

**HAVAYOLU FAZLADAN YAKIT TAŞIMA (TANKERING)
STRATEJİSİNİN DOĞRUSAL OLMAYAN PROGRAMLAMA
İLE MODELLENMESİ VE BİR UYGULAMA**

Niyazi Cem Gürsoy

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İşletme Anabilim Dalı Sayısal Yöntemler

Danışman: Prof. Dr. Nesrin Alptekin

Eskişehir

Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü

Haziran, 2020

ÖZET

Havayolu Fazladan Yakıt Taşıma (Tankering) Stratejisinin Doğrusal Olmayan Programlama ile Modellenmesi ve Bir Uygulama

Niyazi Cem Gürsoy

İşletme Ana Bilim Dalı

Sayısal Yöntemler Bilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Mayıs,2020

Danışman: Prof. Dr. Nesrin Alptekin

Havayolu firmalarının kârlılık seviyesi birçok işletmeye göre düşüktür. Kârlılık seviyesini artırmanın bir yolu da maliyetleri azaltmaktır. Bu tez havayolu firmalarının en büyük maliyetini oluşturan yakıt maliyetlerini fazladan yakıt taşıma ile azaltmayı amaçlamaktadır. Havalimanlarında yakıt fiyatlarının farklı olmasından faydalanan fazladan yakıt alma uygulaması için bir doğrusal olmayan programlama modeli geliştirilmiştir. Oluşturulan doğrusal olmayan programlama problemini çözmek için Genel İndirgenmiş Gradyan Metodundan yararlanılmıştır. Problemin çözümü için MS-EXCEL çözücü eklentisi kullanılmıştır. Tezin uygulama kısmında uçuş mesafesinin, doluluk oranının, uçulan merkezler arasındaki yakıt fiyat farkının ve düz uçuş yüksekliğinin fazladan yakıt taşıma ve maliyet üzerine etkisini analiz etmek amacıyla parametrik ve İstanbul'u merkez alan iki uygulama yapılmıştır. Fazladan yakıt taşımının 1300nm ve daha kısa olan uçuş mesafelerine uygulandığında yakıt maliyetinden tasarruf edilebileceği görülmüştür. Uçuş mesafesi kısa olan merkezler arasında gerçekleşen seferlerde doluluk oranı yüksek ve yakıt fiyat farkı az olsa da model fazladan yakıt taşımaya izin vermiştir. Tasarlanan senaryolar için problem sonucunun önerdiği miktarlarda yakıt alındığında, fazladan yakıt alınmadan gerçekleştirilen seferlere kıyasla uçağın yakıt sarfiyatının %2.5-3 artırdığı gözlemlenmiştir. Bu yakıt sarfiyatının artışına rağmen gidiş-dönüş seferleri için toplam yakıt maliyetinden %1-%47 arasında tasarruf sağlanabileceği tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Tankering, Havayolu yakıt yönetimi, Doğrusal olmayan programlama, Genel İndirgenmiş Gradyan Metodu, Eniyileme.

ABSTRACT

Modelling Strategy of Airline Tankering with Nonlinear Programming and An Application

Niyazi Cem Gürsoy

Department of Business Administration

Programme in Quantitative Methods

Anadolu University, Graduate School of Social Sciences, May,2020

Supervisor: Prof. Dr. Nesrin Alptekin

The level of profitability of airline companies is lower than that of many businesses. One the ways to increase the level of profitability is to reduce costs. This thesis aims to reduce the fuel costs, which constitute the largest share of total cost that airline companies have, with extra fuel transportation. A nonlinear programming model has been developed for tankering application that takes advantage of the different fuel prices at the airports. General Reduced Gradient Method (GRG) is used to solve the generated nonlinear programming problem. MS EXCEL solver add-in is used to solve the problem. In the application part of thesis, two application has been studied on and one of them is parametrical and other assumes İstanbul as an hub airport in order to analyze the effect of flight distance, load rate, fuel price difference between the airports and altitude of cruise flight on tankering and cost. It has been observed that the fuel cost can be saved when tankering is applied to flight distances of 1300nm and less. Although the load rate is high and the fuel price difference is low, flights have been conducted between the centers which have short flight distances, the model allowed to tanker. It was observed that when the amount of fuel recommended by the problem result was taken for the designed scenarios, the fuel consumption increased by 2.5-3% compared to the trips without tankering. Despite the increase in fuel consumption, it has been found that a total fuel cost can be saved of 1% to 47% for round trips.

Keywords: Tankering, Airline fuel management, Nonlinear programming, General Reduced Gradient Method, Optimization.

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Anadolu Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Niyazi Cem GÜR SOY

TEŞEKKÜR

Tez yazma sürecimde desteklerini, katkılarını hiç esirgemeyen ve bana rehberlik eden Sayın Prof. Dr. Nesrin Alptekin'e teŐekkürlerimi sunarım. Yüksek lisans sürecinde tecrübe ve bilgi birikimlerini paylaşan değerli tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Hayatta her ne olursa olsun arkamda olduklarını bildiğim, bana bu süreçte maddi ve manevi destek veren aileme; yolumu değerli görüşleri ile aydınlatan müstakbel eşime ve katkılarını esirgemeyen sadık arkadaşlarıma teŐekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	iv
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. HAVAYOLU FİRMALARINDA YAKIT YÖNETİMİ	4
2.1 Havayolu Maliyet Yapısı	4
2.1.1 Doğrudan Uçak İşletme Giderleri.....	7
2.1.2 Bakım Giderleri	9
2.1.3 Dolaylı Uçak İşletme Giderleri.....	9
2.2 Havayolu Yönetiminde Yakıt.....	10
2.2.1 Yakıt Maliyet Belirleyicileri	12
2.2.2 Jet Yakıtı	26
2.3 Yakıt Maliyet Yönetimi	28
2.3.1 Operasyonel Yakıt Tasarruf Prosedürleri	28
2.3.2 Yakıt fiyat riskinden korunma.....	37
2.3.3 Filo modernizasyonu	40
3. HAVAYOLU FAZLADAN YAKIT ALMA (TANKERING) STRATEJİSİNİN DOĞRUSAL OLMAYAN PROGRAMLAMA İLE MODELLENMESİ VE BİR UYGULAMA.....	42
3.1 Araştırma Problemi	45

3.2	Araştırmanın Amacı ve Önemi.....	45
3.3	Araştırmanın Varsayımları.....	48
3.4	Araştırmanın Sınırları.....	52
3.5	Araştırmanın Yöntemi.....	52
3.6	Uygulama	61
3.6.1	Araştırma Problem Modeli.....	62
3.6.2	Uçuş Yakıt Sarfiyat Tahmini.....	65
3.6.3	Problem Çözümü	69
3.6.4	Parametrik Çözüm Sonuçlarının Analizi.....	74
3.6.5	İstanbul'u Merkez Alan Senaryonun Problem Çözüm Sonuçlarının Analizi.....	80
4.	SONUÇ VE ÖNERİLER	83
	KAYNAKÇA	85
	EKLER	
	ÖZGEÇMİŞ	

TABLolar DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1 THY Faaliyet Giderleri Kırılımı	6
Tablo 2.2 Jet A1 ve Jet A Yakıt Özellikleri	27
Tablo 2.3 Airbus Uçak Tiplerine Göre Fazla Ağırlığın Yakıt Sarfiyatına Etkisi	29
Tablo 3.1 Airbus A319 Bazı Özellikleri	50
Tablo 3.2 Senaryoda Kullanılacak Olan Sefer Bilgileri.....	51
Tablo 3.3 Örnek Yakıt Tahmin Tablosu	66
Tablo 3.4 Mesafelere Göre Alınması Gereken Toplam Yakıt	68
Tablo 3.5 İstanbul Merkezli Çeşitli Uçuşlar İçin Alınması Gereken Yakıt Miktarı.....	69
Tablo 3.6 Fazladan Yakıt Taşımaya İzin Veren Problem Yanıt Raporu	70
Tablo 3.7 Fazladan Yakıt Taşımaya İzin Veren Problem Duyarlılık Raporu	71
Tablo 3.8 Fazladan Yakıt Taşımaya İzin Vermeyen Problem Yanıt Raporu	72
Tablo 3.9 Fazladan Yakıt Taşımaya İzin Vermeyen Problem Duyarlılık Raporu	73
Tablo 3.10 Parametrik Problem Çözümünün Önerdiği Fazladan Yakıt Taşıma Miktarı	74
Tablo 3.11 Parametrik Problem Çözümü Sonucu Fazladan Yakıt Alma ile Sağlanan Tasarruf Oranı.....	77
Tablo 3.12 İstanbul Merkezli Uçuş Ağı Problem Çözümünün Önerdiği Fazladan Yakıt Taşıma Miktarı.....	81
Tablo 3.13 İstanbul Merkezli Uçuş Ağı Problem Çözümü Sonucu Fazladan Yakıt Alma ile Sağlanan Tasarruf Oranı	82

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Havayolu Maliyet Sınıflandırması ve Bileşenleri	5
Şekil 2.2 Toplam Havayolu Maliyetleri Dağılımı	10
Şekil 2.3 Havacılık Endüstrisi Yakıt Maliyeti ve Net Kâr	11
Şekil 2.4 Nisan 1990 – Eylül 2019 Aylık Jet Yakıt ve Ham Petrol Galon Fiyat Karşılaştırması	12
Şekil 2.5 Nisan 1990 – Eylül 2019 Aylık Varil Jet Yakıt Fiyatı Crack Spread Eğrisi...	13
Şekil 2.6 Uçak Ağırlığı Bileşenleri.....	18
Şekil 2.7 Ücretli Yük & Mesafe Diyagramı	19
Şekil 2.8 Atmosfer katmanları ve parametrelerin değişimi	22
Şekil 2.9 A319 Uçağı Belirli Maliyet Katsayılarına Göre Yakıt Tüketimi ve Zaman ...	26
Şekil 2.10 Havayolu Yakıt Prosedürü	32
Şekil 2.11 A320 -214 Uçağı Beklenmedik Durum Yakıtı.....	33

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AFQRJOS:	Aviation Fuel Quality Requirements for Jointly Operated Systems (Müşterek İşletilen Sistemlerde Havacılık Yakıtı Kalite Gereklilikleri)
APU:	Auxiliary Power Unit (Yardımcı Güç Ünitesi)
ASU:	Air Start Unit (Hava Başlangıç Ünitesi)
ATSM:	American Society for Testing and Materials (Uluslararası Test Malzeme Mühendisliği)
AVTUR:	Aviation Turbine Fuel (Havacılık Türbin Yakıtı)
CE:	Conformité Européene (Avrupa'ya Uygunluk)
CG:	Center of Gravity (Ağırlık Merkezi)
CI:	Cost Index (Maliyet Katsayısı)
DOT:	U.S. Department of Transportation (Birleşik Devletler Ulaştırma Bakanlığı)
EASA:	European Aviation Safety Agency (Avrupa Sivil Havacılık Konferansı)
EUROCONTROL:	The European Organization for the Safety of Air Navigation (Avrupa Hava Seyrüsefer Emniyeti Teşkilatı)
FAA:	Federal Aviation Administration (Federal Havacılık İdaresi)
FCOM:	Flight Crew Operating Manual (Uçuş Mürettebat El Kitabı)
FMS:	Flight Management System (Uçuş Yönetim Sistemi)
GİG:	Genel İndirgenmiş Gradyan
GPU:	Ground Power Unit (Yer Güç Ünitesi)
GRG:	Generalized Reduced Gradient (Genel İndirgenmiş Gradyan)
GSHY:	Gayri Safi Yurtiçi Hasıla

IATA:	International Air Transport Association, (Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği)
ICAO:	International Civil Aviation Organization (Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatı)
ISA:	International Standard Atmosphere (Uluslararası Standart Atmosfer)
JAA:	Joint Aviation Authorities (Müşterek Havacılık Otoriteleri)
MLW:	Maximum Landing Weight (Maksimum İniş Ağırlığı)
MSP:	Maximum Structural Payload (Maksimum Yapısal Ücretli Yük)
MTOW:	Maximum Take-off Weight (Maksimum Kalkış Ağırlığı)
MTW:	Maximum Taxi Weight (Maksimum Taksi Ağırlığı)
MZFW:	Maximum Zero Fuel Weight (Maksimum Sıfır Yakıt Ağırlığı)
OEW:	Operational Empty Weight (Uçağın Boş Ağırlığı)
ÖTV:	Özel Tüketim Vergisi
THY:	Türk Hava Yolları
TSE:	Türk Standartları Enstitüsü
TÜPRAŞ:	Türkiye Petrol Rafinerileri A.Ş.

1. GİRİŞ

20. yüzyılın başlarında motorlu uçaklarla uçuşların başlamasından bu yana hava taşımacılığı sektörü çok hızlı gelişme göstermiş ve günümüzde insanların birbirine erişmesinde hızlı ve güvenilir bir ulaşım metodu olması nedeniyle hayatımızda önemli bir yer edinmiştir. Havacılık sektörünün bu derece kaçınılmaz olması paydaşlarının; havalimanlarının, havayolu şirketlerinin, hava trafik vd. hizmet sağlayıcılarının etkinliğini ve verimliliğini çok önemli kılmıştır. Çünkü hava taşımacılığının arzında tüm diğer ulaştırma modlarına kıyasla maliyetler daha fazladır ve yeterli kâr marjları elde edebilmek için etkin bir şekilde yönetimini zorunlu kılmıştır.

Hava taşımacılık sektörünün sürdürülebilirliği havayolu firmalarının başarısına bağlıdır. Yolcu taşıma işini gerçekleştiren ve insanlara ulaştırma hizmeti sağlayan yegâne organizasyon olan havayolu şirketlerinin başarılı olması ise kârlılığına, operasyonel performansına, kalitesine vb. birçok faktöre bağlıdır. Havayolu şirketinin kârlılığı doğrudan maliyetlerine ve bu maliyetlerini ne kadar etkin yönettiğine bağlıdır.

Havayolu işletmelerinin maliyet yapısına bakıldığında en belirleyici maliyetlerin yakıt maliyetleri olduğu ve yakıt maliyetlerinin geçmişten günümüze genel bir artış trendinde olduğu görülmektedir. İkinci bölümde havayolu işletmelerini yakıt maliyetlerini azaltmak ve yönetilebilirliğini artırmak amacıyla izledikleri uygulamalar ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. Uçağın yakıt sarfiyatını azaltacak operasyonel uygulamalar kapsamında en verimli uçuş yüksekliğinde uçmak, zaman maliyetini iyi düşünerek en uygun maliyet katsayısını belirlemek, uçağı gereksiz ağırlıklardan kurtarmak, ağırlık merkezinin yerine göre yükleme yapmak, taksi sırasında gerekli durumlarda tek motor kapatmak, APU'nun gereksiz çalışmasını engellemek ve verimli uçuş rotaları kullanarak uçuş planlaması yapmak olarak sayılabilir.

Havayolu şirketleri yakıt maliyetinin azaltılmasından çok yönetilebilmesi amacıyla yakıt fiyat riskinden korunma (hedging) anlaşmaları yapabilmektedirler. Bir petrol ürünü olan jet yakıtı ham petrol fiyatlarına bağlı olarak sürekli dalgalanmalar gösterebilmektedir. Yakıt tedarikçisi ve havayolu şirketi arasında dalgalanmalardan oluşan bu riski en aza indirmek için çeşitli hedging anlaşmaları yapılabilmektedir. Hedging anlaşmalarının önemli özelliklerinden birisi havayolu şirketlerinin maliyetini azaltabileceği gibi artırabilecek olmasıdır da. Havayolu şirketi, bu anlaşmalar ile giderleri konusunda rastsallığı ortadan kaldırmış olacaktır.

Havayolu işletmeleri havalimanlarındaki yakıt fiyat farklarından yararlanarak optimum miktarda fazladan yakıt taşıyarak toplam yakıt maliyetini azaltan operasyonel bir strateji uygulamaktadırlar. Fazladan yakıt taşıma (tankering) uygulanmasında uçağın yapısal özellikleri başta olmak üzere, günlük yakıt fiyatları, doluluk oranı, hava sıcaklığı, uçuş irtifası, rüzgâr vb. birçok unsur hesaba katılarak belirlenmektedir. Havayolu şirketlerinde uçuş planlama yazılımları tarafından ne kadar fazladan yakıt taşınacağı belirlenmektedir. Bu çalışmada, N adet farklı destinasyona sahip bir havayolu ağına uygulanabilecek doğrusal olmayan programlama modeli yazılmıştır. Uçağın yakıt alması gereken noktalarda yasal gereklilikleri karşılayarak ne kadar yakıt alacağını öneren model toplam yakıt maliyetini optimize etmeyi amaçlar.

Fazladan yakıt taşıma miktarını veren araştırma modelinin çözümü için, kısıtlı doğrusal olmayan programlama modellerinin çözümü için kullanılan Genel İndirgenmiş Gradyan (GİG) metodu kullanılmıştır. 20 yıldan fazla birçok problemin çözümü için kullanılmış GİG metodu birçok kez test edilmesi ve dayanıklı bir algoritmaya sahip olması nedeniyle tercih edilmiştir. Gradyan temelli bir çözüm yöntemi olan GİG'nin dezavantajı ise her iterasyonda kısıtların olurlu bölgede olduğunu test etmesi nedeniyle işlem yükünü artırabilmesidir. Modelin uygun yazılan problemlere uygulandığında global optimuma ulaşması çok rahat olmaktadır. Araştırma probleminin çözümü için, GRG2 algoritmasını kullanan MS Excel çözücüsünden yararlanılmıştır.

Araştırma probleminin uygulanmasında A319 uçağı temel alınmış ve yakıt yakma tahminleri için bu uçağın Uçuş Mürettebat El Kitabından (FCOM) faydalanılmıştır. Modelde havayolu uçuş ağ yapısı topla-dağıt olarak kabul edilerek orijin havalimanından destinasyona gittiği ve tekrar orijin havalimanına döndüğü varsayılmıştır. İlk uygulama parametrik olarak yapılmış ve oluşturulan senaryoda uçağın doluluk oranları %70, %80, %90 ve %100 olarak kabul edilmiştir. Uçulan merkezler arasındaki mesafeler 300nm, 500nm, 700nm, 900nm, 1100nm, 1300nm ve 1500nm olarak test edilmiştir. Uçağın düz uçuşu sırasında seçtiği irtifalar ise 29.000ft, 31.000ft, 33.000ft, 35.000ft, 37.000ft ve 39.000ft olarak değerlendirilmiştir. Uçulan merkezler arasındaki yakıt fiyat oranı ise %50, %60, %70, %80 ve %90 olacak şekilde belirlenmiştir. Oluşturulan bütün senaryolarda problemler başarıyla çözülmüş ve sonuçlara ulaşılmıştır. Diğer uygulamada ise İstanbul'un ucuz yakıt fiyat avantajlarını göstermek adına İstanbul merkezli bir havayolunun uçuş mesafesi fazla olmayan yedi farklı merkeze sefer yapacağı

düşünülmüştür. Sofya, Atina, Floransa, Bratislava, Bağdat, Tahran ve Trablus'a gerçekleşecek olan seferlerde doluluk oranları vaka çalışmasındaki gibi %70, %80, %90 ve %100 olarak alınmış ve düz uçuş irtifa seviyeleri 29.000ft, 31.000ft, 33.000ft, 35.000ft, 37.000ft ve 39.000ft olarak test edilmiştir. Oluşturulan problemler Excel üzerinde başarıyla çözümlenmiş ve sonuçları yorumlanmıştır.

Yapılan bu araştırma ile havalimanlarından en iyilenmiş miktarlarda yakıt alımına destek sağlayacak doğrusal olmayan programlama modeli önerilmiştir. Uygulama kısmında parametrik çalışma ile fazladan yakıt alınabilecek en uygun koşullar araştırılmıştır. Modele uygulanan diğer uygulamada İstanbul'un yakıt maliyetleri açısından cazip bir merkez olduğu, İstanbul merkezli uçan veya İstanbul'a uçan havayolu işletmelerinin; yakıt fiyat farkı elverdiği ölçüde orta mesafe uçuşlarda fazladan yakıt taşıma strateji ile tasarruf yapabileceği gösterilmeye çalışılmıştır.

2. HAVAYOLU FİRMALARINDA YAKIT YÖNETİMİ

2.1 Havayolu Maliyet Yapısı

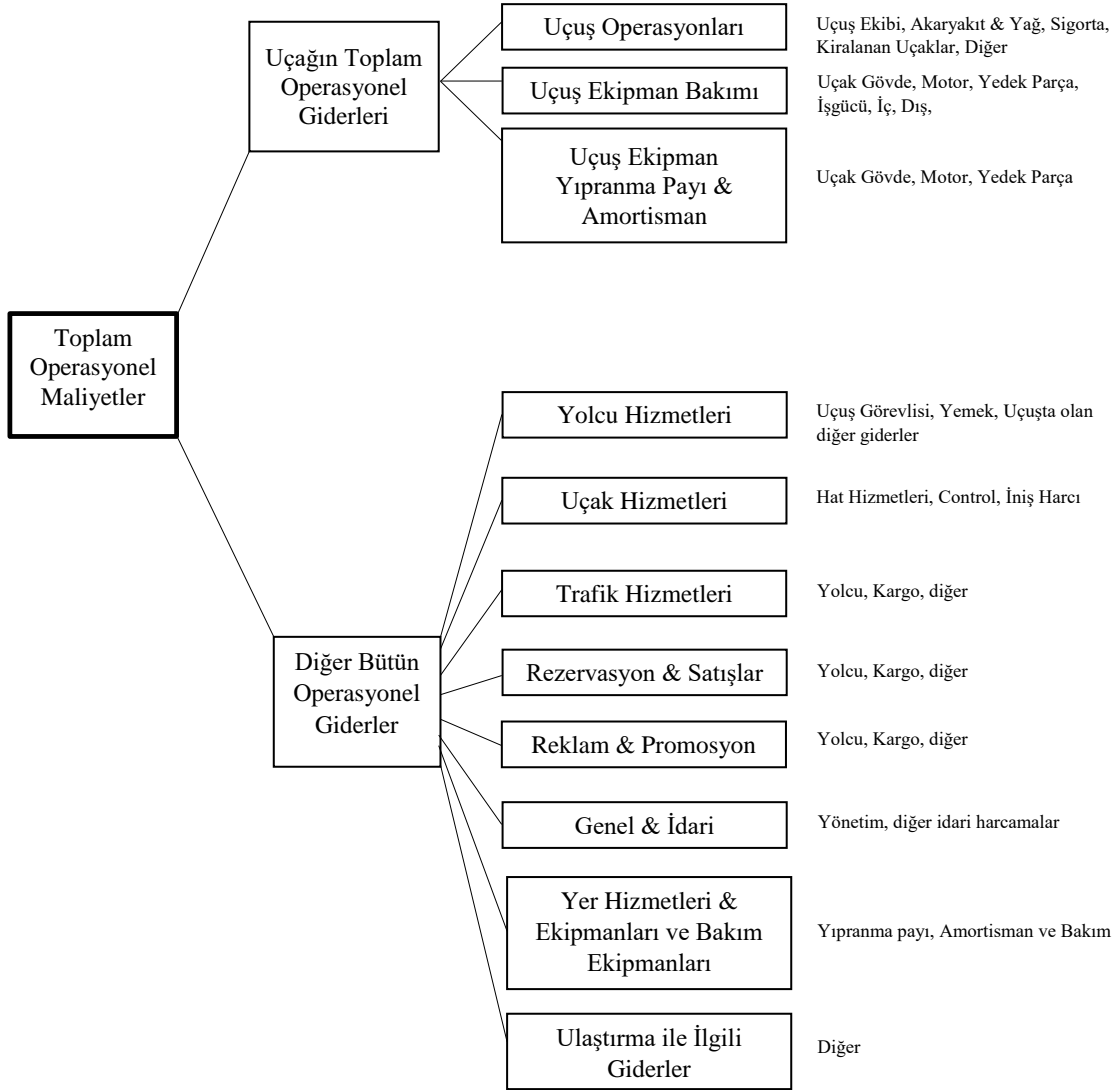
Havayolu işletmelerinde birçok işletmede olduğu gibi hava ulaştırma hizmet arzının maliyeti, uzun ve kısa vadeli kararların alınmasında en önemli faktörlerden birini oluşturmaktadır. Havayolu pazarında rekabetin artması, operasyonel maliyetin üzerinde kontrolün ve verimliliğin artırılması havayolu şirketlerinin genel başarısı ve kârlılık için çok önemli bir hale gelmiştir.

Hava ulaştırma sektöründe planlama yaparken maliyet verisi, dört anahtar gereklilik için kullanılmaktadır. İlk olarak maliyetin kategorize edilerek toplam giderlerin gösterilmesi, bu giderlerin genel yönetim ve muhasebenin bir aracı olarak kullanılabilmesine imkân verir. Çünkü maliyetin incelenmesi; işletmenin yıl sonunda oluşan kâr-zarar durumunu görebilmesi, finansal pozisyonun ne olduğunu bilmesi, maliyet verimliliğini ölçebilmesi gibi konularda önemli destek sağlar. İkinci olarak havayolu işletmelerinin uçuşların maliyetlerini ve bu maliyetlerin rotaya hangi özellikler taşıdığını bilmesi sefer sıklıklarının belirlemede, hâlihazırda olan seferlerin korunmasında veya sayılarının azaltılmasında önemli girdi sağlar. Üçüncü olarak maliyetlerin belirlenmesi, yolcu veya kargo taşınmasında ücretlendirme politikası oluştururken ve ücretlendirme kararları alırken etkili olmaktadır. Son olarak; yeni bir uçağa, servise veya rotaya yapılacak olan yatırımlar için maliyetlerin bilinmesi havayolu yöneticileri için son derece aydınlatıcı olacaktır¹.

Havayolu şirketlerinin maliyetlerinin sınıflandırılması ve bileşenleri; maliyet verilerini kullanacak olan birime, işletmenin hangi fonksiyonu için kullanacağına bağlı olarak değişebilmektedir. Uluslararası Sivil Havacılık Organizasyonu (ICAO) bütün hava yollarından maliyetlerini belli bir sınıflandırma ve bileşenlerden oluşan, dünya genelinde standartlaşmış denilebilecek bir maliyet yapısı belirlemiştir. ICAO'nun maliyet yapısına benzer şekilde Amerika Birleşik Devletleri Ulaştırma Bakanlığı'nın (DOT) ülkesindeki havayollarının maliyet ve diğer bilgilerini doldurmasını istediği form olan DOT Form 41'de de maliyet sınıflandırması mevcuttur.

¹ R. Doganis. (2002). *Flying Off Course: The Economics of International Airlines*. Psychology Press.

