talep eklenir ve bu miktardan bakıma başlayan envanter sayısı çıkartılır. Bu işlem her tip için her dönemde uygulanmaktadır. Kısıt (3) ve (4) hazır stok dengesi kısıtlarını temsil etmektedir. Kısıt (4) j tipinden t anındaki hazır stok miktarını belirlemek için kullanılmaktadır. Burada bir önceki periyotta j tipi için eldeki hazır stoktan, o periyotta j tipinden takas yapılması halinde envanterden düşülür. Bu kısıttaki önemli nokta j tipi envanter için bakım onarım süresinin, içinde bulunulan periyottan küçük olmasından dolayı bakım hattından bakımı bitip çıkan ve hazır hale gelen herhangi bir j tipi envanter olmamasıdır. Kısıt (3) ise (4) teki gibi kullanıma hazır envanter dengesini, bulunulan periyot t 'nin bakım süresinden fazla olması durumu için yansıtır. Kısıt (3)'te içinde bulunulan periyot düşünülduğünde, daha önceden bakıma giren j tipli bir ürünün bakım

$$\text{Amaç Fonksiyonu} \\ \text{Min} \sum_{j=1}^J \sum_{i \in N(j)} \sum_{t=1}^{d_{ji}} w_{ji} (d_{ji} - t) * X_{jit}$$

Kısıtlar

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

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

$$H_{jt} = H_{j,t-1} - \sum_{i \in N(j)} X_{ijt} + Y_{j,t-p_j} \quad \forall (j, t): t = p_j, \dots, T, j = 1, \dots, J \quad (3)$$

$$H_{jt} = H_{j,t-1} - \sum_{i \in N(j)} X_{ijt} \quad \forall (j, t): t = 1, \dots, (p_j - 1), j = 1, \dots, J \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{l=t}^{\min(t+p_j-1, T)} Y_{jl} \leq K \quad \forall t: t = 1, \dots, T \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N(j)} X_{jit} \leq H_{j,t-1} + Y_{j,t-p_j} \quad \forall (j, t): t = p_j, \dots, T, j = 1, \dots, J \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N(j)} X_{jit} \leq H_{j,t-1} \quad \forall (j, t): t = 1, \dots, (p_j - 1), j = 1, \dots, J \quad (7)$$

$$H_{j,0} = s_j \quad \forall j: j = 1, \dots, J \quad (8)$$

$$B_{j,0} = 0 \quad \forall j: j = 1, \dots, J \quad (9)$$

$$X_{jit} \in \{0,1\} \quad \forall (j, i, t): j = 1, \dots, J, i \in N(j), t = 1, \dots, T \quad (10)$$

$$Y_{j,t} \geq 0 \text{ ve tamsayı} \quad \forall (j, t): j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, T \quad (11)$$

hattından çıkabilecektir ve hazır stoğa bakımdan çıkmış j ürünün girmesi sağlanır.

Kısıt (5) bakıma giren ürünlerin toplamının paralel bakım hatlarının sayısından küçük olması gerektiği kısıtını yansıtır. Bir j tip envanterden t periyodunda Y_{jt} adet tamir bakımı başlamış ise, Y_{jt} adet üretim hattı, t periyodundan $t + p_j - 1$ periyoduna kadar bu envanterlerin tamir bakımıyla ilgili olarak meşgul olacaktır. Burada $\min(t + p_j - 1, T)$ kullanılarak bakım süresinin bitişinin planlanan periyotun dışına çıkması engellenmektedir. Herhangi bir t periyodunda meşgul hatların toplamını bulmak için, her bir tip için meşgul hatlar tüm tipler bazında toplanır.

Kısıt (6) j tipinden t periyodunda gelen taleplerin sayısının eldeki hazır envanterden fazla olmasını sağlamaktadır. Önemli nokta içinde bulunulan periyotun bakım süresinden büyük olmasından dolayı, bakımdan çıkan envanter olabileceğidir. Kısıt (7) bir önceki kısıtla aynı amacı taşımaktadır, tek fark içinde bulunulan periyot j tipi için bakım süresinden küçük olduğundan, bakımdan çıkacak envanter olmayacağından hazır stoğa eklenmeyecektir. Kısıt (8) ve (9) sırasıyla hazır envanter ve tamir bakıma girecek envanter için planlama dönemi başlangıç değerlerini belirlerler.