Şekil 2.1 Havayolu Maliyet Sınıflandırması ve Bileşenleri²



Şekil 2.1’de DOT Form 41’de yer alan maliyet yapısı görülmektedir. Bu form ICAO’nun maliyet yapısıyla küçük farklılıklar göstermektedir. Örneğin; ICAO’nun maliyet yapısında bakım ve idari harcamalar aynı kategoride gösterilirken, Form 41’de ise uçuş ekipman kategorisi altında uçak gövde, motor, yedek parça ve bakım için ayrılan işgücü maliyeti ayrı olarak daha ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir.

² F. D. Harris, (2005). *An economic model of US airline operating expenses*, National Aeronautics and Space Administration (NASA).

Tablo 2.1 THY Faaliyet Giderleri Kırılımı³

(mn USD)	2017	% Pay	2018	% Pay	Değişim 18/17
Akaryakıt	2.866	28,20%	3.768	32,20%	31,50%
Personel	1.761	17,30%	1.772	15,20%	0,60%
Konma, konaklama ve Üstgeçiş	978	9,60%	1.056	9,00%	8,00%
Konma ve Konaklama	469	4,60%	514	4,40%	9,60%
Üstgeçiş	509	5,00%	542	4,60%	6,50%
Satış ve Pazarlama	841	8,30%	986	8,40%	17,20%
Komisyon ve Teşvik	318	3,10%	401	3,40%	26,10%
Rezervasyon Sistem	232	2,30%	255	2,20%	9,90%
Reklam	165	1,60%	189	1,60%	14,50%
Diğer	126	1,20%	141	1,20%	11,90%
Amortisman	1.066	10,50%	1.087	9,30%	2,00%
Yer Hizmetleri	656	6,50%	733	6,30%	11,70%
Uçak Kirası	527	5,20%	595	5,10%	12,90%
Operasyonel Kira	324	3,20%	336	2,90%	3,70%
Wet Lease	203	2,00%	259	2,20%	27,60%
Yolcu hizmet & İkram	510	5,00%	560	4,80%	9,80%
Bakım	645	6,30%	804	6,90%	24,70%
Genel Yönetim	112	1,10%	122	1,00%	8,90%
Diğer	202	2,00%	203	1,70%	0,50%
TOPLAM	10.164	100%	11.686	100%	15,00%
AKK başına birim gider (USc)	5,87	-	6,42	-	9,30%
AKK başına birim gider_ Akaryakıt hariç (USc)	4,22	-	4,35	-	3,20%
Sabit Giderler	2.963	29,20%	3.163	27,10%	6,80%

Tablo 2.1’de Türk Hava Yolları’nın 2017 ve 2018 yıllarındaki gider dağılımı görülmektedir. Tablo 2.1’e Türk Hava Yolları’nın yatırımcılarına kazandırmak için kullandıkları internet sayfasından ulaşılmıştır. Tablodan görüldüğü üzere havayolu işletmesinin faaliyet giderleri doğrudan uçuş operasyonlarıyla ilgili olan ve olmayan şeklinde ayrılmamış ama her ikisinin bileşenleri de tabloda yer almıştır. Tablo 2.3’e göre en çok giderler sırasıyla; akaryakıt, personel, konma-konaklama olarak devam etmektedir.

³https://investor.turkishairlines.com/documents/ThyInvestorRelations/IR_PRESENTATION_1Q2019TR_vF2.pdf (Erişim Tarihi 03.07.2019)

Uçağın operasyonel maliyetleri doğrudan ve doğrudan olmayan maliyetler olarak ele alınabilir. Maliyetlerin bu şekilde sınıflandırılmasının amacı; doğrudan ilgisi olmayan maliyeti ve geliri, havayolu şirketinin yaptığı öz hizmetlerden ayırmaktır.

2.1.1 Doğrudan Uçak İşletme Giderleri

Havayolu şirketlerinin en büyük maliyeti uçağın uçurulmasından kaynaklanan doğrudan maliyetlerdir. İlk olarak uçağın uçurulmasını sağlayacak işgücü maliyeti; uçağın kokpit ve kabininde görev yapan pilot, host veya hosteslerin maaşlarını, seyahat ve konaklama giderlerini oluşturur. Bu giderlere çalışanların sigorta primleri, emeklilik primleri, ikramiye ve sosyal yardım ödemeleri de dâhil edilebilir. Pilotların lisansları tek tip bir uçağı uçurmaya yetkindir ve bu nedenle pilotların iş planlamaları uçağın tipine göre belirlenir. Uçak büyüdükçe pilotlara verilen ücretler de artar. Buna istisna olarak A318, A319, A320, A321 uçak tipleri için tek “tip lisansı” yeterli olmaktadır. Pilotların ücretleri kullandığı uçağın tipine göre değişirken, pilotlar aynı mesafe ve sürede uçuş yapmamaktadırlar. Bu nedenle pilotların ücretleri hesaplanırken her uçak tipinin saatlik ücreti ile toplam uçuş müddeti (block time⁴) çarpılarak belirlenir.

Uçuş operasyonlarının bir diğer büyük maliyeti ise yakıttır. Yakıtın havayolu ekonomisinde yeri bu çalışmanın 2.2 sıralı bölümünde detaylı bir biçimde ele alınacaktır.

Diğer doğrudan maliyetlere oranla daha küçük kalan maliyet ise uçuş ekipmanlarının sigortalarıdır. Her bir uçağın sigorta primleri tam satın alma fiyatının üzerinden belirli yüzde ile belirlenmektedir. Havayolunun her bir uçak için ödediği sigorta primi %1.5 ve %3 arasında değişebilir çünkü havayolunun sahip olduğu uçak miktarı, faaliyetlerini sürdürdüğü bölge gibi unsurlar ödenen primin miktarını etkilemektedir. Havayolu şirketi savaş riskine veya terör saldırısına karşı tam sigorta yaptırmak isteyebilir ve bu durumda ödenen sigorta primini ek olarak %2 artırabilmektedir. Amerika’da Eylül 2001’de gerçekleşen terör saldırısından sonra Amerika hükümeti artan üçüncü parti primlerinden doğan ek maliyeti karşılamak için havayolu işletmelerine destek vermiştir. Her yıl bir sonraki yılın sigorta primleri belirlendiğinden yıllık sabit bir maliyet olarak sigorta maliyeti hesaplamalarına dâhil

⁴ Uçuş müddeti (Block Time): Bir uçağın park pozisyonundan ayrılıp takozdan kurtulduğu andan başlayıp varış havalimanı park pozisyonunda tekrar takozla bağlandığı ana kadar olan süredir. Uçağın kendi motor gücünü kullanarak hareket etmeye başladığı zamandan uçağın tekerleğinin dönmediği ana kadar olan süre olarak da tanımlanabilmektedir.

edilir. Bu yıllık maliyet ile, her bir uçağın yıl boyunca sahip olacağı uçuş müddetinden uçuş saati başına düşen maliyeti hesaplanabilecektir⁵.

Havayolu şirketleri uçuş düzenlediği ülkelerin yönetmelikleri gereği kullandıkları havalimanlarına pist ve tesisleri için ödemeler yaparlar. Havalimanı için yapılan ödemeler havayolu şirketinin havalimanı işletmesinden aldığı hizmetlere göre değişiklik gösterebilmektedir. Pist için alınan ücretlerde genelde uçağın kalkış ağırlığı baz alınarak hesaplama yapılır. Yolcuların havalimanı kullanımından alınan ücretler ise yolcu sayısı hesaba katılarak hesaplanabilmektedir. Üçüncü dünya ülkelerinde yolcu masrafları doğrudan yolcudan elde edilebilir fakat bu da operasyonun hızını yavaşlatabilmektedir. ICAO'nun tavsiyelerinde havalimanının yolcudan aldığı ücretlerin bilete yansıtılması gerektiği belirtilir ve pek çok havayolu şirketi bu uygulamayı yapmaktadır.

Birçok havayolu şirketi filosundaki uçak eksikliğini diğer havayolu şirketlerinden veya kiralama şirketlerinden tamamlamaktadır. Doğan bu kiralama maliyeti uçakların işletilmesinden doğan direkt maliyet olarak yansımaktadır. Uçak kira giderleri genelde operasyon maliyetine bağlı olarak düşünülür. Birçok küçük bayrak taşıyıcı⁶ havayolu şirketlerinin filosu, kiralanmış uçaklardan kurulmuştur. Günümüzde bile bazı büyük havayolu şirketleri birbirleri arasında kiralama yoluyla filolarını şekillendirmektedir.

Havayolu sektöründe uçak kiralamaları zamanlama faktörüne bağlı olarak genelde üç farklı kategoride incelenmektedir⁷;

- 1) Mal sahibinin hafta, gün ve hatta saat gibi kısa vadeli süreler için uçak kiraladığı münhasır olmayan kiralamalar,
- 2) Uçak kiralaayan tarafın uçağın tüm kullanım haklarını vererek belirli ve uzun bir süre özel kiralamaları,
- 3) Uçuş eğitimi veya charter uçuş seyahat acentesinin uçağı kiralayarak sefer yapan işletmelerin kullanımı amacıyla uçağın sahibinin uçuş okulları veya ticari bir havacılık kuruluşu olan kiralayıcıların uçağı bu tür kuruluşlara kiralamasıdır.

⁵ Doganis, 2002, **a.g.k.**, 81.

⁶ Devlet eliyle yönetilen veya yönetim kurulu devlet tarafından atanan havayolu şirketleri bayrak taşıyıcı olarak isimlendirilir.

⁷ R. C. Speciale, (2006). *Fundamentals of Aviation Law*. McGraw-Hill.

Yukarıda ifade edilenlere ek olarak uçağın kiralanmasının iki yolu, “wet lease” veya “dry lease” olarak kiralanmasıdır. “Wet Lease” uçağın kiralayıcı tarafından uçuş ekibi, bakım hizmetleri ve sigortasıyla beraber kiralanmasıdır. “Dry Lease” ise uçağın uçuş ekibi, bakım ve sigorta hizmetleri olmadan kiralanmasıdır.

2.1.2 Bakım Giderleri

Bakım giderleri havayolu işletmesinin maliyetleri sınıflandırılırken doğrudan ve dolaylı maliyetlerden farklı olarak sınıflandırılabilir. ICAO bakım maliyetlerini tek kalem olarak sınıflandırırken bazı ülke otoriteleri, örneğin; Birleşik Krallık Sivil Havacılık Otoritesi bakım maliyetlerini sabit ve değişken maliyetler olarak ikiye ayırabilmektedir.

Bakım maliyetleri genel olarak uçağın uçuşlar arası kontrolünü, geceleyen uçakların kontrolünü ve uçakların belirli uçuş saatlerinden sonra yapılan büyük bakımlarını içermektedir. Bakım maliyeti verilenler haricinde arızalanan uçakların tamir ve yedek parça masraflarını da kapsamaktadır. Ayrıca bu maliyetlere uçağın motor ve gövdesinin belirli bir saatten sonra ömür yaşam devrini dolduran ve değişmesi gereken parçaların maliyetleri, atölye, bakım hangarları ve bakım çalışanları işçi ücretleri de dâhil edilebilmektedir.

2.1.3 Dolaylı Uçak İşletme Giderleri

Havayolu işletmelerinde doğrudan uçuş operasyonu için oluşan maliyetler haricindeki maliyetler; genel-idari, havacılık mevzuat ve düzenlemelerinden doğan maliyetler, iştirak ve ortaklıklarla kurulan şirketlerin maliyetleri olarak özetlenebilir.

ICAO ve Amerika Birleşik Devletleri otoriteleri ile birçok havayolu şirketinde doğrudan olmayan operasyonel maliyetler aşağıdaki gibidir⁸;

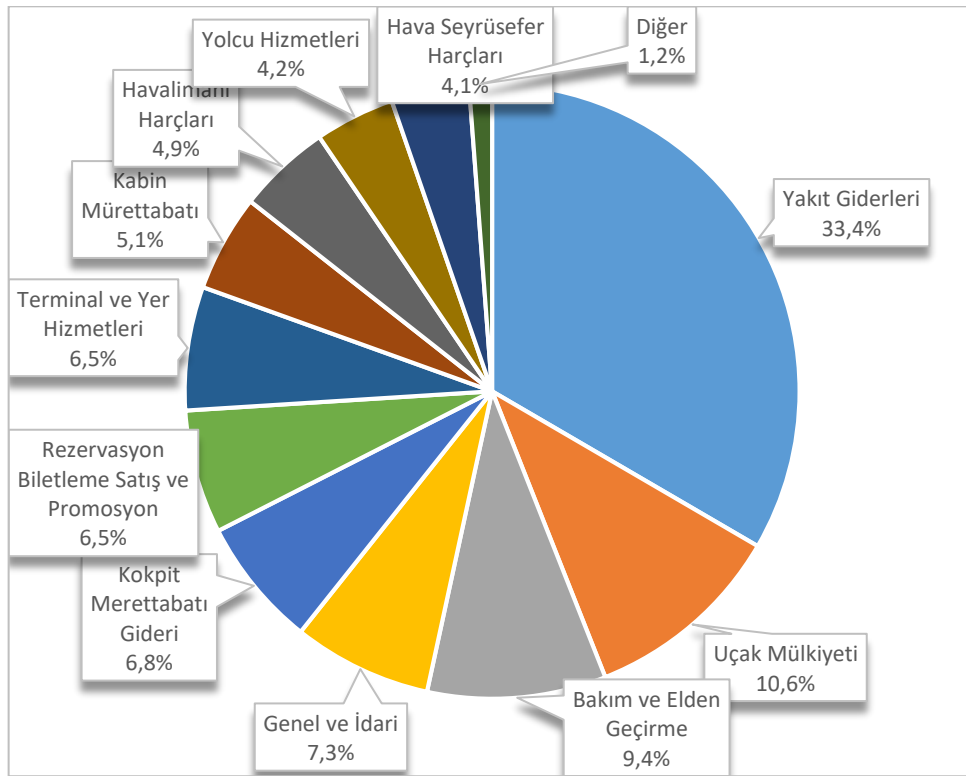
- Havayolu işletmesinin havacılıkla ilgili veya ilgili olmayan mallarının ve ekipmanlarının kullanım ömrünü doldurmasından doğan maliyetler,
- Borçlar için ödenen faizler veya her türlü elde edilen faiz gelirleri,
- Havayolu şirketlerine bağlı iştiraklerden doğan ve hava taşımacılığı ile ilişkili olabilecek maliyetler,

⁸ Doganis, 2002, a.g.k., 76.

- Döviz, hisse senedi ve menkul kıymetlerde oluşan sürekli dalgalanmalardan doğan maliyetler,
- Devlete verilmesi gereken vergiler veya devletten alınan sübvansiyonlardır.

2.2 Havayolu Yönetiminde Yakıt

Havayolu işletmelerinde yakıt, hizmet sağlayabilmek için gerekli en büyük girdilerden biridir. Motorlu hava araçlarının uçma eylemi genel anlamda fosil yakıtların motorlarda yakılmasıyla elde edilen itme kuvveti ve diğer etmenlerin (örneğin; kaldırma kuvveti, sürtünme, ağırlık) uygun koşullarının sağlanması sonucu oluşur. Hava aracının kalkışının gerçekleşmesi için itme kuvvetinin sürtünme kuvvetinden ve kaldırma kuvvetinin ise ağırlıktan büyük olması gerekir.



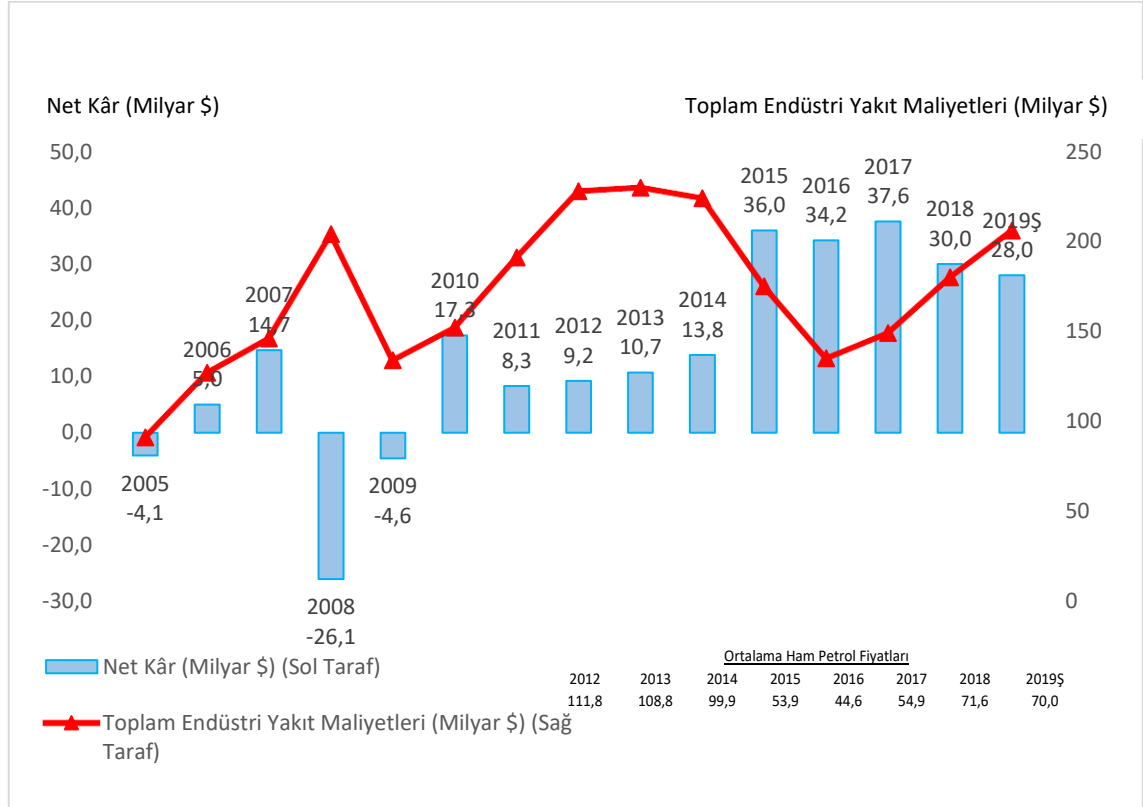
Şekil 2.2 Toplam Havayolu Maliyetleri Dağılımı⁹

Yakıt, havayolu şirketlerinin ekonomisini, stratejisini, kârlılığını, verimliliğini etkileyen en büyük etmenlerden biridir. Şekil 2.2'den de görüldüğü üzere havayolu şirketlerinin en yüksek maliyetini yakıt oluşturmaktadır. 2018 yılında Türk Hava

⁹https://www.iata.org/contentassets/3b5a413027704ce08976fe1890fb43e2/acmg_flyer_fy2014_2015.pdf (Erişim Tarihi: 11.07.2019)

Yolları'nın yakıt gideri toplam 200 000 000\$'dır¹⁰. Yakıt yönetim stratejileri, operasyonların daha etkin yapılması, daha verimli uçakların kullanılması, etkin uçuş planlaması gibi bazı önlemlerle yakıt sarfiyatı azaltılabilmektedir. Genel anlamda bakıldığında bunlar gibi yöntemlerle yakıt giderleri üzerinden binlerce dolar tasarruf edilebilmektedir.

Şekil 2.3 Havacılık Endüstrisi Yakıt Maliyeti ve Net Kâr¹¹



Hava taşımacılığında doğrudan maliyetlerden olan yakıt, havayolu endüstrisinin kârlılığını doğrudan etkilemektedir. Şekil 1.4.'te havayolu taşımacılığında meydana gelen yakıt maliyetleri ve elde ettikleri net kâr ilişkisi gösterilmektedir. Yakıt fiyatlarının arttığı yıllarda kâr oranları çok azalmış veya zarar edilmiştir. 2008 yılında meydana gelen küresel ekonomik krizin de etkisiyle havacılık endüstrisinde oluşan zararın daha da büyüdüğü görülmektedir.

Havacılık sektöründe yakıtın etkilediği bir diğer faktör ise yakıtın kullanıldıktan sonra atık olarak doğaya saldıği gazlardır. Bu bağlamda ICAO (Uluslararası Sivil

¹⁰https://investor.turkishairlines.com/documents/ThyInvestorRelations/2018_12_Aylik_Faaliyet_Raporu.pdf, (Erişim Tarihi: 16.07.2019)

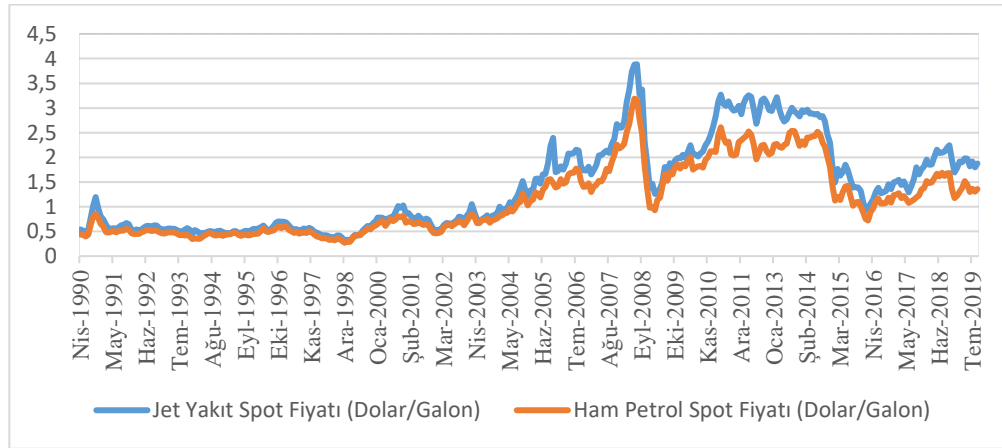
¹¹https://www.iata.org/pressroom/facts_figures/fact_sheets/documents/fact-sheet-fuel.pdf (Erişim Tarihi: 11.12.2019)

Havacılık Örgütü) üye ülkelerde havacılık sektöründe faaliyet gösteren kurum, kuruluş ve kişilere yönelik çevre ile ilgili sorumluluk ve tavsiyelerini belirttiği Ek-16'da (Annex 16) salınım kısıtlanmış ve yer alan tavsiyelerle doğaya olan salınımın azaltılması teşvik edilmiştir.

2.2.1 Yakıt Maliyet Belirleyicileri

Havayolu şirketlerinin işletilmesinde maliyeti etkileyen en önemli unsur olan yakıtın maliyetini; jet yakıt piyasa değeri, havayolu şirketinin ağ yapısı, döviz kuru gibi ekonomik ve yönetsel durumlar şekillendirebilir. Bunların yanı sıra havayolu şirketinin sahip olduğu filonun yaş ortalaması, uçağın ağırlığı ve maliyet katsayısı (cost index) gibi faktörlerle beraber hava sıcaklığı, hava basıncı, hava yoğunluğu, havanın akışkanlığı, nemlilik ve rüzgâr gibi birçok atmosferik parametreler de yakıtın maliyetinin belirlenmesinde etkili olmaktadır.

Şekil 2.4 Nisan 1990 – Eylül 2019 Aylık Jet Yakıt ve Ham Petrol Galon Fiyat Karşılaştırması¹²



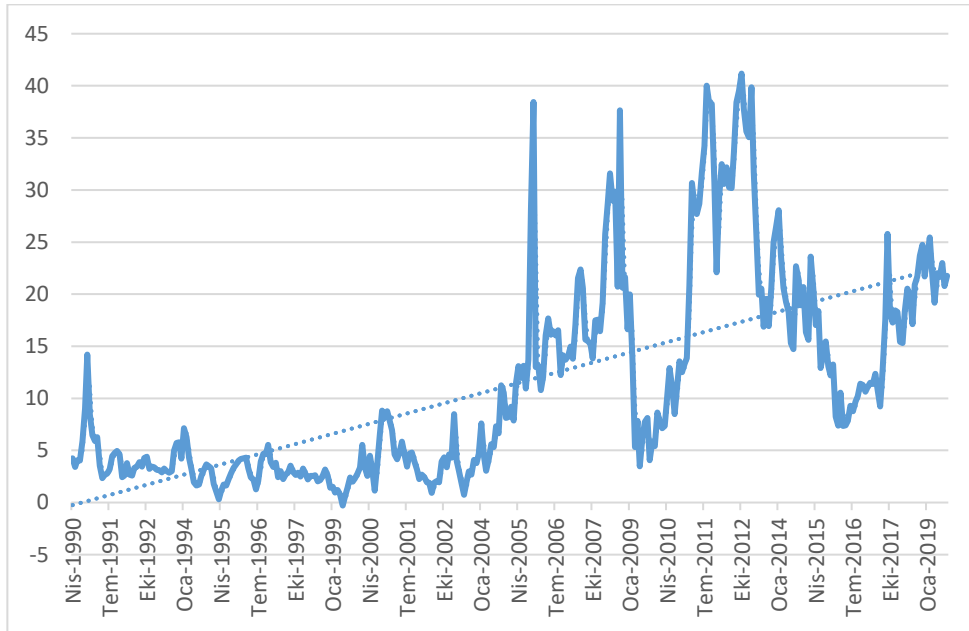
2.2.1.1 Jet yakıtı piyasa değeri

Jet yakıtı ham petrolün rafine edilmesiyle elde edilen bir üründür. Doğal olarak ham petrolün piyasadaki fiyat dalgalanmasından etkilenmektedir. Şekil 2.4'de de görüldüğü üzere ham petrolün her fiyat dalgasından paralel olarak etkilenmekte ve bu durum piyasalara yansımaktadır.

¹² Grafiği hazırlamak için kullanılan veriler U.S. Energy Information Administration resmi sitesinden çekilmiştir. https://www.eia.gov/dnav/pet/pet_pri_spt_s1_d.htm (Erişim Tarihi 20.10.2019)

Emtia piyasasında ham petrol ve ham petrolden elde edilen ürünlerin fiyatları arasındaki farklılık çatlak yayılması (crack spread) ya da rafine kâr haddi olarak bilinmektedir. Şekil 2.4'te 1990'lı yıllardan 2000'li yılların başına kadar bu farkın az olduğu görülmektedir. Fakat son yıllarda ham petrol üzerine koyulan rafine kâr haddinin Şekil 2.5'deki gibi artış eğiliminde olduğu görülmektedir. Ham petrol varil fiyatı ve jet yakıt varil fiyatı üzerinde oluşan bu farkın Ağustos 2011 ve Ekim 2012 yıllarında 40\$'ın üzerine çıktığı görülmektedir. Grafiğe bakılarak jet yakıt fiyatlarının ham petrol fiyatlarından daha hızlı arttığı söylenebilir.