Bu model başlangıç devinimli stok miktarlarını bir parametre olarak kabul etmektedir. Klasik üretim planlama modellerinde kullanılan üretim ve stok maliyetleri en azlanmasından çok farklı olarak, modelde toplam ağırlıklandırılmış erken çağırma en azlanmaya çalışılmaktadır. Genel olarak tabidir ki yüksek başlangıç stoklarının veya paralel üretim hattı kapasitesinin artması, toplam erken çağırma azaltacaktır. Öte yandan tamir bakım sürelerinin azalması da toplam erken takasları azaltacaktır. Bir sonraki kısımda bu parametrelerin etkileri ve ilişkileri sayısal örnek çözümleri üzerinden irdelenmiştir.

5. SAYISAL SONUÇLAR VE ANALİZ (NUMERICAL RESULTS AND ANALYSIS)

Sayısal analiz çalışmasında üç tip devinimli envanter içeren problemler kullanılmıştır. Otuz adet rassal problem farklı parametre kümelerinde çözdürülmüştür. Planlama periyodu olarak gün alınmıştır ve her problem 1100 günlük (yaklaşık üç yıl) planlama ufku içermektedir. Her bir tip devinimli envanter takas talep sayısı 1100 gün boyunca yaklaşık 50 dir ve toplamda dolayısıyla yaklaşık 150 takas talebi söz konusudur. 30 problem sadece içerdikleri talep serisi açısından farklıdır ve bu problemler üç tip envanter için olan takas taleplerinin (son) tarihlerinin, 1100 günlük planlama ufkunda rassal olarak 1 ile 1100 arası tek düze dağılıma uygun olarak dağıtılmasıyla oluşturulmuştur. Talep ağırlık değerleri her talep için aynı alınmıştır.

Üretim hattı sayılarındaki değişimin etkisinin görülebilmesi amacı ile üretim hattı sayıları olarak 3,

4, ve 5 kullanılmıştır. Tamir bakım süresi olarak 3 tip envanter için, 3 farklı küme belirlenmiştir; (35,25,20), (30,20,15), (25,15,10). Parantez içindeki değerler sırasıyla tip 1, 2, ve 3 envanter için, gün cinsinden tamir bakım süreleridir. Başlangıç stok seviyelerindeki değişikliklerin problemi nasıl etkileyeceğini görme amacı ile de eldeki başlangıç hazır stok miktarları 3 tip envanter için, 3 farklı şekilde belirlenmiştir. Bu değerler tip 1, 2, ve 3 envanter için olmak üzere (3,3,3), (4,4,4), ve (5,5,5) olarak kullanılmıştır. Yukarıdaki 3 faktörün 3 seviyesi göz önüne alındığında oluşan yirmi yedi farklı parametre senaryosu modele uygulanmış ve her senaryoda aynı 30 rassal problem çözülmüştür. Aşağıda, tüm senaryolar ve elde edilen sonuçlar hem tablo 2 de verilmiş ve hem de karşılaştırma için şekil 2 de grafiksel olarak gösterilmiştir. Tabloda raporlanan iki sonuç her senaryoda 30 problem çözümünden elde edilen ortalama amaç değeri ve amaç değerlerinin standart sapmasının ortalamalarına oranından elde edilen belirlilik katsayılarıdır.

Yukarıdaki parametre aralığının dışındaki değerlerde problemlerin olursuz olma veya sıfır objektif değerine sahip olma durumlarıyla karşılaşılabilmektedir. Örneğin üretim hattı sayısını 2'ye indirdiğimizde birçok problem olursuz olurken hat sayısını 6'ya getirdiğimizde çoğu senaryo ve problemin çözümünde objektif değeri sıfır olmaktadır. Dolayısıyla parametrelerin etkilerinin analizi açısından yukarıdaki parametre aralıkları uygun bulunmuştur.

$P=35, 25, 20$ ve $K=3$ olarak belirlenen senaryo 1, 4 ve 7 deki problemlerde olurlu çözüm elde edilememiştir. Bunun nedeni düşük üretim hattı kapasitesi ve yüksek tamir bakım süresi içeren bu senaryolarda, belirlenen başlangıç stokları olurlu çözüm için yeterli gelmemiş olmasıdır. Bu tablosal değerler analiz için aşağıda grafikselleştirilmiştir.

Şekil 2 deki grafiklere göre aşağıdaki değerlendirmeleri yapabiliriz; bir ek envanterin getirisi üstsel olarak azalmaktadır. Bunu tüm grafiklerde gözlemek mümkündür. Örneğin, grafik b ve $K=3$ senaryosunu göz önüne alalım. Bu senaryoda başlangıç stoklarını $S=3$ ten $S=4$ çıkarmanın getirisinin, $S=4$ ten $S=5$ e çıkartmanın getirisinden çok daha fazla olduğu görülebilir. Yani bir ek envanterin marjinal getirisi azalmıştır. Envanterdeki bu artışın getirisi orantısal olarak düşünülürse, getirinin üstsel olarak azaldığını söyleyemeyiz. Örneğin yine grafik b ve $K=3$ senaryosunu göz önüne alalım. Bu senaryoda başlangıç stoklarını $S=3$ ten $S=4$ çıkarmanın amaç değeri açısından yüzdesel getirisi $(100 \times (350,8 - 85,2) / 350,8) \%75,7$ ve in $S=4$ ten $S=5$ e çıkartmanın getirisi $(100 \times (85,2 - 17,9) / 85,2) \%79,0$ olmaktadır.

Ek bir envanterin net getirisinin düşük üretim hattı kapasitesinde daha fazla olduğu da grafiklere göre

söylenbilir. Örneğin Şekil 2'deki grafik a'ya bakıldığında, K değerleri arttıkça bir ek envanterin getirisinin azaldığı görülebilir. Başka bir gözlem ise yine bir ek envanterin amaç değerindeki getirisinin, yüksek tamir bakım sürelerinde daha fazla olduğudur. Bu etkiyi örneğin K=4 için amaç değerlerinin envantere göre değişimine, grafik a, b, ve c de baktığımızda görebiliriz. Grafik c deki K=4 için ek bir envanterin net getirisi, grafik a'dakinden çok daha fazladır. Bu gözlemden çıkarılacak sonuç başlangıç stoklarının artırmadan önce yöneticilerin dikkatli düşünmeleri gerektiğidir. Eğer tamir bakım süreleri az ya da mevcut üretim hattı sayısı yeterince fazla ise, bu artışların toplam erken gelişleri azaltma anlamında hiçbir getirisi olmayabilir, ya da çok az getirisi olabilir.

Bu konuyla ilgili özel bir kısıt, üretim hattı sayısının toplam başlangıç stoğundan fazla olmasının hiçbir anlamı olmayacağıdır zira her üretim hattı aynı anda ancak bir envanterin tamir bakımıyla meşgul

olabileceğinden, envanter sayısından fazla olan üretim hatları hep atılacaktır.

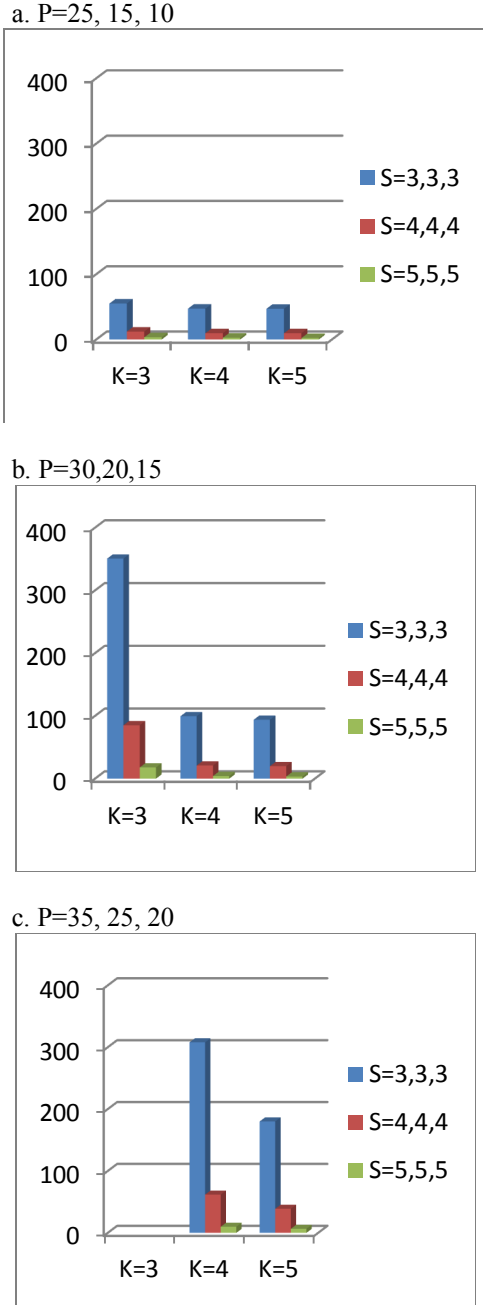
Yukarıda bir ek envanterin getirisiyle ilgili gözlemlerin benzerleri bir ek üretim hattının getirisi içinde söylenebilir. Özet olarak bir ek üretim hattının üstel olarak azalan bir getirisi vardır ve bu getiri yüksek başlangıç stoklarında ve düşük tamir bakım sürelerinde daha az olmaktadır.