Şekil 2.5 Nisan 1990 – Eylül 2019 Aylık Varil Jet Yakıt Fiyatı Crack Spread Eğrisi¹³



Rafineri kâr haddini etkileyen en önemli faktörlerden birisi de jeopolitik durumlardır. Genelde politik belirsizliğin veya iktidarsızlığın olduğu dönemlerde petrol tedarikinde azalmalar olacaktır ve ham petrol fiyatlarında ise yükselmeler görülecektir. İlk safhada yükselen ham petrol fiyatları rafineri kâr haddine etki ederek azaltacaktır. Fakat daha sonra rafineri bu duruma ham petrolden üretilen ürünlerin çıktısında azalmaya giderek cevap verecek ve rafineri kâr haddi yeniden artacaktır. Diğer bir faktör olarak

¹³ Grafiği hazırlamak için kullanılan veriler U.S. Energy Information Administration resmi sitesinden çekilmiştir https://www.eia.gov/dnav/pet/pet_pri_spt_s1_d.htm (Erişim Tarihi 20.10.2019)

ülkelerin uluslararası ilişkiler politikaları ham petrol üreticilerini ve ham petrolden üretilen ürünlerin fiyatlarını etkileyecektir¹⁴.

Mevsimsellik rafineri kâr haddini etkileyen bir diğer faktördür. Ham petrolden üretilen ürünlere olan talep yaz ve kış aylarında farklılık gösterebilmektedir. Rafineri talebe bağlı olarak kapasitesini ayarlar ve kendi fiyatlandırma stratejisini geliştirebilir. Son olarak döviz kuru ve rafineri kâr haddi arasında ters bir ilişki vardır. Ham petrolün dolar kuru üzerinden satıldığı kabul edilirse, doların diğer para birimlerine karşı değer kazanması ham petrol fiyatlarını artıracak ve bu da rafineri kâr haddinin düşmesine neden olacaktır¹⁵.

McConnachie, Wollersheim ve Hansman (2013) yaptıkları çalışmada, yakıt fiyatlarının son dönemde artmasının yeni nesil yakıt verimli olan uçakların geliştirilmesini sağladığını, seyir uçuş hızlarının düşürülmesine ve gelecekte de bu gelişme eğiliminin devam edeceğini öngörmüşlerdir. Yakıt fiyatlarındaki artışın kısa mesafe uçuş trafiğini azaltacağı öngörülmüştür. Yakıt fiyatlarının gelecekteki piyasa durumları üzerine birçok simülasyon yapılmış ve yakıt fiyatlarındaki artışın havayolu operasyonlarının gelişme oranını düşüreceği, 2025'e kadar büyümeye devam edip sonra sabitleneceğini öngörmüşlerdir. Simülasyon sonuçlarına göre; Gayri Safi Yurtiçi Hasıla'nın (GSYH) artmasının yakıt fiyatlarını artıracığı, artan yakıt fiyatlarının havayolu operasyonunun azalmasını tetikleyeceği ve sonuçta GSYH'nin büyümesinin azalacağına dair çıkarımda bulunmuşlardır. Çalışmanın bulgularından bir diğeri de, yakıt fiyatlarındaki artışla beraber havayolu işletmesinin yakıt verimlilik artışının tetikleneceği fakat bunun sonucunda kısa dönemde yeni uçaklara olan yatırımların ise yavaşlayabileceği olmuştur¹⁶.

Ryerson ve Hansen (2013) yakıt fiyatlarındaki artışın jet uçak operasyon maliyet modelindeki değişkenlerle etkileşiminin rolünü araştırmışlar ve Translog Operasyonel Maliyet Modelini; uçağın yaşı, koltuk kapasitesi gibi birçok değişkeni ekleyerek oluşturmuşlardır. Modellerin geliştirilmesi ve tahminlerinin karşılaştırılmasını yapmak

¹⁴ <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/knowledge/trading-investing/crack-spread/> (Erişim Tarihi 20.10.2019)

¹⁵ <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/knowledge/trading-investing/crack-spread/> (Erişim Tarihi 20.10.2019)

¹⁶ D. McConnachie, C. Wollersheim, & R. J. Hansman. (2013). Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, *The impact of fuel price on airline fuel efficiency and operations*. (p. 4291).

için “Leontief Teknoloji Modelini” kullanmışlardır. Yakıt maliyetini düşürmeye çalışırken jet yakıtı yerine ikame bir değişken aramanın veya kullanmanın etkisinin çok az olduğunun sonucuna ulaşmışlardır. Yakıt maliyetlerinde azaltma sağlayabilmek için gelişmiş verimli uçakların kullanılabilmesine değinmişlerdir¹⁷.

Dünyanın birçok bölgesinde yakıt fiyatları üzerinde sezonluk baskılar olabilmektedir. Jet yakıtı üreten rafineler kapasitesini farklı bir ürünü üretmek için kullanılabilir. Örneğin, kış aylarında talebi ve spot fiyatı artan ısıtma yağının üretimine ağırlık verilmesi, jet yakıtının daha az üretilmesine neden olabilecektir¹⁸. Bu durum fiyatın artmasına neden olabilmektedir. Aynı şekilde rafineler yaz turizmi yapılan bölgelerde hava trafiğinin artmasından dolayı artan jet yakıtı talebini karşılayabilmek için fazla üretim gerçekleştirebilmekte ve jet yakıtının fiyatı artabilmektedir.

2.2.1.2 Ağ tasarımı

Havayolu işletmeleri benimsediği iş modeline, hizmet ettiği yolcu profiline, bölgeler arası pazar hacmine ve gittikleri havalimanındaki alt yapı hizmetlerine bağlı olarak ağ tasarımı yapmaktadırlar. Planlanan seferlerin mesafeleri de bu bağlamda önemlidir. Bazı havayolu şirketleri bölgesel çalışırken bazıları ise uzun mesafeli uçuşlar gerçekleştirebilmektedirler.

Havayolu ağ çeşitlerine müşteri açısından ve operasyonel perspektiften bakılmaktadır. Müşteri açısından bakıldığında noktadan noktaya (point to point) veya topla dağıt (hub & spoke) ağ yapıları mevcuttur. Topla ve dağıt ağ yapısında, havayolu şirketi trafiğinin önemli bir kısmını belli bir merkeze kanalize eder ve dâhil olduğu havayolu ittifakındaki diğer uçuşları buraya yönlendirmeye çalışır. Böylece merkezden diğer noktalara rotalar belirlenerek ulaşım sağlanabilmektedir. Noktadan noktaya olan ağ yapılarında ise belirlenen havalimanları arasında doğrudan (ara istasyonda durma gerçekleştirilebilir fakat yolcu uçağı ve sefer numarası değişmemek kaydıyla) veya duraksız seferler iki nokta arasında gerçekleştirilir¹⁹. Havayolu işletmelerinin ağ yapılarına operasyonel açıdan bakıldığında ise bu ağ yapıları lineer (doğrusal), grid (ızgara), radyal

¹⁷ M. S. Ryerson & M. Hansen, (2013). Capturing the impact of fuel price on jet aircraft operating costs with Leontief technology and econometric models. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 33, 282-296.

¹⁸ S. Holloway, (2008). *Straight and Level: Practical Airline Economics: Practical Airline Economics*. Routledge. s. 287.

¹⁹ Holloway, 2008, **a.g.k.**, 373.

ve topla dağıt şeklinde olabilmektedir. Havayolu şirketlerinin geliştirmiş olduğu ağ yapıları hakkında daha ayrıntılı bilgi için dipnotta verilen kaynak incelenebilir²⁰.

Havayolu şirketleri geliştirdikleri ağ tasarımları ile iç hatlar ve dış hatlarda birçok pazara ulaşıp pay alabilirler fakat direkt uçuş sağlanamadığı için bilet ücretleri ve yolcuların bekleme süreleri artabilmektedir. Kimi havayolu noktadan noktaya uçuş stratejisine devam ederken birçoğu ise topla dağıt ağ yapısını benimsemektedir. Havayolu şirketleri toplanma merkezlerine (hub) ittifak havayollarını çekerek ve aynı havayolu ittifakına dâhil diğer havayolu şirketlerinin hizmet ettiği öteki havalimanlarına ulaşarak tüm dünyayı kaplayan bir ulaştırma ağı kurabilmektedirler. Fakat bu durum hublara gelen yolcu ve uçak sayısının artmasına neden olacak ve hizmet alınan havalimanını büyümeye zorlayacaktır. Büyük havalimanlarında yer alan uzun taksit yolları ve trafik nedeniyle havada ya da rule sırasında oluşan uzun bekleme süreleri yakıt sarfiyatını artırabilmektedir.

Hsu ve Eie (2013) havayolu şirketlerinin ağ tasarımını, uçuş sıklıklarını ve rotalarını jet yakıt fiyatlarındaki dalgalanmalardan kaynaklanan maliyetteki belirsizlikten dolayı en azından başa baş noktada tutulabilmesini sağlamak olarak tanımladıkları güvenilirlik sınırı üzerinde düzenleyebilmeyi amaçlamışlardır. Yaptıkları çalışmanın sonuçlarına göre yakıt fiyatlarının yüksek olduğu zamanlarda doluluk oranı az olan rotaların yanı sıra yüksek doluluk oranına sahip uzun mesafeli rotalara yapılan seferlerin de güvenilirlik sınırına ulaşamadığı ve zarar edebildiğini görmüşlerdir²¹.

O'Kelly (2012) havayolu şirketlerinin topla ve dağıt ağ yapılarında tüketilen yakıtı ölçüt kabul ederek; büyük uçakların yakıt sarfiyatını incelemek, yoğun olan rotalardaki doluluk oranını dengelemek ve toplama merkezlerinin (hub) konumlarını değerlendirerek modellenmesi üzere çalışmıştır. Yapılan uzun mesafeli yoğun rotalara verimli yakıt sarfiyatı olan uçakların atanması, fazla yoğun olmayan kısa veya orta mesafeli rotalara daha az verimli uçakların atanmasının çevresel faydasına değinilmiştir. Aynı zamanda topla ve dağıt ağ yapısından vazgeçmeyerek toplama merkezlerinde oluşan yoğunluktan

²⁰ G. Burghouwt, (2016). *Airline network development in Europe and its implications for airport planning*. Routledge. s. 8-20

²¹ C. I. Hsu & W. Y. Eie, (2013). Airline network design and adjustment in response to fluctuation in jet fuel prices. *Mathematical and Computer Modelling*, 58(11-12), 1791-1803.

dolayı meydana gelen kaybın tasarlanacak bypass rotalarla ve hublar arası bağlantılarla azaltılabileceği öngörülmüştür²².

2.2.1.3 Hava taşıyıcısının ağındaki havalimanlarındaki yerel durumlar

Havayolu işletmeleri yurtiçi veya yurtdışı seferlerinde ulaştığı her havalimanında farklı yakıt fiyatlarıyla karşı karşıya kalmaktadır. Bu fiyat farkının oluşması; ülkedeki petrol rezervinin mevcudiyetine, ekonomik koşullarına, rafineye olan uzaklığına, devletin yakıt fiyatları üzerinden belirlediği vergiye ve bunlar gibi birçok faktöre bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Bunlardan farklı olarak yakıt tedarikçileri arasında rekabetten veya anlaşmalardan kaynaklanan hem yakıt hem de ikmal servisleri için alınan ücretler de farklılaşabilmektedir.²³.

Bir havalimanındaki jet yakıt tedarikçileri genellikle havalimanı işletmesine brüt gelirleri üzerinden bir ücret öderler. Bazı durumlarda havalimanı işletmecisi yakıtı kendisi satın alıp uçak operatörlerine tedarik edebilmektedir. ICAO'nun ücret politikaları, yakıt imtiyaz ücretlerinin ayrımcı olmayacak şekilde yani yakıt ve petrol maliyetlerinin durumuna göre mütevazı bir gelir elde edecek şekilde düzenlemelerini önermektedir²⁴.

Yakıt tüketiminden dolayı doğaya birçok zararlı gaz salınımı gerçekleşmektedir. Özellikle Avrupa'da havalimanlarında salınımdan dolayı havayolu işletmelerine yaptırımlar uygulanmaktadır. Örneğin Bern, Cenova, Stockholm, Zürih gibi havalimanlarında havalimanı işletmeleri uçak motorları tarafından yerel hava kalitesine etki ederek doğaya salınan gazlar yüzünden ücrete tabi tutulmaktadır. 2010'da Stockholm'de salınan NO_x (Azot Oksit) kilogram başına 7\$ olarak ücretlendirilmiştir. Avrupa başta olmak üzere gelecekte diğer havalimanlarının da havayolu şirketlerinin buna benzer ücretlere tabi tutacağı öngörülmektedir²⁵.

2.2.1.4 Uçağın ağırlığı

Uçak üreticileri üretilen uçağın sertifikalandırılmasından önce uçağın belirli ağırlık limitlerini tespit etmeleri gerekmektedir. Uçakların işletilmesi için kullanılan referans el kitaplarında ve literatürde ağırlıklar hemen hemen aynı şekilde geçmektedir.

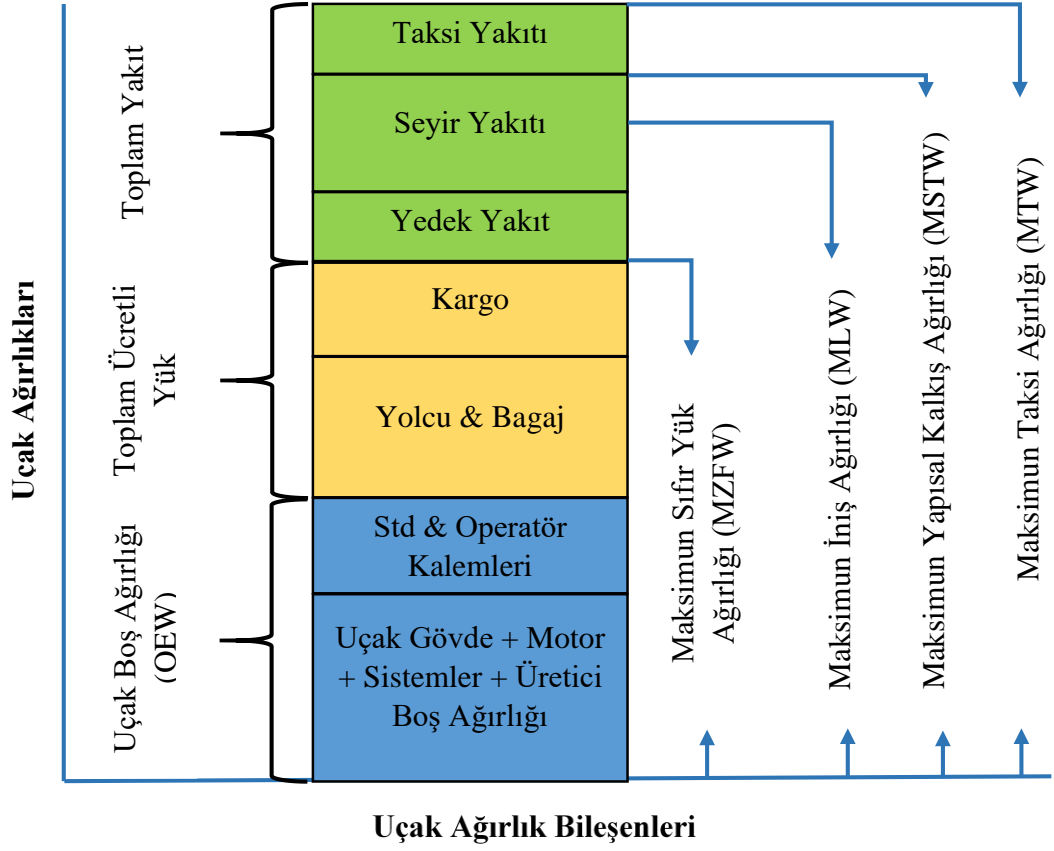
²² M. E. O'Kelly (2012). Fuel burn and environmental implications of airline hub networks. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17(7), 555-567.

²³ Holloway, 2008, **a.g.k.**,287.

²⁴ A. Odoni, vd. (2013). *Airport systems: Planning, design, and management*. McGraw-Hill Professional.

²⁵ Odoni vd. 2013, **a.g.k.**, 256.

Şekil 2.6 Uçak Ağırlığı Bileşenleri²⁶



Şekil 2.6’de uçak ağırlık bileşenleri ile aşağıda tanımları ve kısaltmaları verilmiştir;

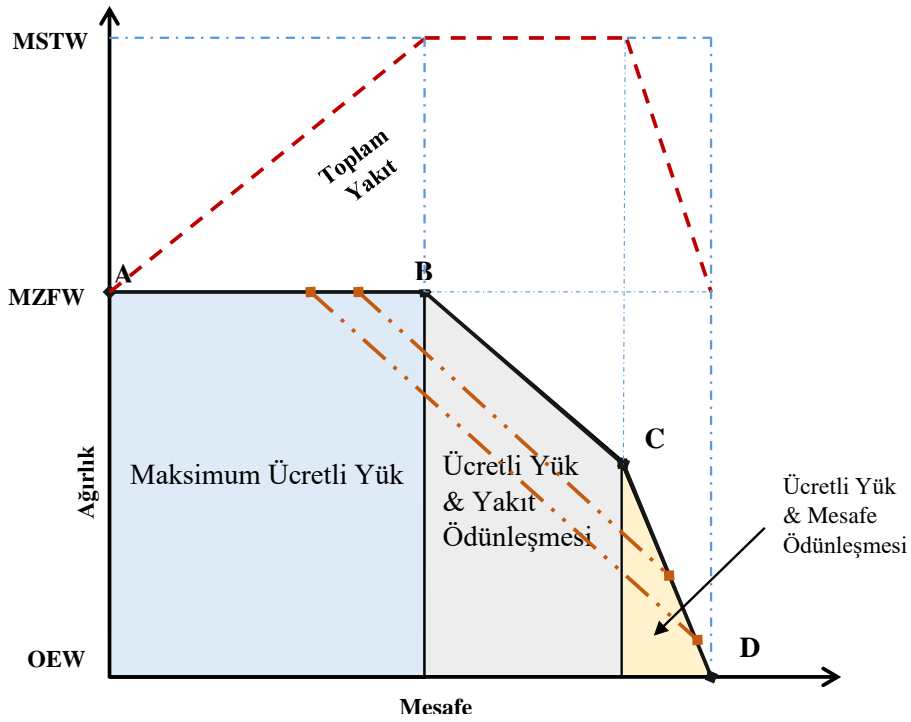
- Uçağın boş ağırlığı (Operating Empty Weight-OEW); Uçağın yakıt, yük ve yolcu olmadan servise hazır şekildeki toplam ağırlığıdır. Üretici boş ağırlığı, standart kalemler ve işletmeci kalemleri toplamıdır. Üretici boş ağırlığı genellikle üreticiden çıktığı haldeki uçak gövde, motor üniteleri, mobilya, aviyonik sistem ve uçak sistemlerinin toplam ağırlığını içerir. Standart kalem ağırlıklarını motor içerisinde bulunan yağ, yangın ekipmanları, oksijen ekipmanları gibi ürünlerin ağırlığı oluşturur. İşletmeci kalemlerinin ağırlığı operasyonun gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan kalemleri kapsar. Bunlar uçuş mürettebatı ve bagajları, uçak belgeleri, yiyecek ve içecekler, yolcu koltukları ve cankurtaran malzemeleri içerir.

²⁶ S. Ackert, (2013). *Aircraft payload-range analysis for financiers*. Aircraft Monitor: San Francisco, CA, USA.

- Maksimum Yapısal Ücretli Yük (Maximum Structural Payload-MSP); Yolcu, bagajı ve kargo için tasarlanan toplam yapısal yük ağırlığıdır.
- Maksimum Taksi Ağırlığı (Maximum Taxi Weight-MTW); Uçağın kalkıştan önce taksiye başlamadan önceki en yüksek ağırlığıdır. Uçağın olabileceği en ağır halidir.
- Maksimum Kalkış Ağırlığı (Maximum Takeoff Weight -MTOW); Uçağın kalkarken olabileceği maksimum ağırlıktır. (MTW-taksi yakıtı= MTOW)
- Maksimum İniş Ağırlığı (Maximum Landing Weight-MLW); Uçağın inerken olabileceği maksimum ağırlıktır. (MTOW-seyir yakıtı=MLW)
- Maksimum Sıfır Yakıt Ağırlığı (Maximum Zero Fuel Weight –MZFW); Uçakta hiç yakıt olmadan toplam olabileceği en yüksek ağırlıktır.

Uçak satın almalarında havayolu veya hava kargo işletmelerinin uçak tercih ederken alternatiflerini değerlendirmede ücretli taşınan ücretli yük & mesafe diyagramları kullanılabilir. Şekil 2.7’de ücretli yük & mesafe diyagramı verilmiş ve açıklanmıştır²⁷.

Şekil 2.7 Ücretli Yük & Mesafe Diyagramı



²⁷ Ackert, 2013, a.g.k., 7-8.

Şekil 2.7 de, A noktası uçağın maksimum alabileceği yük ile yüklenip yakıtsız olduğu durumu temsil etmektedir. MZFW (Maksimum Sıfır Yakıt Ağırlığı) uçak üreticisi tarafından belirlenen sabit bir değer olmasına karşın, bileşmelerinden olan OEW havayolu işletmecisi tarafından düşürülebilmekte böylece daha fazla ücretli yük taşıyabilmektedir. A noktasından B noktasına doğru ilerledikçe alınan yakıtla beraber kat edilen mesafe artmaktadır.

Şekil 2.7 de, B noktası uçağın maksimum yük ve maksimum yakıtla uçabileceği son noktadır. Uçakların karakteristik bir özelliği olarak bu noktadan sonra istenilen menzile ulaşması için ücretli yükten feragat edip yakıtın ağırlığının artırılması gerekecektir. Burada yakıt ve yük ödünleşmesi gerçekleşir. Planlamanın doğru yapılması ve yöneticiler tarafından taktiksel kararların alınması gerekmektedir. Alınan fazla yakıt kadar gidilen mesafe artacaktır. Dolayısıyla uçakların verimli performans göstergeleri ne kadar yüksek olursa yakıt maliyet etkinliği de o derece iyileşecektir.

Şekil 2.7 de, C noktası uçağın maksimum yakıt kapasitesiyle ulaşabileceği en etkin noktadır. Şöyle ki bu nokta tam yakıt kapasitesi kullanılarak, belli miktarda ücretli yolcu ile ulaşılacak en uzak noktadır. Bu noktadan sonra uçulan menzili artırmak için alınan yakıt karşılığında, vazgeçilen ücretli yük ağırlığı çok yüksek olacaktır. C noktasından sonra daha fazla mesafe kat etmek, sefer bazlı ticari bakış açısıyla bakıldığında kârlılık ve verimliliğe olumsuz etki etmesi beklenir.

Son olarak Şekil 2.7 de, D noktası uçağın hiç ücretli yolcu almadan boş ağırlığı (OEW) ve alabileceği en yüksek yakıt miktarı ile uçabileceği en uzak menzili temsil eder. Bu noktaya sadece ve sadece uçak üreticisinden müşterisine sıfır teslim edilirken veya kritik olmayan bir arızada uçakta yolcu taşınmasını önlemek adına gerçekleştirilir. Kesikli noktalı şekilde verilen doğrular yetkililerce onaylanan alternatif MTOW'leri vermektedir. Havayolu şirketleri bu limitleri sınırlar içinde kalmak koşuluyla kendileri belirleyebilir ve satın alınan ağırlık olarak adlandırılırlar.

2.2.1.5 Rüzgâr

Rüzgâr atmosferdeki basınç farklılıklarından oluşan; yüksek basınç merkezinden alçak basınç merkezine doğru gerçekleşen hava akımlarıdır. Uçak performansları havada meydana gelen rüzgârların yönünden ve şiddetinden olumlu veya olumsuz şekilde etkilenmektedir. Örneğin; pistlerin inşaatı planlanmadan önce o bölgenin geçmiş rüzgâr

yönü ve şiddeti istatistiksel olarak incelenir ve uçakların iniş ve kalkış yönleri kafa rüzgârı alacak şekilde tasarlanır.

Eğer bir uçak kafa rüzgârına maruz kalırsa yere göre hızı azalırken gösterge hava hızı değişmeyecektir. Diğer yandan uçak kuyruk rüzgârına maruz kalırsa yere göre hızı artarken gösterge hava hızı değişmeyecektir. Yan rüzgâr uçağın yönünü değiştirmeye zorlar fakat pilot yan rüzgâra karşı istikamet dümenini kullanarak yönünü düzeltir. Her uçağın belirli yönlerden gelen rüzgâr şiddetlerine karşı bir limiti vardır ve bu limitler üstünde uçakların uçurulması emniyet açığı yaratacağından uçuş planlanmaz veya alternatif havalimanı kullanılır.

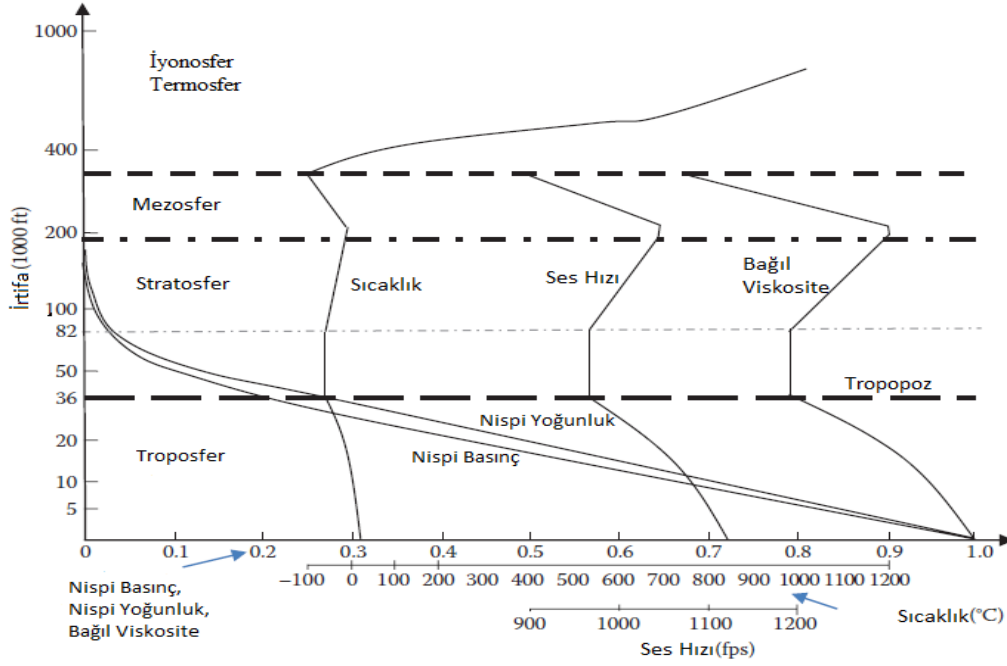
Yakıt tüketimi açısından düşünüldüğünde kalkış esnasında kafa rüzgârı istenir çünkü kafa rüzgârı uçağın kaldırma kuvvetine olumlu etki yapar, yere göre hızını düşürerek yakıt sarfiyatının azalmasını sağlar. Aynı şekilde iniş sırasında uçağın kafa rüzgârı alması istenir çünkü uçağın yere göre hızının daha düşük olması daha rahat iniş yapılmasını sağlar. Yan rüzgâr, inişi ve kalkışı zorlaştıran bir unsurdur ve limitler dışında iniş ve kalkışa izin verilmez. Uçakların seyir uçuşu sırasında kuyruk rüzgârı almaları istenir çünkü bu yere göre olan hızı artıracak ve yakıt tüketimini azaltacaktır. Uçuş planlamaları yapılırken seyir güzergâhları meteoroloji haritalarından yararlanılarak hava akımları tercih edilir ve uçak rüzgârı arkadan alacak şekilde planlanır.