Önemli bir konu herhangi bir problem için bir ek envanter mi yoksa bir ek üretim kapasitesinin mi amaç değerini daha iyileştireceği sorusudur. Sonuçların geneline bakıldığında ek envanterin getirisinin ek proses kapasitesi getirisinden daha fazla olduğu söyleyebiliriz. Örneğin senaryo 2 ile senaryo 3 (ek envanter) ve senaryo 2 ile senaryo 5 (ek proses kapasitesi) karşılaştırmalarına baktığımızda ek envanterin getirisinin, ek proses kapasitesi getirisinden çok daha fazla olduğu görülebilir. Ek envanterin getirisi tüm tamir bakım sürelerinde

Tablo 2. Koşutulan senaryolar ve sonuçlar (The solved scenarios and the results)

| Tamir bakım süresi (gün) | Başlangıç stoğu | Üretim hattı sayısı | Senaryo | Amaç değeri ortalaması (gün) | Amaç değeri belirlilik katsayısı |
|--------------------------|-----------------|---------------------|---------|------------------------------|----------------------------------|
| 35,25,20 | 3,3,3 | 3 | 1 | Olursuz | Olursuz |
| | | 4 | 2 | 307,9 | 0,759 |
| | | 5 | 3 | 180,1 | 0,496 |
| | 4,4,4 | 3 | 4 | Olursuz | Olursuz |
| | | 4 | 5 | 61,9 | 1,343 |
| | | 5 | 6 | 39,0 | 1,133 |
| | 5,5,5 | 3 | 7 | Olursuz | Olursuz |
| | | 4 | 8 | 9,9 | 2,997 |
| | | 5 | 9 | 6,7 | 3,539 |
| 30,20,15 | 3,3,3 | 3 | 10 | 350,8 | 0,847 |
| | | 4 | 11 | 99,5 | 0,640 |
| | | 5 | 12 | 93,9 | 0,661 |
| | 4,4,4 | 3 | 13 | 85,2 | 1,448 |
| | | 4 | 14 | 20,9 | 1,548 |
| | | 5 | 15 | 19,9 | 1,602 |
| | 5,5,5 | 3 | 16 | 17,9 | 2,778 |
| | | 4 | 17 | 4,2 | 4,991 |
| | | 5 | 18 | 3,5 | 4,885 |
| 25,15,10 | 3,3,3 | 3 | 19 | 55,0 | 0,878 |
| | | 4 | 20 | 47,2 | 0,936 |
| | | 5 | 21 | 47,0 | 0,940 |
| | 4,4,4 | 3 | 22 | 12,1 | 2,489 |
| | | 4 | 23 | 9,5 | 2,310 |
| | | 5 | 24 | 9,5 | 2,310 |
| | 5,5,5 | 3 | 25 | 3,3 | 5,477 |
| | | 4 | 26 | 2,5 | 5,472 |
| | | 5 | 27 | 2,1 | 5,385 |

görüldükçe, ek proses kapasitesinin getirisi tamir süresi yeterince düşüğe sıfırlanmaktadır. Örneğin senaryo 20 ve 21'i karşılaştırdığımızda veya senaryo 23 ve 24'ü karşılaştırdığımızda bunu görebilmekteyiz. Buradan çıkarttığımız genel sonuç, özellikle bir birim ek envantere yapılacak yatırım ek proses kapasitesi için gereken yatırımdan az ise, ek envanter kapasitesi oluşturmak, ek proses kapasitesi oluşturmaya nazaran daha mantıklı bir strateji olacaktır.



Şekil 2. Amaç değeri grafikleri (Plots of the objective values)

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

BO aktiviteleri hava yolları için en önemli maliyet kalemlerinden biridir. Bu maliyet kalemi içerisinde önemli bir kısım tamir bakım süresince atıl kalan

uçakların atıl kalma ya da fırsat maliyetidir. Dolayısıyla tamir bakım süresinin kısa tutulması ve periyodik tamir bakımların tam süresinde yapılıp erken yapılmaması uçak şirketleri tarafından tercih edilmektedir.

BO servisi sağlayan şirketler bir çok pahalı modül ve parça için devinimli envanter sistemiyle çalışmaktadır. Bu tür envanterler tamir bakım sürecinden sonra envantere tekrar giren, kapalı döngü tedarik sistemi şeklinde işleyen envanterlerdir. Bu çalışmada devinimli ve çok tipli envanter varsayımı altında BO şirketleri için toplam erken gelişleri en azlayacak, literatür için yeni bir üretim çizelgeleme modeli geliştirilmiştir. Bu model farklı parametre kombinasyonlarında bir grup rassal problem için çözümlenerek problem parametrelerinin etkisi analiz edilmiştir.

Modelin başlangıç envanterini de karar değişkeni olarak ele alan ve/veya envanter maliyetlerini ve üretim kapasite değişimlerini de göz önüne alan versiyonları gelecekte yapacağımız çalışmalar arasındadır. Bu modellerin etkin çözüm metodlarının geliştirilmesi de katkı sağlayacak bir araştırma olacaktır. Başka bir olası gelecek çalışma konusu ise bu çalışmada kabul edilen belirli talep gelişlerinin yerine rassal talep altında problemin ele alınmasıdır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Guajardo, J. A., Cohen, M., Kim, S. ve Netessine, S., "Impact of performance-based contracting on product reliability: an empirical analysis", *Management Science*, Cilt 58, No 2, 961-979, 2012.
2. THY. 2012. **Türk Hava Yolları Yıllık Faaliyet Raporu.**
3. THY Teknik 2014 Yıllık Rapor <http://www.thytek.com/faaliyet-raporlari.html>, erişim tarihi 20.09.2014
4. Spafford, C., Hoyland, T. ve Lehman, R. 2012. *BO Industry Landscape*, Marsh&McLennan Companies, www.oliverwyman.com, erişim tarihi 24.05.2015.
5. AeroStrategy/IATA 2009 Inventory & Logistics Survey- https://www.iata.org/whatwedo/workgroups/Documents/mro-logistics-survey-report-v3_2010.02.22.pdf, erişim tarihi 24.05.2015.
6. Kashyap, A., "Supply chain optimization within aviation MRO", *International Journal of Computer Applications in Engineering Sciences*, Cilt 2, 95-101 2012.
7. Hayek, M., "Optimizing life cycle cost of complex machinery with rotatable modules using simulation", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Cilt 11, No 4, 2005.
8. Ayeni, P., Lightfoot, T. H., ve Ball, P., "State-of-the-art of lean in the aviation maintenance, repair

- and overhaul industry”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2108-2123, 2011.
9. Dekker, R., “Applications of maintenance optimization models: a review and analysis”, *Reliability Engineering and System Safety*, Cilt 51, 229-240, 1996.
 10. Dekker, R. ve Scarf, P. A., “On the impact of optimization models in maintenance decision making: the state of the art”, *Reliability Engineering and System Safety*, Cilt 60, 111-119, 1998.
 11. MacDonnell, M. ve Clegg, B., “A new inventory model for aircraft spares”, *Service Parts management*, Editörler: N. Altay ve L. A. Litteral, Springer-Verlag, London, UK, 143-157, 2011.
 12. Van Jaarsveld, W., Dollevoet, T., ve Dekker, R., “Improving spare parts inventory control at a repair shop”, *OMEGA*, 2015. doi:10.1016/j.omega.2015.05.002.
 13. Kilpi, J., Töyli, J. ve Vepsäläinen, A., “Cooperative strategies for the availability services of repairable aircraft components”, *International Journal of Production Economics*, Cilt 117, 360-370, 2009.
 14. MacDonnell, M. ve Clegg, B., “Designing a support system for aerospace maintenance supply chains”, *Journal of Manufacturing Technology Management*, Cilt 18, 139-151, 2007.
 15. Rupp, B., Pauli, D., Feller, S. ve Skytta, M., “Workshop scheduling in the MRO context”, *International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics*, Eylül 19-25, 2010-2015, 2000.
 16. Romo, S. ve Erkoc, M., “Exchange inventory policies and capacity management for maintenance overhaul and repair”, *Teknik Rapor*, University of Miami, Coral Gables, FL., 2013.
 17. Joo, S. H., “Scheduling preventive maintenance for modular designed components: a dynamic approach”, *European Journal of Operational Research*, Cilt 192, 512-520, 2009.
 18. Luh, P. B., Yu, D., Soorapanth, S., Khibnik, A. I., ve Rajamani, R., “A lagrangian relaxation based approach to schedule asset overhaul and repair services”, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Cilt 2, No 2, 145-167, 2005.
 19. Arts, J. ve Flapper, S. D., “Aggregate overhaul and supply chain planning for rotables”, *Annals of Operations Research*, Cilt 224, No 1, 77-100, 2015.