2.2.1.6 Atmosferik parametreler ve ICAO temel hava değerleri (ISA)

Dünyayı bir gaz tabakası ile saran, birçok alt sisteme sahip olan ve güneşten gelen enerjiyi soğurarak elektriksel ve manyetik güçlerle suyun ve diğer kimyasalların dönüşümünü sağlayan bütün hava olaylarının gerçekleştiği aktif sisteme atmosfer denilmektedir²⁸. ICAO atmosferi 5 katman olarak (1) troposfer, (2) stratosfer, (3) mezosfer, (4) termosfer veya ozonosfer ve (5) ekzosfer isimlendirmiştir. Bu katmanların farklı termal, kimyasal, yoğunluk ve hareketlilik özellikleri vardır.

²⁸M. H. Sadraey, (2017). *Aircraft performance: an engineering approach*. CRC Press, s. 2.

Şekil 2.8 Atmosfer katmanları ve parametrelerin değişimi²⁹



Troposfer, yeryüzünden başlayarak ortalama 11 km (36.089 ft) yüksekliğine ulaşan atmosferin en yoğun katmanıdır. Bu katmanda yüksekliğe çıktıkça hava sıcaklığı her 1000 m'de 6.5°C kadar düşer ve hemen hemen bütün hava olayları bu katmanda gerçekleşir. Katmanın en tepe noktasındaki hava basıncı deniz seviyesi hava basıncının (1 atm) %10'u kadardır ve yerden yükseldikçe azalmaya devam eder. Troposfer, tropikal bölge üzerinde kutup bölgesine göre daha kalın olup yaz mevsiminde kış mevsimine göre daha kalındır.

Troposfer ve stratosfer arasında kalan katman tropopoz (iklim kabuğu) olarak adlandırılır. Bu katmanda sıcaklık irtifa yükseldikçe düşerek -56°C'de sabit kalır. Büyük uçaklarla gerçekleştirilen ticari uçuşların birçoğu bu katmanda veya buna yakın irtifalarda gerçekleşir. Atmosferin beş katmanından en incisi olmasına rağmen kütleinin %80'ini kapsar.

Stratosfer katmanı troposferin bitiminden (11 km)başlar ve 50 km boyunca yükselir. Sıcaklık bu katmanın ilk başladığı seviyelerde -56°C'den başlayarak tropopoz boyunca sabit kalır ve Ultra Viole (UV) ışınlarının ozon tabakasında soğurulmasından

²⁹ Sadraey, 2017, **a.g.k.**, s. 5.

dolayı yükselerek -3°C 'ye kadar yükselir. Bu tabakada nem olmadığından hava olayları görülmez ve yoğunluğu azdır.

Üçüncü katman olarak mezosferde yükseklik 80 km'ye ulaşarak, hava sıcaklığı düşme eğilimi gösterir ve tepe noktasında -93°C 'ye ulaşır. Mezosferden sonra termosfer katmanı gelir ve güneş ışınlarının sıcaklığı artırmasıyla birlikte hava sıcaklığı 1500°C 'ye kadar çıkabilmektedir. Bu katman yeterli hava olmadığından uçakların uçabilmesi için uygun değildir. Son olarak iyonosfer (ozonosfer) 80 km ile 400 km arasında yer alır ve elektrikle yüklüdür. Bu katmandaki moleküller iyon halindedir. Yeterli hava olmadığından uçakların uçuşu için uygun değildir fakat bu katman radyo dalgalarını yansıtılabildiğinden uzun mesafeli iletişimi mümkün kılar.

Uçağın performansı büyük derecede atmosferik parametrelere bağlıdır. Bütün atmosferik parametreler herhangi bir yerde veya yükseklikte uygun ölçücü donanım ve aletlerle uçuş boyunca test edilir. Şekil 2.8 'da görüldüğü üzere hava sıcaklığı arttıkça havanın yoğunluğu azalacaktır. Yoğunluğu düşük havada itme gücü azalır ve ivmelenme süresi artar. Bu da kalkış sırasında koşu mesafesinin artmasına neden olur. Tırmanışta ise hava yoğunluğunun düşük olması yüksek havaya nazaran tırmanma süresini uzatacaktır. Dolayısıyla hava yoğunluğunun düşük olması yakıt sarfiyatını artıracaktır.

Hava basıncı hava sıcaklığı ile ters, hava yoğunluğu ile doğru orantılıdır. Hava basıncının yüksek olması uçağın performansını olumlu etkileyecek ve yakıt sarfiyatının azalmasına neden olacaktır. Uçakların performansının en verimli olduğu hava koşulları yakıt sarfiyatının en az olduğu şartlardır. Bu hava koşulları hava sıcaklığının düşük, kuru, hava basıncının ve yoğunluğunun yüksek olduğu hava şartlarında tespit edilebilir.

Gilani ve Körpe (2019) seyir uçuşu safhasında çevresel hava sıcaklığının yakıt maliyetine etkisi üzerine çalışmışlardır. İstanbul ve Hakkâri arasında yaz mevsimi ve kış mevsimi şeklinde uçuşlarda gece ve gündüz olarak senaryo geliştirip yakıt maliyetini değerlendirmişlerdir. Seyir uçuş safhası optimum irtifa ve optimum hızda seyrederken sıcaklığın etkisinin yakıt tüketimine etkisi üzerinde çalışmışlardır. İncelenen uçuş senaryosuna göre yaz mevsiminde gündüz uçuş yaparak geceye göre uçuş başına zamandan ve yakıttan ortalama 20\$ tasarruf edilebileceğini göstermişlerdir³⁰.

³⁰ M. Gilani & D. S. Körpe, (2019). Effect of Ambient Temperature Variations on the Direct Operating Cost of a Domestic Flight. *Journal of Aeronautics and Space Technologies*, 12(2), s. 197-207.

Atmosferde hava durumu standart değildir ve sürekli değişkenlik göstermektedir. Uçağın kalkış yaptığı meydan ve iniş yaptığı meydanların yükseklikleri ile diğer hava koşulları aynı kalmamaktadır. Uçakların farklı basınç değerlerinde, farklı sıcaklıklarda, farklı havalimanı yüksekliklerinde ve bunun gibi benzer birçok faktöre bağlı olarak uçağın performansını dolayısıyla yakıt maliyetini değiştirebilecek etmenler vardır. Çeşitli hava araçlarının performansını belirlemek ve karşılaştırmalarının yapılabilmesi için ortak bir temel sağlamak amacıyla ICAO atmosferik hava koşulları standartlarını geliştirmiştir. Bu koşullar Uluslararası Standart Atmosfer (International Standard Atmosphere –ISA) olarak adlandırılmıştır³¹.

ICAO Uluslararası Standart Atmosfer olarak belirlediği temel hava özellikleri aşığıdaki gibi sıralanabilmektedir³²:

- Hava kuru kabul edilmiştir,
- Ortalama deniz seviyesindeki basınç 760mm cıva (29.92inch) = 1013,25 milibardır,
- Ortalama deniz seviyesindeki hava sıcaklığı 15°C (288,15 °K),
- Ortalama deniz seviyesindeki hava yoğunluğu 1,225 kg/m³,
- Yer çekim ivmesi $g = 980,665 \text{ cm/sn}^2$,
- İklim kabuęunun ortalama deniz seviyesinden yüksekliği 11km. (36.000ft),
- İklim kabuğundaki sıcaklık -56,5°C,
- Ortalama deniz seviyesinden 5 km aşığı ve 11 km yüksekliğe (İklim kabuğuna) kadar olan bölgede sıcaklık azalması her kilometrede 6,5°C değerlerindedir,
- 11 km den 20 km ye kadar sıcaklık sabit kalmakta yani eő ısıl durum vardır,
- 20 km den 32 km ye kadar sıcaklık her km.de 1°C artar.

2.2.1.7 Maliyet katsayısı (cost index)

Uçuş Yönetim Sistemi (Flight Management System-FMS) uçağın havada yönlendirilmesini, kontrolünü ve performans optimizasyonunu üç boyutlu eksen-

³¹ International Civil Aviation Organization. (1993). *Manual of the ICAO Standard Atmosphere: Extended to 80 Kilometres (262 500 Feet)* (Vol. 7488). International Civil Aviation Organization.

³² Türk Hava Kuvvetleri (2007) *Meteoroloji* (1. Baskı) 2. Ana Jet Üs Komutanlığı, İzmir, s. 17.

sağlayan bir sistemdir. FMS 1978 yılında geliştirilmeye başlanmış ve 1982 yılında Boeing B757 ve B767 uçak modellerine standart bir donanım olarak konulmaya başlanmıştır³³. Maliyet katsayısı (CI) kullanımı havayolu şirketleri ve uçak üreticileri tarafından 1973 yakıt krizinden sonra yakıt maliyetlerinin toplam maliyet içerisindeki payının artmasından sonra önemi artmıştır. Günümüzde havayolu şirketi tarafından uçuş öncesi belirlenen maliyet katsayısı uçuş mürettebatına iletilir ve yönetilen modunda olan FMS sistemine girilmesi ile kullanılmaktadır.

Maliyet katsayısı en hesaplı genel ekonomiyi elde etmek için yakıt yakma oranını ve seyir uçuş süresini kontrol etmeye çalışan esnek bir araçtır. Maliyet katsayısı zamanın maliyetinin, yakıt maliyetine oranı (\$/kg) ile bulunmaktadır ve 2.1 Eşitliğinde verilmiştir.

$$\text{Maliyet Katsayısı (CI)} = \frac{\text{Zaman maliyeti}}{\text{Yakıt Maliyeti}} \quad (2.1)$$

Eğer yakıt maliyetlerinin önceliği zaman maliyetinden daha fazla ise maliyet katsayısı düşük olacaktır. Zaman maliyetinin sıfır olduğu düşünülürse FMS uçağı en yüksek menzile ulaştıracak Mach hızında uçacaktır. Ters durumda ise yakıt maliyetinin zaman maliyetine kıyasla daha ucuz olduğu zamanlarda maliyet katsayısı yüksek olacaktır. Yakıt maliyeti sıfır olarak kabul edildiğinde maliyet katsayısı 999 olabilecektir³⁴. Airbus'ın uçaklarında kullanılan iki tip FMS vardır. Bunlar Sperry/Honeywell ve Smiths Uçuş Yönetim Sistemleridir. Sperry için kullanılan maliyet katsayısı aralığı 0-999 ve Smiths için kullanılan maliyet katsayısı aralığı 0-99'dur³⁵.

Maliyet katsayısının hesaplanması havayolu şirketlerine bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Havayolu şirketlerinin belirlemiş olduğu maliyet katsayılarını sürekli olarak sabit almazlar çünkü her şirketin etkilendiği ekonomik ve çevresel dinamikler zamana veya çevreye göre değişebilmektedir. Yakıt maliyetinden tasarruf edebilmeleri için maliyet katsayısı belirlenirken etkili olan dinamiklerin hesaba katılması gerekebilmektedir³⁶.

³³ Avery, D. (2010). The evolution of flight management systems. *IEEE software*, 28(1), s. 11.

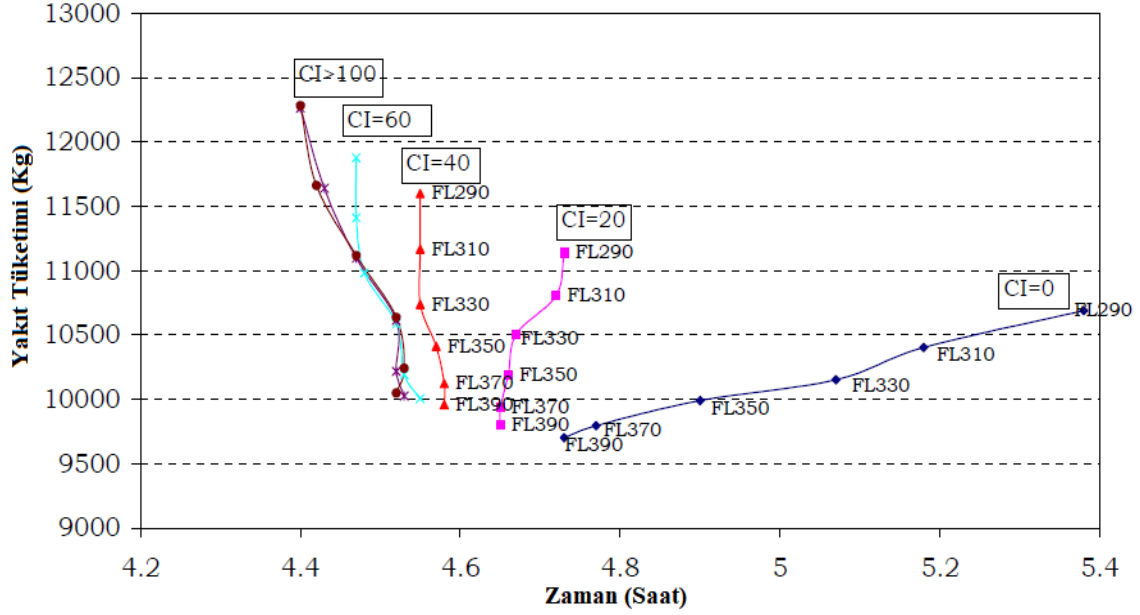
³⁴ Airbus, S. A. S. (2004). Getting to grips with Fuel Economy. Flight Operations Support & Line Assistance, (4), s. 8.

³⁵ Airbus, S. A. S. (1998). Getting to Grips with Cost Index. Flight Operations Support & Line Assistance, (2), s. 7.

³⁶ Delipınar, E. (2001). *Modern Yolcu Uçaklarında Uçuş Yönetim Sistemine (FMS) Girilen Maliyet*

Maliyet katsayısının yakıt maliyeti üzerine etkisine yalnız başına bakılmamalıdır, çünkü uçuşun süresinde de belirleyici olacaktır. Aşağıdaki Şekil 1.10'da Airbus A319 uçağı için farklı maliyet katsayılarının ve farklı uçuş irtifalarının belirleyici olduğu uçuş süreleri ve seyir yakıt harcamalarını göstermektedir.

Şekil 2.9 A319 Uçağı Belirli Maliyet Katsayılarına Göre Yakıt Tüketimi ve Zaman³⁷



Şekil 2.9'da görüldüğü üzere düşük maliyet katsayısı (CI) ile uçmak etkili bir miktarda tüketilen yakıtın azalmasına neden olmaktadır, fakat yakıt tüketimindeki düşüş oranının zamanın artma oranından daha az olduğu görülmektedir. Buradan biraz yüksek maliyet katsayısı kullanmak, bir miktar yakıt tüketimini artıracaktır fakat zamandan önemli miktarda kazanç sağlanmış olacaktır. Örneğin A319 uçağı ile 2000 nm mesafeli bir uçuş için maliyet katsayısı 0'dan 20'ye çıkarılırsa uçuş süresini 15 dakika (%15) azaltır ve yakıt tüketimini 200 kg artırır³⁸.

2.2.2 Jet Yakıtı

Jet yakıtı, havacılık türbin yakıtı (Aviation Turbine Fuel-(ATF)) kerosen ya da AVTUR olarak bilenen türbin motorlu uçaklarda kullanılmak için üretilen bir tür havacılık yakıtıdır. Uluslararası standartlarla üretim özellikleri belirlenen jet yakıtı dünya

Katsayısı (Cost Index) Analizi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. s. 3.

³⁷ Airbus, 2004, a.g.k, 55.

³⁸ Airbus, 2004, a.g.k, 55.

genelinde en fazla Jet A veya Jet A1 olarak üretilmektedir ve bu türleri ticari havacılık için en fazla kullanılan yakıt türleridir.

2. Dünya Savaşı sonrasında kullanılan jet yakıtları kerosen tabanlı üretilmeye başlanmıştır. Dünyada jet yakıtları için kullanılan standartlar da bu tarihten sonra geliştirilmiştir. Jet yakıtlarının kullanılabilirliği ve performans gereklilikleri belirli standartlarla uzun yıllar boyunca evrilerek gelmiş ve içeriklerinde minimum donma noktası, parlama noktası, kendiliğinden tutuşma ısı, asitlik oranı gibi değerlerle belirlenmiştir. Devletler kendi standartlarını geliştirmiş ve üretim yapan rafinelerin bu kurallara uymasını sağlamıştır. Devletler Amerika'da kurulan Uluslararası Test Malzemeleri Birliği'nin (ASTM International) belirlediği standartları referans almaktadırlar. Bağımsız olarak kurulan özel denetleme şirketleri ise kullanılan yakıtın belli kalite standartlarını sağladığını sertifikalandırabilmektedirler. Örneğin; Türkiye'de sadece TÜPRAŞ tesislerinde üretilen jet yakıtlarının TSE ve CE standartlarını karşılaması gerekirken aynı zamanda kalitelerini belgelemek adına Ortak Denetleme Grubu (Joint Inspection Group - JIG) adlı organizasyonun sertifikalandırmasına tabi tutulup Müşterek İşletilen Sistemlerde Havacılık Yakıtı Kalite Gereklilikleri (Aviation Fuel Quality Requirements for Jointly Operated Systems – AFQRJOS) standartlarını uygulamaktadırlar. Aşağıda Jet A ve Jet A1 yakıtının bazı özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.2 Jet A1 ve Jet A Yakıt Özellikleri³⁹

	Jet A	Jet A-1
Asitlik, mg KOH/g	0.10 Maks.	0.10 Maks.
Aromatik, Vol. %	%25 Maks.	%25.0 Maks.
Sülfür, Merkaptan, Wt. %	%0.003 Maks.	%0.003 Maks.
10% Damıtma, °C	205 Maks.	205.0 Maks.
Nihai Kaynama Noktası, °C	300 °C Maks	300.0 °C Maks
Damıtma Kalıntısı, %	%1.5 Maks.	%1.5 Maks.
Damıtma Kaybı, %	%1.5 Maks.	%1.5 Maks.
Parlama Noktası, °C	38 °C Min.	38.0 °C Min.
Yoğunluğu @ 15°C, kg/m ³	775/840	775/840.0
Donma Noktası, °C	-40 °C Maks	-47.0 °C Maks
Viskozite @ -20°C, mm/s	8.0 Maks.	8.0000 Maks.
Net Yanma Isısı, MJ/kg	42.8 Min.	42.80 Min.

³⁹ <https://www.exxonmobil.com/en/aviation/products-and-services/products/jet-a-jet-a-1> (Erişim Tarihi 16.10.2019)

Jet yakıtlarını birbirinden ayıran en önemli özellik donma noktalarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Jet A yakıtı sadece Kuzey Amerika’da kullanılmaktadır ve dünyanın diğer bölgelerinde Jet A-1 yakıtı kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak Jet B yakıtı ise soğuk hava için geliştirilmiş bir nafta-kerosen yakıtıdır ve soğuk iklimler dışında nadiren kullanılır. Jet B yakıtının dünyada en çok kullanıldığı bölgeler Alaska, Rusya ve Kanada’dır.

2.3 Yakıt Maliyet Yönetimi

Eskiden havayolu işletmeleri yakıt maliyetini kontrol edilemez bir maliyet olarak görebilmekteydiler. Yakıt fiyat artışları ve daha önce belirtilen tüm unsurlar dikkate alındığında yakıt maliyet belirleyicilerinde sağlanan marjinal iyileştirmelerin işletmelere mali açıdan büyük katkı sağlayacağı görülmektedir. Yakıt maliyetini yönetmek için geliştirilen yönetim uygulamaları; operasyonel uygulamalar, hedging (yakıt fiyat riskinden korunma), satın alma uygulamaları ve filo modernizasyonu olmak üzere aşağıda incelenmiştir⁴⁰.

2.3.1 Operasyonel Yakıt Tasarruf Prosedürleri

Uçağın yakıt sarfiyatını azaltmak için pilotların ve havayolu yönetiminin uçağın operasyon el kitabına işlediği birçok prosedür vardır. Bu çalışmanın uygulaması uçuş öncesi yakıt yönetim stratejilerinden olan fazla yakıt taşıma ile ilgili olduğundan Burada sadece uçuş öncesi yakıt prosedürleri verilmiştir. Uçuşun bütün operasyonel safhaları için yakıt tasarruf prosedürü ayrıntılı bilgisi için bakınız⁴¹.

Uçuş öncesi yakıt tasarruf prosedürleri ağırlık merkezinin belirlenmesi, fazla kalkış ağırlıklarının belirlenmesi, uçuş planlama, taksi esnasında yakıt tasarrufu, APU (yardımcı güç ünitesi), fazladan yakıt alma prosedürü ve aerodinamik bozulma olarak incelenmiştir.

2.3.1.1 Ağırlık merkezinin (CG) belirlenmesi

Her uçuş öncesi uçağa alınacak olan yolcu, yüklerin ve yakıtın ağırlıkları yerleşme düzeni de hesaba katılarak uçak ağırlık ve denge ayarlaması bir form doldurularak yapılır. Bu ağırlık ve denge formu sonucu ağırlık merkezinin (CG) yeri belirlenir. Uçağın ağırlık merkezi; uçak üreticileri tarafından uçağın performansı ve atmosferik parametreler hesaba katılarak oluşturulan ağırlık merkezi zarfı sınırları içerisinde olmalıdır. Ağırlık

⁴⁰ Holloway, 2008, a.g.k., 287.

⁴¹ Airbus, 2004, a.g.k., 8.

merkezinin uçağın ön taraflarına kayması kalkış esnasında kuyruk kısmının kalkışını azaltacak, yukarı yunuslama hareketi için daha fazla moment gerektirecektir. Bu durum sürüklenme direncini artırıp yakıt sarfiyatını artıracaktır. Ağırlık merkezini geriye doğru kayması yakıt sarfiyatını azaltacaktır fakat çok fazla geriye kayması uçağın dinamik stabilizesini bozmasına neden olacaktır.

2.3.1.2 Fazla ağırlığın yakıt sarfiyatına etkisi

Ağırlık bilgisi yakıt yakma oranının tahmin edilmesinde kullanılır ve fazladan yakıt almayı engellemek için çok kritiktir. Uçak ne kadar ağır ise yakıt sarfiyatı o derecede fazla olacaktır. Eğer uçak hafif ise optimum seyir uçuş seviyesine ulaşmadan tırmanışta da yakıt tasarrufu yapabilecektir.

Fazla yüklenen uçaklar yalnızca seyir uçuş yakıt sarfiyatını değil aynı zamanda rezerv yakıtını da artırmaktadır. Tablo 2.5'te Uçağın maksimum kalkış ağırlığının %1'i oranında artış yapıldığında 1 ton ve 1000 nm mesafe başına yakıt sarfiyatının ne kadar artacağı gösterilmiştir. Tablo 2.3'te görüldüğü üzere fazladan alınan yük açısından en verimli uçakların A320 serisi olduğu görülmektedir.

Tablo 2.3 Airbus Uçak Tiplerine Göre Fazla Ağırlığın Yakıt Sarfiyatına Etkisi⁴²

Uçak Tipi	Yük Ağırlığı	Ağırlık Artışı	Uçuş Mesafesi	Yakıt Sarfiyat Artışı 1 ton/1000 nm	Bacak Başına Yakıt Sarfiyatı Artışı	Fazladan Alınan Ekstra Yakıt
A300-600	31000 kg	1705 kg	2000 Nm	93 kg	320 kg	100 kg
A310-300	26560 kg	1500 kg	2000 Nm	80 kg	240 kg	90 kg
A318	14650 kg	640 kg	1000 Nm	47 kg	30 kg	30 kg
A319	13000 kg	590 kg	1000 Nm	85 kg	50 kg	40 kg
A320	17200 kg	735 kg	1000 Nm	82 kg	60 kg	45 kg
A321	19100 kg	890 kg	1000 Nm	62 kg	55 kg	50 kg
A330-200	29800 kg	2300 kg	4000 Nm	49 kg	460 kg	100 kg
A330-300	29800 kg	2300 kg	4000 Nm	47 kg	440 kg	100 kg
A340-200	29000 kg	2535 kg	6000 Nm	74 kg	1130 kg	170 kg
A340-300	29000 kg	2535 kg	6000 Nm	87 kg	1330 kg	230 kg
A340-500	35700 kg	3680 kg	6000 Nm	64 kg	1410 kg	210 kg
A340-600	42250 kg	3650 kg	6000 Nm	65 kg	1420 kg	210 kg

Havayolu işletmeleri fazla yük ve/veya yolcu taşıyarak maliyeti azaltmayı hedeflerler, fakat bu yük ve yolcu artırımını kullanılan uçağın kapasitesini aşmamalıdır.

⁴² Airbus, 2004, a.g.k, 12.

Fazla yük taşıma durumunda uzun mesafeden feragat edilebilir. Çünkü uzun mesafe uçulabilmesi, uçağa yük yerine yakıt yüklenilmesini gerektirir. Uçak üreticileri fazla yük taşıyıp daha uzun mesafe yolculuklar yapılabilmesi için Airbus A380, Boeing B747 gibi jumbo jetler üretmişlerdir. Fakat işletmeler bu uçakların kapasitesinin doldurulamaması riskine karşın çok fazla işletme maliyetleri ile karşı karşıya kalmayı da göze almaları gerekebilmektedir.

Aynı tip filo içerisinde yer alan uçakların OEW'lerinde bile farklılıklar görülebilmektedir. Üretilen yeni uçaklarda kullanılan malzemelerin daha hafif olarak seçilmesi ve uçakların kullanıldıkça uçaklarda biriken nem, kir, ekipman güncellemeleri, bakım programları, gereksiz ekipman ve materyallerden dolayı ağırlığı artmaktadır. Havayolu işletmeleri uçağa yüklenen birçok yükü birlikte ağırlık artışının kaçınılmaz olduğu düşünülür. Fakat havayolu şirketleri bu problemlere çok hassas yaklaşmalı; çöp, kir, gereksiz ekipman ve materyal gibi fazlalık ağırlıkları engellemeye çalışmalıdır. 100 kg'lık fazladan bir ağırlık yıllık fazladan 5000 kg yakıt sarfiyatı anlamına gelmektedir⁴³.

Uçakta taşınacak olan ücretli yükü; yolcular, bagajları ve kargo oluşturmaktadır. Yolcu ve bagaj ağırlığının hesaplanmasında FAA veya JAA gibi otoritelerce belirlenmiş standartlar mevcuttur. Fakat daha sağlam hesaplamalar yapabilmek adına şirketler kendi araştırmalarını yapmakta ve yolculara farklı ağırlık şartları sunabilmektedirler. Örneğin; birçok düşük maliyetli havayolu şirketi el bagajının kilosuna sınırlama getirmiş ve bu kurallarını sıkı bir şekilde takip ederek ağırlık artışını engellemeye çalışmaktadırlar.

Uçağa ağırlık yapan bir diğer bileşen de yakıttır. Uçağa alınan yakıtları (1) çalıştırma (start-up) yakıtı, (2) taksi yakıtı, (3) seyir yakıtı, (4) yedek yakıt, (5) tankering yakıtı ve (6) APU yakıtı olmak üzere altı farklı bileşene ayrılabilir. Yakıtın tüm bileşenleri uçuş planlama safhasında bütün performans parametreleri hesaba katılarak hassas olarak hesaplanmalı ve başarılabılır en optimize uçuş yüksekliği ve rotası seçilmelidir.

Lufthansa havayollarında uçak yakıt tüketimi ve ağırlıklarla ilişkisini hesaplayan bir ağırlık müdürlüğü departmanı geliştirilmiştir. Bu birim 30 yıllık şirket verilerini

⁴³ Airbus, 2004, a.g.k, 13.

kullanarak ürettiği verilere göre uzun mesafeli uçuş yapan uçaklarda daha fazla tasarruf yapabildiklerini görmüşlerdir⁴⁴.

2.3.1.3 Uçuş planlama

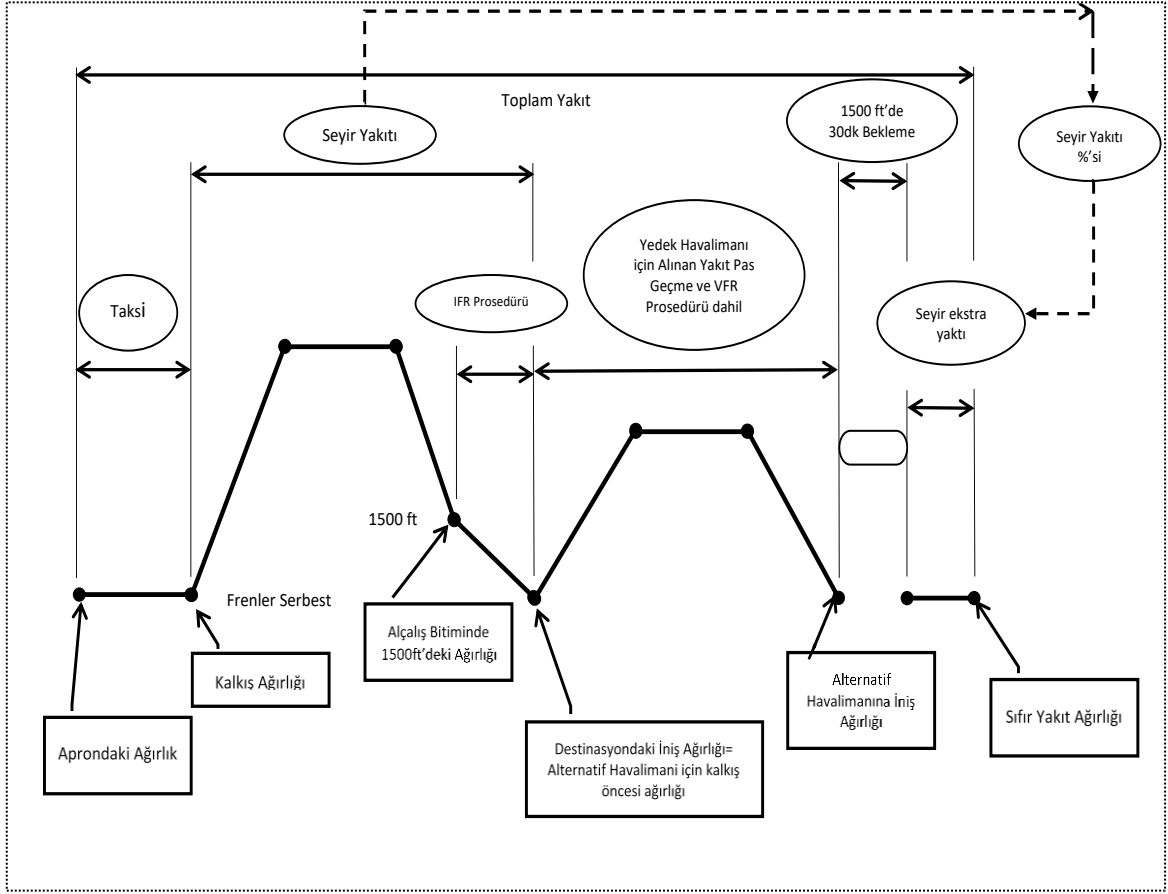
İyi bir uçuş planlama; operatörün ekonomik kıstaslarını karşılayan güzergâh, hız ve irtifasını optimize eden bir rota üretmelidir. Verilen güzergâhın ve irtifa seviyelerinin uçak performansı açısından başarılı olabilir olması; hava trafik kontrolü ve diğer ilgili otorite gerekliliklerini de karşılaması gerekmektedir. Bunun başarılı olabilmesi de kaliteli verilerin (sıcaklık, rüzgar, uçak ağırlığı, yük vb.) ve doğru uçak performans bilgilerinin işlenmesiyle mümkün olabilecektir.

Uçuş planlamanın önemli bir bölümünü yakıt planlaması oluşturur. Uçuşun her safhası düşünülerek bu planlama yapılmaktadır. Havayolu şirketleri uçakların operasyon el kitabında ne kadar yakıt planlaması yapılması gerektiğini belirlemiştir. Şekil 2.10'da havayolu işletmelerinin uçuş planlaması yaparken yakıt miktarlarını belirlemeleri gerektiği uçuş aşamaları aşağıda verilmiştir;

- Operasyon el kitabında taksi için yakıt planlaması yapılırken uçağın taksi yaparken ortalama ne kadar sürede ne kadar yakıt tüketildiği verilmiştir. Örneğin; A319 uçağı taksi sırasında dakikada 10 kg yakıt tükettiği kabul edilir ve planlama buna göre yapılır. Taksi sırasında yakıttan tasarruf etme prosedürleri Bölüm 2.3.1'de verilmiştir.
- Seyir yakıtı kalkıştan destinasyona kadar olan yakıtı içerir ve aşağıdaki unsurları içermektedir;
 - Seçilen hızda kalkış ve tırmanma için ayrılan yakıt,
 - Seçilen hızda seyir uçuş seviyesi için ayrılan yakıt,
 - Seyir uçuştan destinasyon havalimanı üzerinde 1500 ft'e kadar alçalma,
 - Yaklaşma ve inme. (Bu seviyede günümüz ticari yolcu uçakları IFR-Aletli Uçuş Kurallarına uyarak iniş yaparlar)

⁴⁴ Lufthansa AG (2003): Data via Email Rothmann V. Lufthansa, Frankfurt'den aktaran Helms, H., & Lambrecht, U. (2007). The potential contribution of light-weighting to reduce transport energy consumption. Int. J. Life Cycle Assess, 12(1), s. 58-64.

Şekil 2.10 Havayolu Yakıt Prosedürü⁴⁵



Yedek yakıt hesaplamaları ise Avrupa'da EASA (European Union Aviation Safety Agency) tarafından belirlenen kurallara göre yapılmaktadır. Yedek yakıt; beklenmedik durum yakıtını, alternatif havalimanı yakıtını, bekleme yakıtını içermektedir. Beklenmedik durum yakıtı için EU-OPS kurallarına göre alınması gereken miktarlar aşağıdaki gibidir⁴⁶;

- 1) ISA koşullarında destinasyon havalimanı üzerinde 1500ft'de 5 dk beklemek için yeterli yakıt ya da,
- 2) Aşağıdakilerden herhangi birisi alınabilir;
 - Seyir yakıtının %5'i,
 - Yedek havalimanı için alınan yakıtla beraber seyir yakıtının %3'ü,
 - ISA koşullarında destinasyon üzerinde 1500 ft'te 15 dk beklemek için yeterli yakıt,

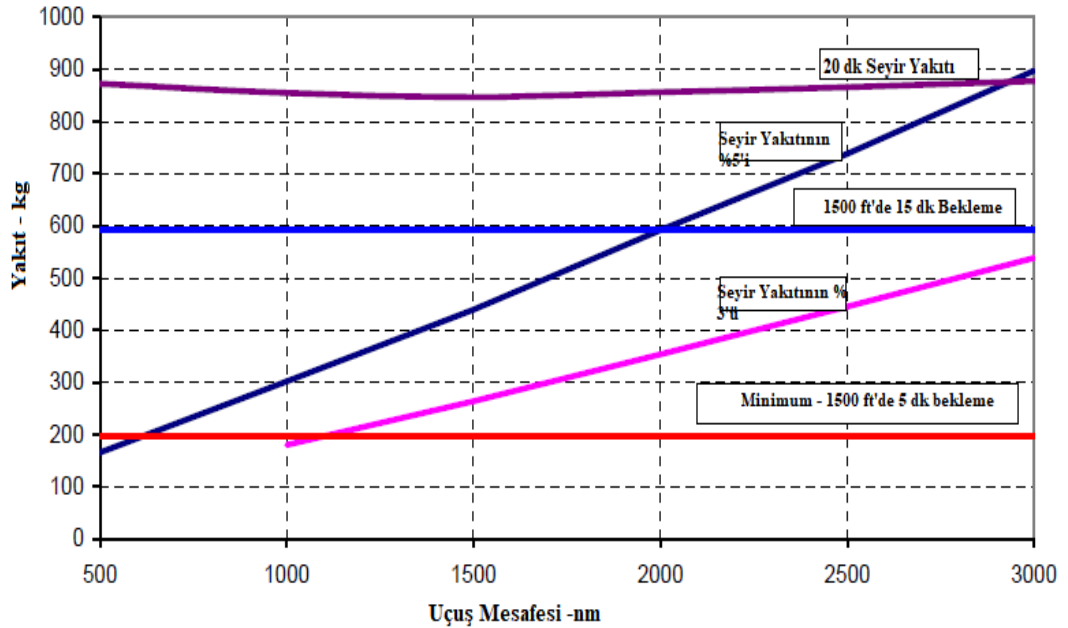
⁴⁵ Training, A. A319/A320/A321 Flight Crew Operating Manual, Operating Limitations. Airbus FCOM, 3, 70.

⁴⁶ European Commission. (2008). Commission Regulation (EC) No 859/2008 of 20 August 2008 amending Council Regulation (EEC) No 3922/91 as regards common technical requirements and administrative procedures applicable to commercial transportation by aeroplane. *Official Journal of European Union*, s. 50.

- Seyir yakıtının üzerine ek 20dk daha uçmayı sağlayacak kadar yeterli yakıt.

İkinci maddenin son üç seçeneği uçabilirlik sertifikası gerektirirken, son iki seçeneği yakıt tüketim miktarı sonuçların gözlemine gerektiren ön koşullu kurallardır. Uçuş mesafesine bağlı olarak uçuş planlamada yukarıda verilen kurallara göre en düşük olan beklenmedik durum yakıtı alınabilir. Şekil 2.11’de beklenmedik durum yakıtının mesafeye göre nasıl değiştiği verilmiştir. 500nm ve daha kısa mesafeler için beklenmedik durum yakıtı destinasyon havalimanı üzerinde beş dakika bekleyecek kadar yakıt olarak belirlenebilir. 1000 nm üzeri mesafelerde destinasyon havalimanına yedek olacak bir havalimanı mevcut ise seyir yakıtının %3’ü kuralı temel alınabilir. Eğer yedek olacak bir havalimanı yok ise azaltmalar 2000 nm üzeri mesafeler için yapılır ve kural olarak destinasyon havalimanının üzerinde on beş dakika bekleme olarak alınabilir⁴⁷.

Şekil 2.11 A320 -214 Uçağı Beklenmedik Durum Yakıtı⁴⁸



Alternatif havalimanı için alınması gereken yakıtı en aza indirebilmek için birden fazla seçenek var ise en yakını seçilerek bu yakıt için alınan miktar azaltılabilmektedir. Bütün bu yakıtlardan farklı olarak yedek yakıt içerisinde geçen ekstra veya kaptan yakıtı olarak da bilinen bir ek yakıt alınabilir. Bu yakıt uçuş planı yapıldıktan sonra kaptanın

⁴⁷ Airbus, 2004, a.g.k, 14.

⁴⁸ Airbus, 2004, a.g.k, 15.

şahsi görüşü ile tecrübelerine dayanarak verdiği karar ile alınır ve hava durumundaki belirsizlik, destinasyon veya yedek havalimanın müsait olamama durumları düşünülerek alınan bir ekstra yakıttır.

2.3.1.4 Taksi

Trafiği yüksek olan büyük havalimanlarında, uçakların piste ulaşmak için kat etmeleri gereken mesafeler uzamakta ve bekleme süreleri artmaktadır. Bu süre hem zaman kaybına neden olmakta hem de yakıt sarfiyatını artırmaktadır.

Taksi sırasında iki motorlu uçaklar için tek motoru kapatmak veya dört motorlu uçaklar için ikisini kapatmak yakıt sarfiyatını azaltabilecektir. Üreticiler taksi sırasında hangi koşullarda motor kapatılabileceğini el kitaplarında belirtmişlerdir. Örneğin; Airbus A319 modeli için iki motorda çalışarak 12 dakika taksi yapması 120kg yakıt sarfiyatı gerçekleştirirken 12 dakikanın 8'ini tek motorlu olarak taksi yaptığında yakıt sarfiyatı 80kg düşecektir⁴⁹.

2.3.1.5 Fazladan yakıt alma (Tankering)

Uçakta ağırlığın önemli bir kısmını oluşturan yakıtı fazla almanın ücretli yükten feragat etmeyi gerektirdiği ve yakıt sarfiyatını artırdığı bilinmektedir. Farklı havalimanlarında uçak yakıt fiyatları arasında çok büyük farklılıklar olabilmektedir. Bu farklılık ülkeler arasında daha fazla olsa da aynı ülke içerisindeki havalimanlarında da çeşitli yakıt fiyatlarıyla karşı karşıya kalılabilmektedir. Havayolu şirketleri bu fiyat farklılığından oluşan durumu yakıt maliyetini azaltmak için yakıtın daha ucuz olduğu havalimanlarından fazla yakıt alarak (tankering) bir sonraki ineceği, yakıt fiyatının fazla olduğu havalimanından daha az veya hiç yakıt almayacak şekilde bir strateji izler ve bu duruma fazladan yakıt taşıma veya tankering denilmektedir.

Havayolu şirketleri iki farklı nedenden ötürü tankering yapmaktadırlar. Birinci neden, yakıt fiyatı fazla olduğundan dolayı daha ucuz yerden fazla yakıt alarak yakıt maliyetini azaltmaktır. İkinci neden ise Jet A1 yakıtının bazı havalimanlarına tedarik edilemeyebilmesidir. Havayolu şirketlerinin bu havalimanlarına giderken dönüş yakıtını da alıp gitmeleri gerekebilmektedir.

⁴⁹ Airbus, 2004, **a.g.k**, 18.

Çalışmanın bu kısmında Airbus şirketinin önermiş olduğu tankering hesaplama prosedürü verilecektir⁵⁰. Tezin uygulama kısmında fazladan yakıt alma için geliştirilen doğrusal olmayan programlama modeli gösterilecek ve Airbus'ın önerdiği değerlerle karşılaştırılacaktır.

Uçağa alınan fazladan yakıt ağırlığı artıracak ve artan ağırlık yakıt sarfiyatını artıracığından ilk olarak başa baş noktasının belirlenmesi gerekmektedir. Aşağıda Airbus şirketinin bu değerlerin nasıl bulunacağı hakkında önerdiği prosedür verilmiştir.

Denklemlerde verilen kısaltmalar aşağıdaki gibidir;

K : Ulaştırma katsayısı,

ΔTOW : Kalkış ağırlığındaki değişim,

ΔLW : İniş ağırlığındaki değişim,

P_d : orijin havalimanındaki yakıt fiyatı

P_a : destinasyon havalimanındaki yakıt fiyatı

C_h : Uçuşun uzamasında taşınan ekstra yakıtın saatlik maliyeti

$$K = \frac{\Delta TOW}{\Delta LW} \quad (2.6)$$

İniş ağırlığındaki bir tonluk artış, kalkış ağırlığının K ton olması anlamına gelecektir. Örneğin $K=1.3$ olarak alırsak kalkış ağırlığı 1300 kg fazla, iniş ağırlığı ise 1000 kg fazla olacaktır. 1 ton yakıtı fazladan taşımanın maliyeti 300 kg yakıt olacaktır.

Kalkışta ekstra yakıt almanın maliyeti;

$$\text{Yakıt Ağırlığı} \times \text{orijin havalimanındaki yakıt fiyatı} = \Delta TOW \times P_d = \Delta LW \times K \times P_d \quad (2.7)$$

Tasarruf edilen miktar;

$$\text{Taşınan Yakıt} \times \text{destinasyon havalimanındaki yakıt fiyatı} = \Delta LW \times P_a \quad (2.8)$$

Olası uçuş süresinin uzamasından kaynaklanan maliyet

$$\text{Uçuş Süresindeki Artış} \times \text{Saatlik Maliyet} = \Delta T \times C_h \quad (2.9)$$

⁵⁰ Airbus, 2004, a.g.k, 19.

Taşınan ekstra yakıtın kârlı olup olmadığını tasarruf edilen miktarın; destinasyon havalimanına taşıdığı yakıtın oradaki fiyat üzerinden maliyeti ve uçuşta kaybedilen zaman maliyeti toplamından büyük olmalıdır;

$$(\Delta LW \times P_a) > (\Delta LW \times K \times P_d) + (\Delta T \times C_h) \quad (2.10)$$

2.10 eşitsizliğini düzenlersek;

$$\Delta LW (P_a - K \times P_d) - (\Delta T \times C_h) > 0 \quad (2.11)$$

Formül 2.11'deki $\Delta T = 0$ olarak kabul edilirse taşınan ekstra yakıtın kârlı olup olmadığı destinasyon havalimanındaki yakıt fiyatının orijin havalimanındaki yakıt fiyatına oranının K ulaştırma katsayısından büyük olması gerekir;

$$\frac{P_a}{P_d} > K \quad (2.12)$$

Ekstra yakıt taşımak fiyat farkları olduğu zaman değerlendirilebilir olup ciddi tasarruflar sağlayabilmektedir. Uçak üreticilerinin havayolu işletmelerine verdiği ve her havayolunun kendi operasyonlarına göre düzenlediği Uçuş Mürettebat Operasyon El Kitabında (FCOM-Flight Crew Operation Manual) ilk kalkış ağırlığı (ekstra yakıt olmadan), uçuş mesafesi, düz uçuş irtifa ve yakıt fiyat oranı verileri bilinerek yardımcı grafikler sayesinde fazladan alınacak optimum yakıt miktarına karar verilebilir. Ekte bu çalışmada uygulanacak olan problemin yakıt tahmini için kullanılacak olan ve tankering miktarına karar vermede baz alınacak olan A319 uçağı FCOM grafik sayfaları Ek 1-6'da verilmiştir.

2.3.1.6 Yardımcı güç ünitesi (APU-Auxiliary Power Unit)

Yardımcı güç ünitesi (APU) uçağın harici elektrik ve havalı güç ünitelerinden bağımsız olarak motor çalıştırmadan yakıtı kullanarak uçak sistemlerinin çalışması için gerekli olan elektrik ve havalandırmayı sağlar. APU'nun yakıt tüketimi motor çalıştırılarak gerçekleştirilen işlere göre düşük olmasına rağmen yakıt tüketimine dikkat edilmesi gerekmektedir.

Uçak yerdeyken APU'nun yakıt sarfiyatı dış hava koşullarına ve yüklenen yükün çeşidine göre değişmektedir. Yerde geçirilecek devir zamanlarının 45 dakikadan az olması durumunda APU'nun kullanılması daha az maliyetli olacaktır. Fakat bu sürenin geçilmesi durumunda veya gece boyunca kalınması durumunda maliyetin azaltılması için

en uygun güç sağlamanın uçak dışından temin edilen yer ekipmanları (Yer Güç Ünitesi – GPU, Yer İklimlendirme Ünitesi, Hava Başlangıç Ünitesi –ASU) tarafından sağlanması olacaktır. Çok kısa süreli devir zamanları için ise APU çalıştırılmadan ve motor kapatmadan gücün sağlanması daha az maliyet getirecektir⁵¹.

2.3.2 Yakıt fiyat riskinden korunma

Yakıt fiyatları geçmişten günümüze ham petrol fiyatlarına bağlı olarak sürekli dalgalanmalar göstermiştir. Havayolu şirketleri yakıt fiyatlarından oluşan risklere karşı kendilerini finansal açıdan koruma altına alma ihtiyacı duymuşlardır ve bu yönde stratejiler geliştirmişlerdir. Havayolu şirketleri yakıt maliyetlerini kontrol altına alabilmek için birkaç finansal enstrüman kullanarak gelecekteki yakıt alım maliyetlerini sabitleyip yakıt fiyatlarının ani yükselmesinden kaynaklanan maliyet artışlarından korunmaya çalışırlar. Diğer bir yandan yakıt alım maliyetlerinin sabitlenmesi yakıt fiyatlarının düştüğü bir zamanda tasarruf etmeyi de önleyecektir. Havayolu işletmelerinin yakıt tedarikçisiyle yaptıkları bu tür finansal anlaşmalara “hedging” adı verilmektedir⁵². Havayolu maliyetleri arasında zaman serileri düşünüldüğünde oynaklığı en fazla olan yakıt maliyetlerini sabitlemek bir anlamda toplam maliyeti ve kârı istikrarlı hale getirmek demektir.

Genelde havayolu şirketleri yakıt maliyetlerinin üçte biri veya ikisini “hedge” ederler. Yapılan bu hedging anlaşmalarının süresini çoğu havayolu işletmeleri altı ay olarak belirler ve birkaçı bir yıldan fazla veya iki yıllık hedging anlaşmaları yaparlar⁵³.

Yakıt fiyat riskinden korunmak için kullanılacak finansal enstrümanlar forward (vadeli işlem) sözleşmeleri, futures (gelecek) sözleşmeleri, satın alma opsiyon sözleşmeleri (call option), yaka sözleşmeleri (collars) ve takas sözleşmeleri (swap) olarak sıralanabilir⁵⁴.

Forward (vadeli işlem) sözleşmeleri genellikle kurumsal ve büyük ölçekli firmalar arasında tezgâh üstü piyasalarda gerçekleşir. Bu anlaşmalarda satıcı taraf üzerinde mutabık kalınan yakıt miktarı ve üzerinde mutabık kalınan bir fiyattan ileri bir vadede;

⁵¹ Airbus, 2004, **a.g.k**, 21.

⁵² A.E. Sarılğan vd. (2016) Havayolu Yönetimi, *Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi Yayını*, s.100

⁵³P. Morrell & W. Swan, (2006). Airline jet fuel hedging: Theory and practice. *Transport Reviews*, 26(6), s. 713.

⁵⁴ B. Tuncer & K. Aydoğan (2019). Yakıt Maliyetlerinin Taşınan Hava Kargo Miktarı Üzerine Etkileri: 2007-2018 Türkiye Örneği. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, s. 146-147.

önceden belirlenmiş bir tarihte teslim edecektir. Forward sözleşmelerindeki risk; taraflardan birisinin üzerine aldığı sorumluluğu yerine getirmemesidir. Sözleşmeleri yapan tarafların büyük kuruluşlar olduğu düşünülürse ödenmeme olasılığının düşük olduğu söylenebilir. Future sözleşmelerinin forward sözleşmelerinden tek farkı; oluşabilecek herhangi bir olumsuz gelişmeye karşı organize piyasalarda bir teminat mekanizmasının bulunmasıdır. Bu nedenle borsada yatırımcılar bireysel olarak yarar sağlayabilmektedir. Buna ek olarak future sözleşmelerde yatırımcılar vade sonunu beklemeden işlem yapabilmektedirler⁵⁵.

Satın alma opsiyon sözleşmeleri (call option) ile yapılan hedging anlaşmalarında yakıtın tedarikçisine belli miktardaki yakıtı bugün mutabık kalınan bir fiyat üzerinden belirli bir vade içerisinde ya da vade sonunda satın alma hakkı veren opsiyonlardır⁵⁶. Bu tür sözleşmelerde alıcı satın alma hakkını kullanıp kullanmamakta özgür olup, tek taraflı satın alma opsiyonu alıcıya aittir. Alıcı satın alma hakkını kullanmak istediğinde satıcı sözleşme ile yükümlü olabilmektedir⁵⁷.

Yaka sözleşmeleri (collars) alıcı ve satıcı opsiyon sözleşmelerinin kombinasyonu şeklinde oluşmuştur. İki taraf aralarında belirli bir dönem geçerli maksimum ve minimum yakıt fiyatları belirler. Bu iki fiyat arasında bir yakıt için ödenecek olan maliyet sabitlenebildiği için havayolu şirketleri arasında popülerdir. Yaka sözleşmeleri spekülasyon riski küçük bir fiyat hareketliliği aralığı ile sınırlar⁵⁸.

Takas sözleşmeleri (swap) havayolu şirketlerinin gelecekteki yakıt ödemelerini bugünkü fiyat üzerinden sabitledikleri vadeli işlem sözleşmeleridir. Örneğin bir havayolu şirketi bugünkü yakıt işlem fiyatı üzerinden belirlenmiş miktarda aylık olarak bir yıllık takas sözleşmeleri yapabilirler. Her ay güncellenen yakıt fiyatı takas fiyatı üzerinden değerlendirilir. Eğer güncel fiyat yükselse satıcı taraf fiyat farkı çarpı yakıt miktarını havayolu şirketine öder fakat güncel fiyat, takas fiyatından düşük ise havayolu şirketi

⁵⁵ Ü. Battal ve S. A. Mühim, (2016). Havayolu Taşımacılığında Yakıt Anlaşmalarında Riskten Korunma Yöntemleri ve Türkiye Uygulaması. *Finans Politik & Ekonomik Yorumlar*, 53(611), s. 49.

⁵⁶ Battal ve Mühim, 2016, **a.g.k.**, 48.

⁵⁷ M. Ü. Memiş ve K. Tüm, (2015). Döviz Cinsinden Alımlarda Döviz Alım Opsiyonları Ve Riskten Korunma Muhasebesi. *Journal of Accounting & Finance*, s. 46.

⁵⁸ Morrell ve Swan, 2006, **a.g.k.**, 716.

oluşan farkı yakıt tedarikçisine öder⁵⁹. Havayollarında yakıt alımlarında en çok kullanılan hedging sözleşmeleri takas sözleşmeleri ve satın alma opsiyon sözleşmeleridir⁶⁰.

Yakıt alımlarında havayolu şirketlerinin izlediği bir diğer strateji ise birlikte toplu yakıt satın alma olarak verilebilir. Bazı havayolu şirketleri bir araya gelerek toplu konsorsiyum oluştur ve yakıt alımları yaparlar. Böylece pazarlık güçlerini artırmış olurlar. Bir araya gelen havayolu şirketleri küresel havayolu ittifak olmak zorunda değildir⁶¹.

Carter, Rogers ve Simkins (2006) yapılan hedging sözleşmelerinin havayolu şirketlerine finansal açıdan değer katkısını ölçmek üzere 1992-2003 yılları arasındaki Amerika Birleşik Devletleri havayolu sektör verileri üzerinde çalışmışlardır. Genel olarak yüksek yakıt maliyetleri düşük nakit akışı anlamına geldiğinden havayolu sektör yatırım fırsatları ile jet yakıt maliyetleri arasında pozitif ilişki olduğu varlığından söz edilebileceğini savunmuşlardır. Jet yakıt fiyatlarının hedge edilebilir olduğu kabul edilirse, havayolu şirketleri gelecekteki yakıt alımlarında riskten korunmuş olur ve aynı zamanda şirketleri nakit akışlarını yönetmede önemli kaynak çeşitlilikleri elde etmiş olacaklardır. Çalışmaya göre jet yakıt alımlarında hedging anlaşmaları ile riskten korunmaya çalışan havayolu şirketlerinin değerini artırdığı görülmektedir⁶².

Lim ve Hong (2014) havayolu şirketlerinin yaptığı hedging faaliyetlerinin gerçekleştirdikleri operasyonel maliyetlere etkisini araştırmışlardır. 2000-2012 yılları arası havayolu verilerini incelemişler ve hedging faaliyetlerinin havayolu operasyon maliyetlerini % 9-12 arasında düşürdüğünü tespit etmişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre, incelenen verilerde hedging sözleşmesi yapan havayolu şirketleri ile yapmayan şirketler arasında yakıt fiyatlarındaki dalgalanmalara karşı operasyonel maliyetler açısından neredeyse aynı derecede duyarlı olduklarını görmüşlerdir. Amerika havayolu şirketinin

⁵⁹ Morrell ve Swan, 2006, **a.g.k.**, 716.

⁶⁰ A. Osipovich, (2012). Airline Hedging Falling Short of Best Practices. *Energy Risk*'den aktaran Battal, Ü., ve Mühim, S. A. (2016). Havayolu Taşımacılığında Yakıt Anlaşmalarında Riskten Korunma Yöntemleri ve Türkiye Uygulaması. *Finans Politik & Ekonomik Yorumlar*, 53(611), s. 46.

⁶¹ Holloway, 2008, **a.g.k.**,288.

⁶² D. A. Carter, D. A. Rogers & B. J. Simkins, (2006). Does hedging affect firm value? Evidence from the US airline industry. *Financial management*, 35(1), s. 53-86.

hedging sözleşmesi olup olmadığına bakılmaksızın çıktıyı azaltmadan operasyon maliyetlerini ortalama % 12-14 arasında düşürülebileneğini savunmuşlardır⁶³.

Havayolu şirketlerinin yakıt fiyatında oluşan dalgalanmadaki riski azaltmak için uyguladığı diğer bir yöntemde yolculardan yakıt ilave ücreti almasıdır. Yakıt ilave ücreti yolculardan ilk olarak 2004 yılında alınmaya başlanmış ve düşük bütçeli havayolu şirketleri de dâhil birçok büyük hava yolu şirketinde uygulaması artarak devam etmiştir. Yakıt fiyatları yükseldikçe yakıt ilave ücretinin kapsam ve ölçeği değişebilmektedir. Yapılan analizlere göre hükmi yakıt maliyetlerinin %50'si yakıt ilave ücretlerinden karşılanmaktadır⁶⁴.

2.3.3 Filo modernizasyonu

Uçakların yaşları arttıkça uçulan saatleri de artacaktır. Eski uçakların kullanımdan ötürü üzerlerinde biriken kirden, yalıtımında biriken nemden ve buna benzer birçok durumdan kaynaklanan ek ağırlıklar oluşur. Ağırlaşan uçaklardaki yakıt sarfiyatı normalden daha fazla olacaktır. Uçakların kullanıldıkça yakıt sarfiyatını artıran bir diğer durum ise uçağın aerodinamik yapısında meydana gelen bozulmalardır. Bu durumlara örnek olarak hareketli yüzeylerin hareketlerini tamamlayamama, kontrol yüzeylerindeki hasarlı contalar, kuş çarpması veya yerdeki hareket eden araçlardan sıçrayan nesnelere, uyumsuz kapılar ve kapılar arasındaki aşırı boşlukların hepsi uçağın sürüklenmesini artıracak ve bu durum ise yakıt sarfiyatının artmasına neden olacaktır.

Havayolu işletmeleri uzun dönem filo planlamaları yaparken veya uçak kiralamalarında fabrikadan alınan verilerden ziyade uçuş kayıt istatistiklerine bakarak yakıt yakma oran tahmini yapmalı ve bu yönde filo planlamalarına gitmelidir.

Park ve O'Kelly (2018) Amerika'da gerçekleştirilen uçuşların verilerini maliyet etkinliği açısından değerlendirmiş ve 22 uçak tipini incelemiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre havayolu filosunun maliyet verimliliği açısından çalışıldığında uçak karmasının dar gövde ve geniş gövdeli uçaklardan oluşması gerektiği üzerinde durmuştur. Özellikle uzun mesafeli uçuşlarda (2000nm üzeri mesafelerde) geniş gövdeli uçakların kullanılması, kısa

⁶³ S. H. Lim & Y. Hong, (2014). Fuel hedging and airline operating costs. *Journal of air transport management*, 36, s. 33-40.

⁶⁴ Air Transport Department Cranfield University, (2008). *Fuel and Air Transport*; European Commission, s. 1.

mesafeli uçuşlarda ise dar gövdeli uçakların kullanılmasının maliyet açısından daha verimli olacağı değerlendirilmiştir⁶⁵.

⁶⁵ Y. Park & M. E. O'Kelly, (2018). Examination of cost-efficient aircraft fleets using empirical operation data in US aviation markets. *Journal of Air Transport Management*, 69, 224-234.

3. HAVAYOLU FAZLADAN YAKIT ALMA (TANKERING) STRATEJİSİNİN DOĞRUSAL OLMAYAN PROGRAMLAMA İLE MODELLENMESİ VE BİR UYGULAMA

Fazladan yakıt taşıma ile ilgili literatürde Türkiye’de ve Dünya’da çok fazla çalışmanın yapılmadığı görülmüştür. 1973’teki petrol krizinden sonra artan ham petrol fiyatları havayolu şirketlerine yakıt maliyetlerinin iki katına çıkması olarak yansımıştır. Bu nedenle havayolu şirketleri yakıt yönetim stratejileri geliştirmek durumunda kalmışlardır. Yakıt yönetim stratejisi olarak fazladan yakıt almayı literatürde ilk olarak Darnell ve Loffin (1977) National Havayolları’nın yakıt yönetim stratejisini ele alarak yakıt maliyetini eniyilemeye çalışmışlardır. Kullandıkları doğrusal programlama modeli alınacak yakıt miktarını, hangi duraktan ve satıcıdan alınacağını belirleyebilmek adına yakıt fiyatlarını, yakıt mevcudiyetini, yakıt yakma oranını, uçuş verilerini ve fazladan yakıt alma maliyetini esas alarak geliştirmişlerdir. National Havayolları geliştirilen yakıt yönetim stratejisi sayesinde multi-milyon dolarlar tasarruf edebilmiştir. Yazarlar sonuç kısmında, “gerçekleştirilen tarifeli operasyonlarda düzensiz tedarik değişiklikleri devam etse de yakıt fiyatlarındaki artışın etkisi sistem boyunca minimize edilebilecektir” çıkarımında bulunmuşlardır⁶⁶.

Stroup ve Wollmer (1992) fazladan yakıt taşıma ile yakıt maliyetini minimize eden bir doğrusal programlama modeli üzerinde çalışmışlardır. Önerdikleri yakıt yönetim modelinde havayolu şirketlerinin uçuş programlarını yakıt fiyatları, durak kısıtları ve tedarikçi kısıtlarını temel almışlardır. Problemi, havayolunun tek uçuşunu ve tüm ağı ele alarak çözmeye çalışmışlardır. McDonnell Douglas uçak şirketi önerilen modelle geliştirilen yakıt yönetim politikasını çeşitli uçak tiplerinin olası karlılık tahminlerini yapmada kullanmışlardır. Modelin uygulanması sonucunda yakıt maliyetlerinin %5-6’ya kadar düşürülebileceği sonucuna ulaşmışlardır⁶⁷.

Abdelghany, Abdelghany ve Raina (2005) yakıt maliyetini düşürebilmek için yakıt fiyatlarının ucuz olduğu havalimanlarından fazla yakıt alarak maliyeti düşürmeyi amaçlayan doğrusal olmayan bir model geliştirmişlerdir. Modeli çözmek için GRG2 algoritmasını kullanmışlardır. Modelde amaç fonksiyonu sefer bazlı düşünülmeyp ağı

⁶⁶ D. W. Darnell & C. Loffin, (1977). National airlines fuel management and allocation model. *Interfaces*, 7(2), s. 1-16.

⁶⁷ J. S. Stroup & R. D. Wollmer, (1992). A fuel management model for the airline industry. *Operations Research*, 40(2), s. 229-237.

genel olarak ele alarak; alınan yakıtın maliyeti, uçağın yakıt almadan önce yakıt tankında kalan yakıtın maliyeti ve fazla yakıt taşınması sebebiyle artan ağırlıktan doğan bakım maliyetini eklemiştir. Model üç farklı senaryo üzerine kurulmuştur. İlk senaryoda yolcu uçağı indiğı her havalimanından operasyon gereklilikleri haricinde fazladan yakıt almamıştır. İkinci senaryoda uçak sadece orijin havalimanından fazladan yakıt almıştır. Son senaryoda ise model, uçağın her gittiğı havalimanından fazladan yakıt alabilmesine imkân vermiştir. Geliştirilen model için beş farklı deney uygulamışlardır. İlk olarak uçuş ağında ziyaret ettiği havalimanlarındaki yakıt fiyatlarının üç farklı şekilde olduğu varsayılmıştır. İkinci deneyinde uçuş mesafesi 400 mil olarak almışlar ve uçağın farklı yakıt sarfiyat oranlarının fazladan yakıt almaya etkisini araştırmışlardır. Üçüncü deneyde; fazladan yakıt taşınmanın etkisini sınamak için bu oranı %5, %10 ve %15 olarak uçuş mesafesini ise sabit 400 mil kabul ederek modeli çalıştırmışlardır. Dördüncü deneyde fazladan taşınan yakıt miktarı ile artan ağırlığın bakım maliyetine etkisini araştırmışlardır. Modele uyguladıkları son deneyde ise üç farklı uçuş mesafesi 200 nm, 400 nm ve 600 nm olacak şekilde belirleyip uçuş mesafesinin fazladan taşımaya etkisini araştırmışlardır. Modellerin çözümünü Excel kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Araştırmanın sonunda düşük yakma oranına sahip verimli uçaklarla fazladan yakıt taşımının daha verimli olduğu, kısa mesafeli uçuşlarda fazladan yakıt taşıma ile tasarruf sağlanabileceğı ve yüksek bakım maliyetlerinin fazladan yakıt taşımayı kısıtlayabileceğı sonuçlarına ulaşmışlardır.⁶⁸

Fregnani, Müller ve Correia (2013) Brezilya’da iç hat uçuş ağını temel alarak fazladan yakıt alma miktarını doğrusal programlama modeli ile eniyilemeye çalışmışlardır. Modelde amaç fonksiyonunu toplam alınan yakıt maliyetini en küçüklemek üzere yazmışlardır. Uygulamada bölgesel olarak kullanılan bir uçak tipi ele alınmış ve bir noktadan kalkan uçak 12 farklı havalimanına uğrayarak orijin havalimanına geri dönmüştür. Modelin veri girdileri uçağın tasarlanan rotalarda fazladan yakıt almadan tüketiceğı yakıt miktarını belirlemek için uçak operasyon el kitabından faydalanmışlardır. Önerdikleri model ile toplam yakıt maliyetinde %5 tasarruf sağlanmış fakat yakıt sarfiyatının %1 arttığı gözlemlenmiştir⁶⁹.

⁶⁸ K. Abdelghany, A. Abdelghany & S. Raina, (2005). A model for the airlines’ fuel management strategies. *Journal of Air Transport Management*, 11(4), s. 199-206.

⁶⁹ J. A. T. Guerreiro Fregnani, C. Müller & A. R. Correia, (2013). A fuel tankering model applied to a domestic airline network. *Journal of Advanced Transportation*, 47(4), s. 386-398.

Hubert vd. (2015) Amerika Hava Kuvvetleri'nin hava operasyonlarında fazladan yakıt alma stratejisinin kullanmalarının analizini yapmışlardır. Amerikan Hava Kuvvetleri'nin geçmiş verileri kullanılarak savaş ve barış zamanı için gelecekte yakıt maliyetlerinden fazladan yakıt alma ile ne kadar tasarruf edebileceklerini araştırmışlardır. Çalışmalarının sonuçlarına göre en çok tasarruf yapılan uçak modelleri C-5, C-17 ve C-130 olmuştur. Uçağa fazladan yakıt almak için eklenen yakıt tankları ile fazladan yakıt alma kapasitesinin arttığı ve yakıt maliyeti tasarrufunun %460'a kadar artabildiğini belirtmişlerdir. Son olarak, fazladan yakıt alma ile gerçekleştirilen yakıt tasarruflarının uygulanan senaryoya bağlı olarak değiştiğini söylemişlerdir⁷⁰.

Deo, Silvestre ve Morales (2020) fazladan yakıt alma stratejisi üzerine havayolunun belirlediği maliyet katsayısı (cost index) ve isteğe bağlı ara yakıt alma duraklarını hesaba katarak çalışmışlardır. Fazladan yakıt alma problemini çözmek için tam sayılı doğrusal programlamayı temel almış havayolu ağ yapısına uygulamışlardır. Uçak maliyet endeksine göre görev performans analizi yapabilmek amacıyla iki yaklaşım kullanmışlardır. Bunlardan ilkinde uçuşun bütün safhaları (tırmanış, seyir uçuşu, alçalış) ele alınarak fazladan yakıt miktarı eniyilemeye çalışmışlardır fakat kurulan bu model her uçuş bacağı öncesi yapıldığından zaman kaybı olarak görmüşlerdir. Diğer yaklaşımda ise Breguet denklemini temel alan daha basit bir fazladan yakıt alma problem modeli geliştirmişler ve daha hızlı sonuç elde edebilme avantajını yakalamışlardır. Bu iki modelin çok katmanlı uçuş ağı üzerine karşılaştırılması sonucu kurulan basit modelin geçerliliğini göstermişlerdir. Uçuş maliyet katsayısını ve ara yakıt alma duraklarını kullanarak fazladan yakıt alma miktarının belirlemenin faydalarını göstermek için farklı yakıt fiyatlarına sahip on altı havalimanı ve on yedi farklı ara yakıt alma duraklarını içeren bir ağ üzerinde vaka çalışması uygulamışlardır. Çalışmanın sonuçlarına göre çok katmanlı uçuş ağı içerisinde optimize edilmiş uçuş rotalarına fazladan yakıt taşıma stratejisi uygulandığında geleneksel yöntemlere göre %3'lük bir maliyet düşüşü gözlemlenmiştir. Uzun mesafeli uçuşlarda kargo veya yolcu taşıyan uçaklar için yakıt maliyetini azaltmada ara bir yakıt alma durağı ile maliyetin azaltılabileceğini savunmuşlardır⁷¹.

⁷⁰T. Hubert vd., (2015). *Tankering Fuel on US Air Force Transport Aircraft: An Assessment of Cost Savings (No. RR-837-AF)*. Rand Project Air Force Santa Monica Ca.

⁷¹ V. A. Deo, F. J. Silvestre & M. Morales, (2020). The Benefits Of Tankering Considering Cost Index Flying And Optional Refuelling Stops. *Journal of Air Transport Management*, 82, 101726.

3.1 Araştırma Problemi

Hava yakıt fiyatlarının farklı merkezlerde farklı fiyatları olması, havayolu şirketlerinin maliyetlerinde en büyük payı olan yakıt maliyetinin azaltılması açısından bir fırsat olarak görülmüştür. Yakıt maliyetlerini marjinal açıdan kontrol altına almak ve tasarruf edebilmek adına yakıtın ucuz olduğu yerden fazladan yakıt alarak maliyetin azaltılmasını ele alan bir yakıt yönetim problemi çözülmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada yakıt fiyatlarının farklılık gösterdiği havalimanlarına sefer düzenleyen havayolu şirketleri için uçağın performans ve kapasite yeterlilikleri elverdiği ölçüde eniyelenmiş fazladan yakıt taşıma miktarını belirleyebilmek için yakıt maliyetini en küçükmeyi amaçlayan bir doğrusal olmayan programlama modeli geliştirilmiştir. Önerilen modeli çözmek için Genel İndirgenmiş Gradyan Metodu (Generalized Reduced Gradient – GRG) kullanılarak MS Excel Çözücüsü ile bir uygulama gerçekleştirilmiştir.

Bu araştırmada ilk olarak farklı jet yakıt fiyatları, farklı uçuş mesafeleri ve farklı seyir irtifa seviyeleri seçilerek modele uygulanmış ve fazladan yakıt taşıma ile tasarruf miktarları parametrik olarak test edilmeye çalışılmıştır. Araştırmanın diğer uygulaması için İstanbul merkez olarak kabul edilmiş ve 14.02.2020 tarihinde hava yakıt fiyatının İstanbul'dan fazla olduğu Bratislava, Floransa, Atina, Sofya ve Bağdat şehirlerine; hava yakıt fiyatının daha düşük olduğu Tahran ve Trablusgarp şehirlerine seferler düzenlendiği kabul edilecektir. Doluluk oranı, uçuş irtifası, uçak tipi, uçuş ağ yapısı, uçuş emniyet ve ilgili ulusal-uluslararası kanun ve yönetmeliklerle belirlenen limitler modele dâhil edilmeye çalışılarak araştırma problemi uygulaması ve sonuçları gösterilecektir.

3.2 Araştırmanın Amacı ve Önemi

Türkiye'de sivil havacılık 1983 yılında yürürlüğe giren 2920 sayılı Türk Sivil Havacılık Kanunu⁷² ile özel işletmeler kurularak havacılık faaliyetleri gerçekleştirmelerine olanak sağlanmış ve Türkiye'de sivil havacılık sektöründe kısmen liberalleşme ve serbestleşmeyi getirmiştir⁷³. 2000'li yıllara kadar birçok özel havayolu şirketi kurulmuş fakat iç hatlarda tarife almalarının kısıtlandırılması ve neredeyse tam anlamıyla devlet yönetiminde olan Türk Hava Yollarının tekeline verilmesi neticesinde Türkiye'de sivil havacılık ticari taşımacılık faaliyetleri çok fazla gelişmemiştir. 2000'li

⁷² 2920 Sayılı Türk Sivil Havacılık Kanunu, RG. 19/10/1983, Sayı: 18196.

⁷³ E. Gerede & G. Orhan, (2015). Türk havayolu taşımacılığında ekonomik düzenlemelerin gelişim süreci. E. Gerede (Ed.) içinde (s. 169-170). *Havayolu taşımacılığı ve ekonomik düzenlemeler teori ve Türkiye uygulaması*, Ankara: Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü Yayınları.

yıllardan önce halkın gelir seviyesinin düşük olması ve bilet fiyatlarının yüksek olması, rekabet ortamının sağlanamaması gibi nedenlerle sivil havacılık sektörünün gelişimi çok yavaş olmuştur. 2003 yılının Ekim ayında özel havayolu şirketlerinin iç pazara girmesini engelleyen 1996 yılı SHGM kararları kaldırılarak iç pazarda rekabet ortamı sağlanmıştır. Yapılan düzenlemelerle havaalanı kullanım ücretlerinin azaltılması, ek vergilerin bir kısmında indirimine gidilmesi veya kaldırılması, havayolu kurmak isteyen şirketlere teşviklerin verilmesi ile pazarın havayolu işletmeleri için cazip hale getirilmesi amaçlanmıştır⁷⁴. 2003 yılından sonra gerçekleşen gelişmeler ile THY'nin hisselerinin %50'den fazlası halka arz edilmiştir⁷⁵. Özelleştirme çalışmaları havalimanları için de gerçekleşmiş birçok havalimanı yap-işlet-devret modeli ile ülkemize kazandırılmıştır. Bütün bu gelişmeler Türkiye'yi sivil havacılık sektöründe önemli bir noktaya ulaştırmıştır.

Havayolu sektörünün Türkiye'de gelişmesi için verilen desteklerden birisi de uçaklarda kullanılan yakıtlar için olmuştur. 2011 yılında bakanlar kurulunda alınan karar ile hava yakıtları için kullanılan Özel Tüketim Vergisi (ÖTV) sıfır olarak uygulanmaktadır⁷⁶. Hava yakıtlarının vergilendirmesi ile ilgili bir diğer kanunda ise Gümrük kanununda hava araçlarının dış seferlerde kullanacakları yakıt ve yağlar ithalat vergisinden muaf tutulmuştur⁷⁷. Devletin bu ve bunlar gibi hava yakıtı teşvikleri ile sivil havacılığa destek vermesi, çok az petrol kaynağı olmasına rağmen hava yakıt fiyatlarını Türkiye'de diğer birçok ülkeden daha hesaplı olmasını sağlamıştır. Hava yakıt fiyatları kimi ülkelerde Türkiye'de olduğu gibi teşviklerle veya petrolün hammadde kaynağı olarak üretilmesinden dolayı daha hesaplı olabilmektedir.

Dünyada birçok havayolu şirketi çeşitli ülkelerde ve bölgelerde oluşan yakıt fiyatı farklılıklarını fırsat olarak değerlendirip, fazladan yakıt taşıyarak yakıt maliyetlerini azaltmayı başarmışlardır. EUROCONTROL'un (Avrupa Hava Seyrüsefer Emniyeti Teşkilatı) yaptığı çalışmaya göre ECAC (Avrupa Sivil Havacılık Konferansı) dâhilindeki ülkelerde yapılan yıllık 10 milyon uçuşun 2.1 milyonda fazladan yakıt taşındığı tahmin edilmiş; 1.6 milyon uçuş genelin %16.5'i tam fazladan yakıt taşıma ve 0.45 milyon uçuş

⁷⁴ Gerede & Orhan, 2015, **a.g.k.**,186-187.

⁷⁵ Gerede, E. (2010). The Evolution of Turkish Air Transport Industry: Significant Developments and the Impacts of 1983 Liberalization. *Journal of Management & Economics*, 17(2), s. 75.

⁷⁶ 1435 Sayılı Bakanlar Kurulu Kararı, RG. 25/02/2011. Sayı: 27857, md. 1.

⁷⁷ 4458 sayılı Gümrük Kanunu 176. maddesi.

kısmi fazladan yakıt taşıma ile yakıt yönetim stratejisi uyguladığı tahmin edilmiştir. Sonuç olarak fazladan yakıt taşıma ile yakıt sarfiyatı uçuş başına 136 kg artarken, ortalama her uçuş başına maliyetten 126 € tasarruf edildiği görülmüştür⁷⁸.

Avrupa ülkelerinde havaya salınan karbondioksit miktarını azaltmak amacıyla havayolu şirketleri vergilendirilmektedir. Avrupa’da taşınan fazladan yakıt sarfiyatı doğal olarak karbondioksit salınımını artırmakta ve bu nedenle yakıt maliyetinden tasarruf etmek için fazladan yakıt taşımak isteyen havayolu şirketleri karbondioksit salınımdan meydana gelen ek vergileri de hesaba katmak durumundadırlar. Avrupa’da her uçuş başına fazladan yakıt taşıma nedeniyle ek olarak 428 kg karbondioksit üretildiği tahmin edilmiştir⁷⁹.

Havayolu şirketleri uçuş operasyonlarını uçağa gereksiz ağırlık almayı engellemeye çalışırlar çünkü önceki bölümlerde; yakıt maliyet belirleyicileri alt başlığında, uçağın ağırlığı kısmında açıklandığı üzere alınan her birim ağırlık, yakıt sarfiyatını artıracaktır. Fakat uygulamada havalimanlarındaki yakıt farklılıklarının fazla olduğu durumları fırsata çevirip fazla yakıt taşınarak maliyet azaltılabilmektedir. Uçağa alınacak fazla yakıt miktarını etkileyen unsurları uçağın yakıt sarfiyat performansı belirleyecektir. Bu unsurlar uçağın yapısal özellikleri, hava koşulları, uçağın yaşı, düz uçuş irtifası gibi durumlar olarak kabul edilebilir. Bunların yanı sıra havayolu şirketi, kârını artırabilmek için yolcu ve kargo gibi ücretli yüklerle doluluk oranını artırmak isteyecektir. Doluluk oranının yüksek olduğu seferlerde, uçağın kapasitesi el verdiği ölçüde atıl kalan kapasite fazladan yakıt olarak değerlendirilebilmektedir.

Uçak üreticileri uçuş operasyon el kitabında fazladan yakıt miktarının ne kadar alınacağını belirlemek amacıyla yakıt fiyatlarına dayanan tablolar ve hesaplamalar geliştirmişlerdir. Fakat günümüz uçakları için bu tablolar ve hesaplamalar nadiren kullanılmaktadır. Havayolu şirketi operasyon el kitaplarında taşınacak olan fazladan yakıt taşıma miktarının uçuş planlamada belirlenen olarak temel alınması gerektiğini, şirketin uçuş ekibine ilettiği notlarda yakıt fiyat farkının fazla olması durumunda fazladan yakıtın bekleme yakıtı olarak düşünülebileceğini, varılacak merkezde uygun yakıt bulunamaması durumunda fazladan yakıt alınması gerektiğini belirtmektedir.

⁷⁸ EUROCONTROL. (2019). Fuel Tankering: Economic Benefits And Environmental Impact. *Aviation Intelligence Unit - Think Paper*, s. 5.

⁷⁹ EUROCONTROL, 2019, **a.g.k.**, 5.

Havayolu şirketleri uçuş planlamalarını yapmak için kendi uçuş planlama sistemlerini geliştirmekte ya da dış kaynaktan temin edebilmektedirler. Havayolu şirketinin dış kaynak kullanmasını etkileyen unsurlarını şirketin güncel ekonomik durumu, şirketin mülkiyeti, sermaye durumu, yaşı, servis seviyesi olarak özetlenebilir⁸⁰. Yeni kurulan havayolu şirketlerinde uçuş planlama sisteminin dışardan temin edilmesi daha çok görülmektedir. Fazladan yakıt miktarı; uçuş planlama yazılımları içerisindeki algoritmalar tarafından belirlenmekte ve hangi tür eniyileme tekniklerinin kullanıldığı hakkında bilgi edinilememiştir.

Türkiye’de havayolu ulaştırma sektörünün teşviki ile hava yakıt maliyetlerinin artmasını engelleyen vergi düzenlemelerin mevcut olması ve hava araçlarının ürettiği karbondioksit için bir vergilendirme bulunmaması; Türkiye’ye sefer düzenleyen veya Türkiye’den farklı bir merkeze sefer düzenleyecek olan havayolu şirketlerinin yakıt maliyetlerinden tasarruf edebilmesi adına fazladan yakıt taşıma yakıt yönetim stratejisini uygulaması için uygun bir ortam hazırlamıştır. Yapılan bu araştırma havayolu şirketlerinin yakıt maliyetini düşürmede izleyebileceği stratejileri göstermekte ve kendi uçuş planlama sistemlerinin fazladan yakıt taşıma kısmını geliştirebilmesini teşvik edebilecek bir model sunmayı amaçlamaktadır.

3.3 Araştırmanın Varsayımları

Araştırmanın uygulaması için A319 tipi yolcu uçağı temel alınmıştır. Modelde yakıt sarfiyat tahminleri için Ek.1 de verilen A319/320/321 Uçuş Mürettebat El Kitabı (FCOM) uçuş planlama bölümü kullanılmıştır. İlk olarak, uçulan havalimanlarının deniz seviyesinde ve hava sıcaklığının standart atmosfer (ISA) koşullarında olduğu yani deniz seviyesinde 15°C olduğu ve rüzgâr hızının 0 kt olduğu varsayılmıştır. Yedek havalimanına olan uzaklıklar 100nm olarak alınmış ve yedek havalimanına giderken kullanılan düz uçuş seviyesinin 1500ft. olduğu kabul edilmiştir. Normalde seyir uçuşu sırasında uçuş irtifa seviyeleri değişebilmektedir. Fakat bu çalışmada yeknesaklık sağlaması açısından düz uçuş irtifasına çıktıktan sonra uçağın yüksekliğini değiştirmeden varış noktasına gittiği varsayılmış ve FCOM’da yakıt tahmini hesaplamaları buna göre yapılmıştır. FCOM’un yakıt tahminleri için varsaydığı koşullar aşağıda verilmiştir;

⁸⁰ S. M. Rutner & J. H. Brown (1999). Outsourcing as an airline strategy. *Journal of Air Transportation World Wide*. 4(2). s. 26.

- Kalkış için yapılan yakıt tahminleri uçağın fren bıraktığı andan itibaren hızının sırasıyla 250kt/300kt/M.78⁸¹ olarak arttığı kabul edilmiştir.
- Seyir uçuşu için yapılan yakıt tahminlerinde uçağın M.78 hızında gittiği, ağırlık merkezinin kanatların aerodinamik merkezine olan uzaklığının %33, hava sıcaklığının ISA, klimaların normal çalıştığı, anti-ice sisteminin kapalı olduğu ve seyir uçuşu için en yüksek itme gücü uygulandığı varsayılmıştır.
- İniş sırasında uçağın hızının sırasıyla M.78/300kt/250kt olduğu varsayılmıştır.
- Yedek havalimanı için yapılan yakıt tahminleri için kalkış hızının sırasıyla 250kt/300kt/M.78 ve iniş uçuş hızının sırasıyla M.78/300kt/250kt olduğu, ağırlık merkezinin kanatların aerodinamik merkezine olan uzaklığının %33, hava sıcaklığının ISA, klimaların normal çalıştığı ve anti-ice sisteminin kapalı olduğu varsayılmıştır.
- Bekleme için yapılan yakıt tahminlerinde yeşil nokta hızında ve temiz konfigürasyonda (flaplar ve iniş takımları toplanmış pozisyonda) olduğu kabul edilmiştir. Yeşil nokta hızı bütün motorlar çalışırken en iyi kaldırma ve direnç oranını verir⁸². Beklemede aynı zamanda ağırlık merkezinin kanatların aerodinamik merkezine olan uzaklığının %33, klimaların normal çalıştığı ve anti-ice sisteminin kapalı olduğu varsayılmıştır. Bekleme için ayrılan yakıt ICAO'nun uçak operasyonları ek 6, 4.3.6.3 maddesi e bendinde yedek havalimanı üzerinde 1500ft yükseklikte 30 dakika bekleyecek kadar planlanır.⁸³
- Seyir sırasında planlanan rotadan sapma ihtimaline yönelik beklenmedik durum yakıtı Ek 6 standartlarına göre seyir yakıtının %5'i olarak alınmıştır⁸⁴.

⁸¹ M kısaltması Mach sayısının kısaltmasıdır ve hareket halindeki bir kütlelin hızının, kütlelin bulunduğu şartlardaki ses hızına oranıdır. M=1 olduğunda uçağın hızı ses hızına eşit olur. M.78 ise ses hızının %78'i anlamına gelmektedir.

⁸² Airbus. (2016) Safety First, *The Airbus Safety Magazine*.21 s. 9.

⁸³ICAO. (2018). *Annex 6–Operation of aircraft. Part I–International Commercial Air Transport–Aeroplanes*, 11. Baskı, Montreal, s. 4-12.

⁸⁴ ICAO, 2018, **a.g.k.**, s. 4-11.

- Uçakların taksi manevraları için ortalama 12 dakika süre harcadığı varsayılmıştır. Taksi sırasında ise uçağın dakikada 10kg yakıt tükettiği verilmiştir.
- Uçak yerde APU çalışırken yakıt tüketiminin saatte 130kg olacağı belirtilmiştir. A319 uçağının yerde geçirdiği süre yaklaşık 100 dakika olarak verilmiştir.⁸⁵ Ele alınacak olan çalışmada uçakların havalimanında 1 saat APU çalıştırdıkları varsayılmıştır.

Uygulamada Airbus şirketinin ürettiği A319 tipi uçak kullanılmıştır. A320 ailesine mensuptur ve A320 ve A321 tipleriyle benzer özellikler göstermektedir. 1988'den bu yana kullanılan en çok kullanılan ikinci yolcu uçağı olan A320 ailesinin üyesi olan A319'un bu çalışmada kullanılan modelinin özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir. Operasyonel boş ağırlığını bulmak için uçak işletmecisinin operasyon için uçağa eklediği, koltuk, kabin içi sistemler, yangın tüpleri vs. gibi gereçlerin toplam ağırlığı 6000 kg olarak alınmıştır. Operasyonel boş ağırlık havayolu şirketinin koltuk tasarımına ve birçok faktöre bağlı olarak değişebilmektedir ve bu çalışmada internette belirtilen değerlere yakın bir değer olarak 41.000 kg kabul edilmiştir.⁸⁶⁸⁷⁸⁸ Kullanılan FCOM'da koltuk sayısı 156 olarak verilmiştir. Bir yolcu ve bagajının ağırlığı toplamı 100 kg olarak kabul edilmiştir.⁸⁹ Havayolunun uçakta yolcu bagajından başka kargo taşımadığı varsayılmış ve doluluk oranlarına göre ücretli yük ağırlıkları belirlenmiştir.

Tablo 3.1 Airbus A319 Bazı Özellikleri⁹⁰

Motor Tipi	CFM-56-5B
Maksimum Kalkış Ağırlığı (MTOW)	68.000 kg
Maksimum İniş Ağırlığı (MLW)	61.000 kg
Maksimum Sıfır Yakıt Ağırlığı (MZFW)	57.000 kg
Minimum Ağırlık	35.400 kg
Operasyonel Boş Ağırlık (OEW)	41.400 kg
Maksimum Yakıt Kapasitesi (MAXF)	18.729 kg

⁸⁵ <https://airinsight.com/total-ground-time-a-key-operational-metric-for-airlines/> Erişim Tarihi: 13.03.2020

⁸⁶ <https://www.predictivemobility.com/family-A319> Erişim Tarihi: 13.03.2020

⁸⁷ http://www.flugzeuginfo.net/acdata_php/acdata_a319_en.php Erişim Tarihi: 13.03.2020

⁸⁸ <https://www.airliners.net/aircraft-data/airbus-a319/22> Erişim Tarihi: 13.03.2020

⁸⁹ ICAO. (2009) Available Capacity And Average Passenger Mass. *Tenth Session Of The Statistics Division*. Montreal, s. 5.

⁹⁰ Airbus, S. A. S. (2011). A319-Airplane Characteristics for Airport Planning AC.

Araştırmanın vaka çalışması kısmında İstanbul Havalimanını merkez havalimanı (hub) olarak kullanan bir havayolu firmasının olabilecek birkaç seferi ele alınarak bir senaryo geliştirilmiştir. İstanbul'dan jet yakıt fiyatlarının ve mesafelerin farklı olduğu 7 farklı havalimanına sefer düzenleneceği varsayılmış ve 14.02.2020 tarihli yakıt fiyatları⁹¹ kullanılmıştır. Uçuş seferlerinin mesafeleri İstanbul'dan kalkıp gideceği şehre göre skyvector.com⁹² sitesinden oluşturulan rotalarla belirlenmiştir ve Ek 7-13'te görülebilir. Uçakların gidiş ve dönüş uçuş mesafeleri eşit kabul edilmiştir. Yakıt fiyatları Jet A1 yakıt yoğunluğu 0.785 kg/L temel alınarak kilogram başına fiyatı elde edilmiştir.

Tablo 3.2 Senaryoda Kullanılacak Olan Sefer Bilgileri

Havalimanı	IATA Kodu	ICAO Kodu	Yakıt Fiyatı (USD/kg)	Mesafe(nm)
İstanbul	ISL	LTFM	0,72	-
Bratislava	ISL - BTS	LZIB	1,94	645,1
Floransa	ISL - FLR	LIRQ	1,65	907,4
Atina	ISL - ATH	LGAV	1,70	317,8
Sofya	ISL - SOF	LBSF	1,54	257,6
Tahran	ISL - THR	OIII	0,63	1122,7
Bağdat	ISL - SDA	ORBI	1,85	955,4
Trablus	ISL - MJI	HLLM	0,45	995

Sefer düzenlenecek havalimanları için yakıt alınacak bir yakıt tedarikçisi olduğu kabul edilmiştir. Havalimanlarından alınacak yakıt miktarlarında bir kısıtlama olmadığı varsayılmıştır. Gidilen her merkez yeterli miktarda yakıt arzı sağlayabilecek kapasiteye tedarike sahiptir.

Planlanan seferlerde herhangi bir acil durum olayı, pas geçme, trafikten dolayı havada bekleme ve alternatif bir havalimanına inme durumlarının yaşanmadığı kabul edilmiştir. Bu nedenle uçak indikten sonra yakıt tankında acil durum, beklenmedik durum, alternatif meydan ve bekleme yakıtlarının kaldığı kabul edilecektir.

Havayolu işletmelerinin yaptığı seferlere, uyguladığı iş modeline ve talebe bağlı olarak doluluk oranları değişiklik gösterebilmektedir. IATA'nın raporuna göre tüm Dünya için yurtiçi seferlerdeki yıllık doluluk oranını %83.8 olarak, uluslararası seferlerin yıllık doluluk oranını ise %85.5 olarak vermiştir⁹³. Bu çalışmada yolcu uçağı ele

⁹¹ <http://aeroportos.weebly.com/fuel-prices.html#.XfdHkugzbiW> Erişim tarihi: 14.02.2020

⁹² <https://skyvector.com/> Erişim tarihi: 16.12.2019

⁹³ <https://www.iata.org/contentassets/08ea7f485007409d998575257c822ee9/passenger-analysis-jun-2019.pdf> (Erişim Tarihi: 06.03.2020)

alındığından doluluk oranı %70, %80, %90 ve %100 olarak kabul edilmiş, fazladan yakıt almaya etkisi gösterilmiştir. Seçilen doluluk oranları ile uçağın kalkış ağırlığı belirlenmiştir.

3.4 Araştırmanın Sınırları

Uçaklarda belirli her parçanın belirli saat uçuşlardan sonra değiştirilerek bakım yapılması gerekmektedir. Uçaklarda taşınan ağırlığın artması inişlerde ve kalkışlarda bazı parçaların daha çok yıpranmasına ve ek bakım maliyetlerine neden olabilmektedir. Uçaklarda fazladan yakıt alımıyla artan ağırlıktan dolayı oluşan bakım maliyeti ve fazla ağırlıktan dolayı artan karbondioksit salınımı vergi maliyetleri modele dâhil edilmemiştir.

Literatürde fazladan yakıt alma ile ilgili çalışmalarda uçuş ağı tasarlanmış ve ağ bazında eniyilenmeye çalışılmıştır^{94 95 96}. Türkiye’de çalışan havayolu şirketlerinin genel olarak ağ yapısı topla dağıtım temeline dayanmaktadır. Geliştirilen modeli havayolunun belirlediği ağ yapısı içerisinde n farklı destinasyon için fazladan yakıt alma optimizasyonu yapabilecek şekilde tasarlanmıştır. Fakat araştırma için havayolu şirketinin ağ yapısının topla-dağıtım şekline uyguladığı varsayılmış, bu nedenle orijin ve destinasyon olarak iki merkez arasındaki uçuşları dikkate alınmıştır. Böylece uçağın orijinden kalkıp gittiği noktadan tekrar kalktığı meydana geldiği kabul edilmiştir.

Modele girecek olan yakıt tahmini verileri FCOM’dan (Uçuş Mürettebat El Kitabı) yararlanılarak oluşturulmuştur. Burada yapılan yakıt tahminleri için referans alınan tablolarda bulunan ağırlıklar arasında 200 kg oynamaktadır. Bu değerlerin ortalaması alınarak yakıt sarfiyat tahmini 50 kg’a kadar düşürülmüştür.

Modelin uygulaması hava koşullarının değişkenlik göstermesinin probleme tam olarak yansıtılmaması nedeniyle sınırlıdır.

3.5 Araştırmanın Yöntemi

Havayolu şirketlerinin, farklı merkezlerdeki yakıt fiyat farklılıklarından ortaya çıkan fırsatı, yakıt maliyetinden tasarruf için önerilen doğrusal olmayan fazladan yakıt

⁹⁴ Stroup & Wollmer. 1992. **a.g.k.**, 229-237.

⁹⁵ Abdelghany, Abdelghany, & Raina,. 2005. **a.g.k.**, 199-206.

⁹⁶ Deo, Silvestre & Morales, 2020. **a.g.k.**, 82.

taşıma stratejisi modelinin çözümü için Genel İndirgenmiş Gradyan (GİG) metodu kullanılmıştır.

İndirgenmiş Gradyan (İG) metodu ilk olarak 1967 yılında Wolfe tarafından eşitlik kısıtlı problemler için basit değişken eleme tekniğini temel alarak geliştirilmiştir⁹⁷. Daha sonra Abadie ve Carpentier İG metodunu geliştirerek doğrusal olmayan ve eşitsizlik kısıtlarına sahip problemlere çözüm yöntemi olarak Genel İndirgenmiş Gradyan (GİG) metodunu önermişlerdir⁹⁸. 1974 yılında Lasdon GİG metodunu birkaç değişiklik yaparak ilkelerini ve mantığını bilgisayar programları için uygun hale getirerek açıklamıştır⁹⁹. GİG yöntemi, İG yöntemi ile benzer şekilde doğrusal problemlerin simpleks yöntemi ile çözümünde olduğu gibi değişkenler, temel (bağımlı) ve temel olmayan (bağımsız) değişkenler olarak bölünür. GİG yöntemi, ceza fonksiyonlarını kullanmak yerine, temel değişkenlerdeki gerekli değişikliğin doğrudan temel olmayan değişkenlerle hesaplanabilmesini sağlamak için kısıtlamaları değiştirir¹⁰⁰. Eşitsizlik kısıtlarına yapay (slack) değişken eklenerek eşitlik kısıtına dönüştürülür ve doğrusal olmayan eşit kısıtlı model elde edilir. Daha sonra hem temel hem de temel olmayan değişkenler göz önünde bulundurularak, amaç fonksiyonundan tanımlanan genel indirgenmiş gradyan ile amaç fonksiyonundaki toplam artımlı değişiklik hesaplanabilir.

Doğrusal olmayan programlama problemlerini çözümedeki temel zorluklardan biri, eşitsizlik kısıtlamalarıyla, özellikle de bu kısıtlamalardan hangilerinin çözümde aktif olup olmadığına karar vermektir¹⁰¹. GİG metodunda gerçekleşen aramalar ile oluşan küçük hareketlerde bile mevcut aktif kısıtlar tam olarak aktif kalacaklardır. Kısıt fonksiyonun doğrusal olmayışı nedeniyle bazı aktif kısıtlar tam olarak karşılanmazsa, kısıtları

⁹⁷ J. Abadie, (Ed.), 1970. *Nonlinear Programming*. North Holland, Amsterdam.'dan aktaran Arora, J. S. (2017). *Introduction To Optimum Design*. Academic Press, 4. Baskı. Elsevier.

⁹⁸ J. Abadie & J. Carpentier (1969). Generalization Of The Wolfe Reduced Gradient Method To The Case Of Nonlinear Constraints. In: Fletcher, R. (ed.) *Optimization*, Proceedings of a Symposium Held at University of Keele, 1968, pp. 37–47. Academic Press, London

⁹⁹ L. S. Lasdon, R. L. Fox & M. W. Ratner (1974). Nonlinear Optimization Using The Generalized Reduced Gradient Method. *Revue Française D'automatique, Informatique, Recherche Opérationnelle. Recherche Opérationnelle*, 8(V3), 73-103.

¹⁰⁰ S. Frank, I. Steponavice, & S. Rebennack, (2012). Optimal Power Flow: A Bibliographic Survey *I. Energy Syst* 3, 221–258. s. 236-237.

¹⁰¹ J. Nocedal & S. Wright, (2006). *Numerical Optimization*. Springer Science & Business Media. s.

sağlamak için Newton-Raphson yöntemi kullanılır. Bu yönüyle GİG, Gradyan Projeksiyon yöntemiyle benzeşir¹⁰².

GİG metodu teorik olarak incelenmiştir ve Rao'dan yararlanılmıştır¹⁰³. Eşitlik 3.1-3.4'te verilen doğrusal olmayan bir programlama problemi gösterilmiştir.

$$\text{Enküçükleme } f(\mathbf{X}) \quad (3.1)$$

$$h_j(\mathbf{X}) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (3.2)$$

$$l_k(\mathbf{X}) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, l \quad (3.3)$$

$$x_i^{(l)} \leq x_i \leq x_i^{(u)}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.4)$$

$$\mathbf{X} = \{\mathbf{X}_1 \mathbf{X}_2 \dots \mathbf{X}_n\}^T \quad (3.5)$$

Verilen eşitliklerde tanımlanan $f(\mathbf{X})$; amaç fonksiyonunu, $h_j(\mathbf{X})$; eşitsizlik kısıtlarını, $l_k(\mathbf{X})$; eşitlik kısıtlarını, \mathbf{X} ; tasarım değişkenleri kümesini, $x_i^{(l)}$ ve $x_i^{(u)}$ tasarım değişkenlerinin alt ve üst limitleridir. Önerilen GİG modellerinin çözümü için tüm kısıtların eşitlik şeklinde verilmesi gerekmektedir. Bu nedenle Eşitlik 3.2'de olan eşitsizlik kısıtına negatif olmayan bir yapay değişken eklenir. Böylece tasarım değişkenlerinin alt limiti 0 ve üst limiti çok büyük bir sayı (sonsuz) olur ve model aşağıdaki gibi bulunur.

$$\text{Enküçükleme } f(\mathbf{X}) \quad (3.6)$$

$$h_j(\mathbf{X}) + x_{n+j} = 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (3.7)$$

$$l_k(\mathbf{X}) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, l \quad (3.8)$$

$$x_i^{(l)} \leq x_i \leq x_i^{(u)}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.9)$$

$$x_{n+j} \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (3.10)$$

Böylece $n + m$ sayıda $(x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1}, \dots, x_{n+m})$ değişkeni olan bir modele dönüşür. Problem düzenlenerek yazıldığında Eşitlik 3.11- 3.13 elde edilir.

$$\text{Enküçükleme } f(\mathbf{X}) \quad (3.11)$$

$$g_j(\mathbf{X}) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, m + 1 \quad (3.12)$$

$$x_i^{(l)} \leq x_i \leq x_i^{(u)}, \quad i = 1, 2, \dots, n + m \quad (3.13)$$

GİG yöntemi eşitlik kısıtlarının kullanılarak değişkenlerin elenmesi görüşünü temel alır. Böylece teorik olarak bir değişken x_i ($i = 1, 2, \dots, n + m$) değişken setinden

¹⁰² Arora, 2017, **a.g.k.**, 592.

¹⁰³ S. S. Rao, (2009). *Engineering Optimization: Theory and Practice*. 4. Baskı. John Wiley & Sons. s. 412-418

Eşitlik 3.7 ve 3.8'de verilen $m + 1$ sayıdaki eşitlik kısıtlarının her biri için bir değişken azaltılabilir. Bunu yapabilmek için $n + m$ kadar tasarım değişkeni iki kümeye keyfi olarak aşağıdaki gibi bölünmesi uygundur.

$$\mathbf{X} = \begin{Bmatrix} \mathbf{Y} \\ \mathbf{Z} \end{Bmatrix} \quad (3.14)$$

$$\mathbf{Y} = \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{n-1} \end{Bmatrix} = \text{Temel Değişkenler} \quad (3.15)$$

$$\mathbf{Z} = \begin{Bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_{m+1} \end{Bmatrix} = \text{Temel Olmayan Değişkenler} \quad (3.16)$$

Amaç ve kısıt fonksiyonlarının ilk kısmi türevleri alınırsa aşağıdaki Eşitlik 3.17 ve 3.18 elde edilir.

$$df(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\partial f}{\partial y_i} dy_i + \sum_{i=1}^{m+1} \frac{\partial f}{\partial z_i} dz_i = \nabla_{\mathbf{Y}}^T f d\mathbf{Y} + \nabla_{\mathbf{Z}}^T f d\mathbf{Z} \quad (3.17)$$

$$dg_i(\mathbf{X}) = \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\partial g_i}{\partial y_j} dy_j + \sum_{j=1}^{m+1} \frac{\partial g_i}{\partial z_j} dz_j \quad (3.17)$$

Kısa gösterimi ise aşağıdaki gibidir.

$$dg = [C]d\mathbf{Y} + [D]d\mathbf{Z} \quad (3.18)$$

Burada

$$\nabla_{\mathbf{Y}} f = \begin{Bmatrix} \frac{\partial f}{\partial y_1} \\ \frac{\partial f}{\partial y_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial y_{n-1}} \end{Bmatrix} \quad (3.19)$$

$$\nabla_{\mathbf{Z}} f = \begin{Bmatrix} \frac{\partial f}{\partial z_1} \\ \frac{\partial f}{\partial z_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial z_{m+1}} \end{Bmatrix} \quad (3.20)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial y_{n-1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_{m+1}}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial g_{m+1}}{\partial y_{n-1}} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial z_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial z_{m+1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_{m+1}}{\partial z_1} & \dots & \frac{\partial g_{m+1}}{\partial z_{m+1}} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$d\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} dy_1 \\ dy_2 \\ \vdots \\ dy_{n-1} \end{pmatrix} \quad (3.23)$$

$$d\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} dz_1 \\ dz_2 \\ \vdots \\ dz_{m+1} \end{pmatrix} \quad (3.24)$$

şeklinde bulunur.

\mathbf{X} vektörü elemanlarının bütün kısıtları $g(\mathbf{X}) = 0$ 'ı sağladığı varsayılırsa, $\mathbf{X} + d\mathbf{X}$ 'de olurluluğunu korumak için $dg = 0$ 'a karşılık gelmesi gerekir. Eşitlik 3.18'de $dg = 0$ yerine yazılırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$d\mathbf{Z} = -[D]^{-1}[C]d\mathbf{Y} \quad (3.25)$$

Eşitlik 3.17'de belirtilen \mathbf{X} vektöründeki değişimden kaynaklanan amaç fonksiyonundaki değişim, eşitlik 3.25'i kullanarak yazılırsa aşağıdaki elde edilir.

$$df(\mathbf{X}) = (\nabla_{\mathbf{Y}}^T f - \nabla_{\mathbf{Z}}^T [D]^{-1}[C])d\mathbf{Y} \quad (3.26)$$

Diğer bir ifade ile Genel İndirgenmiş Gradyan gösterimi,

$$\frac{df}{d\mathbf{Y}}(\mathbf{X}) = \mathbf{G}_R \quad (3.27)$$

$$\mathbf{G}_R = \nabla_{\mathbf{Y}} f - ([D]^{-1}[C])^T \nabla_{\mathbf{Z}} f \quad (3.28)$$

şeklinde yapılır. Eşitlik 3.28 de Genel İndirgenmiş Gradyan vektörü gösterilmiştir. Geometrik olarak GİG temel değişkenler tarafından (n-m) boyutlu olurlu bölge üzerine tanımlanan orijinal n boyutlu gradyanın izdüşümü denilebilir.

Kısıtsız çok değişkenli bir problemin enküçüklenmesi durumunda optimuma ulaşmak için gradyanının sıfıra eşitlenmesi gerekmektedir¹⁰⁴. Benzer şekilde kısıtlı bir problem için indirgenmiş gradyanı sıfıra eşitlendiğinde en küçük değerini alacaktır. Bu durum problemin en küçük değerinin Kuhn–Tucker koşullarını sağlaması ile aynı şekilde doğrulanabilir. Genel İndirgenmiş Gradyan (\mathbf{G}_R), kısıtlanmamış bir fonksiyon için bir araştırma yönü \mathbf{S} üretmek için kullanılabilen ∇f gradyanına benzer şekilde, kısıtlanmış amaç fonksiyonun değerini azaltmak için arama yönü (\mathbf{S}) üretmek için kullanılabilir. Arama yönü (\mathbf{S}) boyunca (f) değerini en aza indirmek için uygun bir adım uzunluğu (λ) değeri seçilmelidir. Her λ değeri için \mathbf{Z} bağımlı değişken vektörü Eşitlik 3.25 kullanılarak güncellenir. Eşitlik 3.25 doğrusal olmayan probleme doğrusal yaklaşımla adım büyüklüğünü belirler, bu nedenle λ değerlerinde kısıtlar tam olarak sıfıra eşit bulunamayabilir ($dg \neq 0$). \mathbf{Y} sabit tutulduğunda aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$g(\mathbf{X}) + dg(\mathbf{X}) = 0 \quad (3.29)$$

Eşitlik 3.29'daki dg Eşitlik 3.18'de yerine yazılırsa, aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$d\mathbf{Z} = [D]^{-1}(-g(\mathbf{X}) - [C]d\mathbf{Y}) \quad (3.30)$$

Eşitlik 3.30 ile elde edilen $d\mathbf{Z}$ değeri aşağıda verildiği üzere \mathbf{Z} değerini güncellemek için kullanılır.

$$\mathbf{Z}_{yeni} = \mathbf{Z}_{mevcut} + d\mathbf{Z} \quad (3.31)$$

Güncellenen \mathbf{X} vektör kısıtlarda denir ve $d\mathbf{Z}$ değeri yeterince küçülene kadar Eşitlik 3.30 kullanma süreci devam ettirilir. Eşitlik 3.30 $d\mathbf{Z}$ için Newton'un denklemleri eşzamanlı çözme metodu olarak düşünülebilir.

GİG yönteminin algoritması aşağıda verilmiştir¹⁰⁵.

1. *Temel ve temel olmayan değişkenler belirlenir.* İlk olarak deneme tasarım değişkenleri vektörü \mathbf{X} belirlenir. Aşağıdaki rehber kullanılarak problemin temel ve temel olmayan değişkenleri \mathbf{Y} ve \mathbf{Z} belirlenir.
 - a) Temel olmayan değişkenler matrisi $[D]$ determinantı 0 olmayacak şekilde belirlenir.

¹⁰⁴ N. K. Erdoğan & N. Alptekin (2006). *Lineer Olmayan Programlama Problemleri*. Anadolu Üniversitesi Yayınları, Eskişehir. s. 53.

¹⁰⁵ Rao, 2009. **a.g.k.**, 416-418.

- b) \mathbf{X} matrisinin elemanları olurlu bölgeyi sağlamak için iteratif süreçlerden geçerek ayarlanacağından, problemin alt ve üst sınırlarına eşit olan \mathbf{X} 'in herhangi bir elemanı ilk olarak temel değişken olarak alınmalıdır.
- c) Kısıtlara eşitliği sağlaması için eklenen yapay değişkenler doğrusal terimler olduğundan temel olmayan değişkenler olarak alınmalıdır. Fakat herhangi bir temel olmayan değişkenin ilk değeri 0 ise (yapay değişkenin alt sınırı) temel değişken olarak alınmalıdır.
2. *Genel indirgenmiş gradyanı hesapla.* GİG Eşitlik 3.28 kullanılarak belirlenir. Eşitlik 3.28'de yer alan türevler gerek olduğunda sayı olarak değerlendirilebilir.
3. *Yakınsamayı test et.* GİG'nin tüm bileşenleri sıfıra yakınsa, yeterince yakınsak olduğu düşünülür ve mevcut \mathbf{X} vektörü problemin optimum çözümü olarak kabul edilir. Bunun için aşağıdaki test kullanılabilir.

$$\|\mathbf{G}_R\| \leq \varepsilon \quad (3.32)$$

Buradaki ε çok küçük bir sayıdır. Eğer bu eşitsizlik sağlanmazsa 4. Adıma ilerlenir. Eğer eşitsizlik sağlanırsa algoritma durdurulur.

4. *Arama yönünü belirle.* GİG, kısıtsız problemlerin amaç fonksiyonlarının gradyanı bulunmuş gibi uygun arama yönü (\mathbf{S}) bulmak için kullanılabilir. Tekniklerden Dik iniş, Fletcher–Reeves, Davidon–Fletcher–Powell veya Broydon–Fletcher–Goldfarb–Shanno teknikleri burada kullanılabilir. Dik iniş yönteminde \mathbf{S} vektörü aşağıdaki gibi belirlenir.

$$\mathbf{S} = -\mathbf{G}_R \quad (3.33)$$

5. *Arama yönü boyunca minimumu bul.*

- a) Adım uzunluğu (λ) için bir tahmin yapılır. Temel değişkenler ele alındığında;

$$\lambda = \begin{cases} \frac{y_i^{(u)} - (y_i)_{eski}}{s_i} & \text{eğer } s_i > 0 \\ \frac{y_i^{(l)} - (y_i)_{eski}}{s_i} & \text{eğer } s_i < 0 \end{cases} \quad (3.34)$$

eşitliği kullanılır ve burada \mathbf{S} vektörünün i 'inci elemanını s_i temsil eder. Benzer şekilde temel olmayan değişkenler ele alındığında Eşitlik 3.25'te $d\mathbf{Y} = \lambda\mathbf{S}$ kullanılarak aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\mathbf{T} = -[\mathbf{D}]^{-1}[\mathbf{C}]\mathbf{S} \quad (3.35)$$

Burada;

$$\lambda = \begin{cases} \frac{z_i^{(u)} - (z_i)_{eski}}{t_i} & \text{eğer } t_i > 0 \\ \frac{z_i^{(l)} - (z_i)_{eski}}{t_i} & \text{eğer } t_i < 0 \end{cases} \quad (3.36)$$

eşitliği kullanılır ve t_i , \mathbf{T} vektörünün i 'inci elemanını temsil eder.

- b) Eşitlik 3.34'ten elde edilen λ_1 değeri bazı temel değişkenlerin üst veya alt limitlerine ulaşmalarını sağlayabilir. Benzer şekilde Eşitlik 3.36'dan elde edilen λ_2 değeri bazı temel olmayan değişkenleri alt veya üst limitlerine ulaşmalarını sağlayabilir. λ_1 veya λ_2 'den daha küçük olanı tek boyutlu bir minimizasyon sürecini başlatmak için üst limit λ değeri olarak kullanılabilir.
- c) \mathbf{X}_{yeni} vektörü aşağıdaki şekilde bulunur.

$$\mathbf{X}_{yeni} = \begin{Bmatrix} \mathbf{Y}_{eski} + d\mathbf{Y} \\ \mathbf{Z}_{eski} + d\mathbf{Z} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{Y}_{eski} + \lambda^* \mathbf{S} \\ \mathbf{Z}_{eski} + \lambda^* \mathbf{T} \end{Bmatrix} \quad (3.37)$$

Eğer λ^* adımı ile bulunan \mathbf{X}_{yeni} vektörü olurlu değil ise \mathbf{Y}_{yeni} sabit tutulur ve Eşitlik 3.30 ve $d\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_{yeni} - \mathbf{Z}_{mevcut}$ kullanılarak değiştirilmiş \mathbf{Z}_{yeni} elde edilir. Son olarak Eşitlik 3.30 kullanılarak yakınsaklık kanıtlandığında aşağıdaki \mathbf{X}_{yeni} elde edilir ve 1. Adıma gidilir.

$$\mathbf{X}_{yeni} = \begin{Bmatrix} \mathbf{Y}_{eski} + \Delta\mathbf{Y} \\ \mathbf{Z}_{eski} + \Delta\mathbf{Z} \end{Bmatrix} \quad (3.38)$$

Bu çalışmada önerilen fazladan yakıt taşıma modeli çözmek için Lasdon vd. (1978) tarafından yazılmış GRG2 algoritmasını temel alan MS Excel çözücü eklentisi kullanılmıştır¹⁰⁶. Yazılan GRG2 kodu, yıllarca doğrusal olmayan programlama modelleri için kullanılmış; sağlam ve güvenilir yaklaşımlardan biri olduğunu kanıtlamıştır.

Standart Microsoft Excel Çözücüsü doğrusal olmayan problemler için 200 karar değişkeni ve 100 kısıt (değişkenler üzerindeki sınırlara ek olarak) sınırına sahiptir. Premium Çözücü Platformu ise doğrusal olmayan problemler için 500 karar değişkeni ve 250 kısıta kadar çalıştırılabilir. Lasdon ve Smith'in (1992) büyük ölçekli problemler için

¹⁰⁶ L. S. Lasdon, vd. (1978). Design and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear programming. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, 4(1), 34-50.

yazdığı LSGRG kodu güçlü bir GİG yöntemini temel alır¹⁰⁷. Geliştirdikleri bu çözücü seyrek matris depolama yöntemlerini, temel seçmek veya dejenerasyonları önlemek için ileri teknikleri, olurlu çözüme hızlıca ulaşmak için “crashing” çarpışma yöntemlerini ve büyük problemler için uyarlanmış diğer algoritmik yöntemleri kullanır. LSGRG çözücüsü 12.000 değişkenli, 12.000 kısıtlı, değişkenlerin sınırlarını da kapsayan problemleri çözebilir¹⁰⁸.

GİG yönteminden esinlenerek yeni bir optimizasyon yaklaşımı geliştiren veya bu yöntemin bazı adımlarına değişiklik veya ekleme yapan çalışmalar literatürde mevcuttur. Rudd, Foderaro ve Ferrari (2013) birçok dinamik sistem veya araçtan oluşmuş çok ölçekli bir dinamik sistem için optimum durum ve kontrol gidişatını ele alan problemler üzerinde çalışmışlardır. Dağınık optimal kontrol noktaları bulunan problemler için küçük aracı sistemler olarak tanımlanan stokastik diferansiyel denklemler ile bir Genel İndirgenmiş Gradyan Metodu sunmuşlardır¹⁰⁹.

Rudd vd. (2017) GİG metodundan esinlenerek karmaşık çevreler içinde olan çok büyük robotik sistemler ve dağınık optimal kontrol noktaları için eniyileme yapan dolaylı bir yöntem geliştirmişlerdir. Yaptıkları karmaşık hesaplamalar ile GİG yönteminin klasik optimal kontrol yöntemlerine göre önemli derecede verimli olduğunu göstermişlerdir. Önerdikleri yöntemi, çok büyük robotik sistemler için engellerin bulunduğu, dış güçlere ve örselemelere maruz bırakıldığı ortamlarda yol belirlemek için kullanmışlardır. Çalışmanın sonucunda, yöntemin mevcut doğrudan dağıtılmış optimal kontrol ve stokastik gradyan yöntemlerine kıyasla performansını önemli ölçüde geliştirdiğini göstermektedir¹¹⁰.

Toplu ve Körpe (2018) GİG metodunu kullanarak bir eniyileme çözücüsü geliştirmişlerdir. Geliştirilen model bir probleme uygulanmış ve farklı çözücülerle

¹⁰⁷ S. Smith & L. Lasdon, (1992). Solving Large Sparse Nonlinear Programs Using GRG. *ORSA Journal on Computing*, 4(1), 2-15.

¹⁰⁸ <https://www.solver.com/smooth-nonlinear-technology> Erişim Tarihi: 24.03.2020

¹⁰⁹ K. Rudd, G. Foderaro & S. Ferrari (2013). A Generalized Reduced Gradient Method For The Optimal Control Of Multiscale Dynamical Systems. *In 52nd IEEE Conference on Decision and Control* (pp. 3857-3863). IEEE.

¹¹⁰ K. Rudd vd. (2017). A Generalized Reduced Gradient Method For The Optimal Control Of Very-Large-Scale Robotic Systems. *IEEE Transactions on Robotics*, 33(5), 1226-1232.

karşılaştırılmıştır. Çalışmalarına göre geliştirdikleri çözücü, problemin ardışık ikinci dereceden programlama çözücüsünden 700 saniye daha hızlı çözmüştür¹¹¹.

Bu çalışmaların yanı sıra GİG eniyileme çözüm tekniğinin, literatürde birçok alanda doğrusal olmayan problemle uygulandığı görülmüştür. Sharma ve Glemmestadb (2013) gazın kaldırma kuvvetini kullanarak petrol çıkarılan kuyular için ortak gaz dağıtım sistemini doğrusal olmayan dinamik bir model kullanarak eniyilemeye çalışmışlardır. Oluşturdukları modelin çözümü için GİG programlama ve global en iyi noktayı bulmak için birden çok başlangıç araması uygulamışlardır. Modellenen simülasyon sonuçlarına göre toplam petrol üretiminin artırılmasını ve karlılığı artırmasını sağlamıştır¹¹².

Kocamaz ve Çiçekli (2014) pastörize likit yumurta üretim planını eniyilemek amacıyla GİG yöntemini kullanmışlardır. Geliştirdikleri modelin amaç fonksiyonunda üretim miktarını maksimize etmek; kısıtlarında ise kapasite, kırım oranı, briks değeri, makine kullanım oranı ve sıvı oranı bulunmaktadır. Çözüm için MS Excel içinde çözücü eklentisi olarak GRG2 algoritması kullanılmış ve denenen bütün üretim planı senaryoları için çözüm bulmayı başarmıştır¹¹³.

Adamson vd. (2015) bir çelik üreticisinde oksijen gaz tedariki sağlayan sisteme uygulamışlardır. Yazarlar amaç fonksiyonunu tedarik ağının güç ve sıvı kullanım maliyetini en aza indirmek olan; karma tam sayılı doğrusal olmayan bir model kurmuşlardır. Geliştirdikleri modeli GİG ile gaz şebekesinin gerçek zamanlı optimizasyonunu sağlayarak ekstra güç harcamalarından, gereksiz sıvı buharlaşmalarından ve ürün dökülmelerinden kurtararak önemli derecede tasarruf sağlamışlardır¹¹⁴.

3.6 Uygulama

Araştırmanın uygulama kısmında farklı yakıt fiyatlarına sahip çeşitli uzaklıklarda bulunan havalimanları arasında gerçekleşecek uçuşlar için yakıt maliyetlerini azaltmayı

¹¹¹ M. S. Toplu & D. S. Körpe (2018). Genel İndirgenmiş Gradyan Metodu ile Eniyileme Çözücüsü Geliştirilmesi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(3), 960-969.

¹¹² R. Sharma & B. Glemmestad (2013). On Generalized Reduced Gradient Method With Multi-Start And Self-Optimizing Control Structure For Gas Lift Allocation Optimization. *Journal of Process Control*, 23(8), 1129-1140.

¹¹³ M. Kocamaz & U. G. Çiçekli, (2014). Pastörize Likit Yumurta Üretim Planı Optimizasyonu. *Dokuz Eylül Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi*, 15(1), 1-12.

¹¹⁴ R. Adamson, vd. (2015). Real Time Optimisation Of Industrial Gas Supply Networks. *IFAC-PapersOnLine*, 48(8), 355-360.

amaçlayan bir doğrusal olmayan programlama modeli önerilmiştir. Tasarlanan problemin modeli merkezler arasındaki yakıt fiyat farklarından yararlanarak, uçağın yapısal kapasitesi elverdiği ölçüde, yakıtın ucuz olduğu merkezden fazladan yakıt taşıyarak toplam yakıt maliyetini azaltma düşüncesini temel alır. Araştırma problemi fazladan yakıt alma stratejisi çeşitli ağ yapılarına sahip havayolları için uygulanabilir. Örneğin; uçak çıktığı havalimanına geri dönene kadar birçok havalimanına inip kalkabilir ya da uzun menzilli uçuşlar için ucuz yakıt fiyatı olan ara bir havalimanına inip kalkabilir.

3.6.1 Araştırma Problem Modeli

Araştırma problemi modelinde kullanılacak olan katsayılar ve değişkenler için belirlenen notasyonlar ve amaç fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

x_i ; i havalimanından aldığı yakıt

y_i ; i havalimanından $i + 1$ 'inci havalimanına indikten sonra uçağın içinde kalan yakıt

c_i ; i havalimanındaki yakıt maliyeti

c'_i ; i havalimanında yakıt almadan önce uçak yakıt deposunda bir önceki uçuştan kalan yakıtın maliyeti

p_i ; i havalimanından aldığı ücretli yük ağırlığı

f_{max} ; yakıt kapasitesi

OEW; uçağın boş ağırlığı (Operating Empty Weight) - uçağın yakıt, yük ve yolcu olmadan servise hazır şekildeki toplam ağırlığı

MTOW _{i} ; uçağın i havalimanından maksimum kalkış ağırlığı (Maximum Take-off Weight) i havalimanından $i + 1$ havalimanına olan uçuş mesafesine göre hesaplanır.

MLW; uçağın maksimum iniş ağırlığı (Maximum Landing Weight)

BLOCK _{i} ; i havalimanında yakıt aldıktan sonra park yerinde iken uçağın içinde bulunan toplam yakıt ağırlığı

TRIP _{i} ; i havalimanından $i + 1$ havalimanına harcayacağı tahmini seyir yakıt ağırlığı

TRIPcont_i; *i* havalimanından *i* + 1 seyir için alınan beklenmedik durum yakıt ağırlığı

HLD_i; *i* + 1 havalimanındaki trafiğe veya başka nedenlere bağlı olarak alınan yönetmelikle alınması zorunlu olan tahmini bekleme yakıt ağırlığı

ALT_i; *i* havalimanından *i* + 1 havalimanına inememe veya pas geçme durumuna istinaden en yakın başka bir havalimanına planlanan uçuş için alınan yakıt ağırlığı (alternate fuel)

TAXI_i; *i* havalimanında park yerinden pist kalkış noktasına ve *i* + 1 havalimanında inilen pistten park yerine rule sırasında sarf edilen tahmini yakıt ağırlığı

APU_i; *i* havalimanında yakıt alındıktan sonra park yerinde ve *i* + 1 havalimanına indikten sonra park yerinde yakıt alınana kadar sürede APU'nun çalıştırılması için sarf edilen yakıt ağırlığı

TANKER_i; *i* havalimanından *i* + 1 havalimanına maliyeti en aza indirmek için alınan fazladan yakıt ağırlığı

TANKERM_i; *i* havalimanından belirlenen p_i ile *i* + 1 havalimanına olan uçuş mesafesi için belirlenen yapısal maksimum fazladan yakıt taşıma kapasitesi

Amaç fonksiyonu yakıt maliyetinin en küçükmek üzere yazılmıştır. Denklemden yakıt maliyeti; havalimanındaki güncel yakıt fiyatları ve her sefer sonrası uçağın içinde kalan yakıt miktarı düşünülerek oluşturulmuştur. Doğrusal olmayan programlama modelinin kullanılmasının asıl nedeni amaç fonksiyonundaki c'_i katsayısının doğrusal olmayışından kaynaklanır.

$$\text{Enküçükleme } Z = \sum_{i=1}^N c_i x_i + c'_i y_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.39)$$

Fazladan yakıt alma problem modeli için belirlenen kısıtlar ve değişkenlerin nasıl hesaplanacağı aşağıda sıralanmıştır.

Eşitlik 3.40'da maksimum kalkış ağırlığı *i* + 1 havalimanına olan uçuş mesafesi düşünülerek yakıt tahminine göre belirlenir. Uçuş mesafesinin kısa olduğu durumlarda üreticinin belirlediği *MTOW* daha fazla olabilir. Eğer kısa mesafeli uçuşlar için uçak

üreticisinin belirlediği miktar kıstas alınır ve tam kapasite yakıt alınır, inişten önce yapısal iniş ağırlığını karşılamak için yakıt boşaltılmak durumunda kalınabilir.

$$OEW + x_i + y_i + p_i \leq MTOW_i \quad (3.40)$$

Uçağın iniş ağırlığı her uçak için el kitaplarında belirlenmiştir. Eşitlik 3.41'deki kıst kalkış ağırlığından ininceye kadar seyir yakıtını harcadığı varsayılarak yazılmıştır. Buradaki maksimum yapısal iniş ağırlığı tüm havalimanları için geçerli bir değerdir.

$$OEW + x_i + y_i + p_i - (TRIP_i) \leq MLW \quad (3.41)$$

Yeterli yakıt kısıtlaması Eşitlik 3.42'de uçağa alınan yakıtın depolama tanklarının toplam kapasitesini aşmasını engellemek için yazılmıştır.

$$x_i + y_i \leq f_{max} \quad (3.42)$$

Eşitlik 3.44'te belirtilen $BLOCK_i$ i havalimanında uçak park pozisyonunda yakıt alındıktan sonra içinde olması gereken yakıt miktarıdır.

$$x_i + y_i \geq BLOCK_i \quad (3.43)$$

$$BLOCK_i = TRIP_i + TRIP_{cont_i} + HLD_i + ALT_i + TAXI_i + APU_i \quad (3.44)$$

Eşitlik 3.45'te $i + 1$ havalimanına indikten sonra uçağın içinde kalan yakıtın hesaplanması gösterilmiştir.

$$y_{i+1} = x_i + y_i - TRIP_i \quad (3.45)$$

Uçağın içinde kalan yakıtın fiyat hesabı Eşitlik 3.46'da gösterilmiştir. Uçağın içinde kalan yakıtın maliyeti ağırlıklı ortalama hesabı yapılarak bulunur.

$$c'_i = \frac{c_i x_i + (c_{i-1})(y_i)}{x_i + y_i} \quad (3.46)$$

Uçağın herhangi bir pas geçme veya trafikten dolayı beklemediği varsayıldığı için $i + 1$ havalimanına indikten sonra uçağın içinde olması gereken yakıt kısıtı Eşitlik 3.47'de gösterilmiştir.

$$y_{i+1} \geq ALT_i + HLD_i \quad (3.47)$$

Eşitlik 3.48 ile $i + 1$ havalimanına ulaşmak için Eşitlik 3.44'te belirtilen gerekli yakıt üstüne ne kadar fazla yakıt alınacağı bulunabilir.

$$TANKER_i = (x_i + y_i) - BLOCK_i \quad (3.48)$$

Uçağın yapısal ağırlık kısıtlamaları, uçuş mesafesi ve alacağı ücretli yüke bağlı olarak i havalimanından $i + 1$ havalimanına fazladan yakıt alma miktarı değişecektir. Bu nedenle modele aşağıdaki Eşitlik 3.49 fazladan yakıt alma kısıtı eklenmiştir.

$$TANKER_i \leq TANKERM_i \quad (3.49)$$

Eşitlik 3.50 modele problemde kalkılan ve inilen havalimanlarında ($i = 1,2,3 \dots N$) alınan yakıt miktarının negatif olmaması nedeniyle eklenmiştir.

$$x_i \geq 0 \quad i = 1,2,3 \dots N \quad (3.50)$$

Araştırma probleminin gösterilmesi amacıyla modele ilk olarak parametrik bir uygulama yapılmıştır. Bu model ilk olarak uçuş mesafeleri 300nm, 500nm, 700nm, 900nm, 1100nm, 1300nm ve 1500nm uçuş mesafelerinde; doluluk oranları %70, %80, %90 ve %100 olarak kabul ederek; seyir uçuş irtifasının 29.000ft, 31.000ft, 33.000ft, 35.000ft, 39.000ft uçuş seviyelerinde; yakıt fiyat farklarını %50, %60, %70, %80 ve %90 alınarak test edilmiştir. Daha sonra gerçek hayattan bir vaka çalışılmış ve İstanbul merkez alınarak yakıt fiyat farklarının olduğu Bratislava, Atina, Sofya, Floransa, Bağdat, Tahran, Trablus gibi kısa ve orta uçuş mesafeli merkezler seçilerek test edilmiştir.

Modelin çözümü için GRG2 algoritmasını kullanan MS Excel çözücü eklentisinden yararlanılmıştır. Yakınsama değeri $\varepsilon = 0,000001$ olarak alınmıştır. Problemlerin çözümü için kullanılan bilgisayar 64 bit işletim sistemine ve 8 GB RAM'e sahiptir ve problemin çözümü ortalama 0.5 saniye almıştır.

3.6.2 Uçuş Yakıt Sarfiyat Tahmini

Araştırma problemi için oluşturulan modeli çözücüye sokmadan önce uçuş planı yapılmış ve uçağın gidilecek mesafeye ve ağırlığına göre ne kadar yakıt tüketeceği tahmin edilmiştir. Yapılan tahmin için uçak üreticisi tarafından hazırlanan FCOM (Uçuş Mürettebat Operasyon El Kitabı) kullanılmıştır.

Fazladan yakıt alma miktarı belirlenmeden önce uçulacak mesafeye göre uçağın kalkış ağırlık limitleri belirlenecektir. Çünkü uçağın en yüksek kalkış ağırlığını limit kabul eder ve tam kapasite yakıt ile destinasyona ulaşırsa; yakın mesafeler için uçak

destinasyona ulaştığında uçağın iniş ağırlığı limitin üstünde olacak ve ineceği havalimanı üzerinde yakıt boşaltmak durumunda kalacaktır. Bir örnekle uygulama kısmında nasıl yakıt tahmini yapıldığı gösterilmiştir.

Uçuş senaryosu araştırmanın varsayımları kısmında örnek olarak uçuş mesafesi 300nm (555,6 km) olan bir merkeze düz uçuş seviyesi FL290 (29.000ft) takip edilerek uçuş seferi düzenlensin. Ek 1’de verilen FCOM uçuş planlama hesap tablosu kullanılarak yakıt tahmini yapılmıştır ve Tablo 3.3’te sıraların başında verilen dört işlemlerle gösterilmiştir.

Tablo 3.3 Örnek Yakıt Tahmin Tablosu

1	Uçağın Pist Başı Kalkış Ağırlığı	62800
2	Destinasyon Üzerindeki Ağırlık	61000
3	(-) Düz Uçuş için Sıcaklık Düzeltmesi	0
4	(+) Düşük Klima için Düzeltme	0
5	(-) Tırmanış Düzeltmesi	800
6	(+) Havalimanı Yükseklik Düzeltmesi	0
7	(-) Kademeli Tırmanış Düzeltmesi	0
8	Destinasyon Üzerindeki Düzeltilmiş Ağırlık	60200
9	(+) Alçalış Düzeltmesi	100
10	(=) İniş Ağırlığı	60300
11	(-) Yedek Yakıt (Yedek Havalimanı için)	1016,4
12	(=) Yedek Havalimanına İniş Ağırlığı	59283,6
13	(-) Bekleme Yakıtı	1165
14	(=) Bekleme Sonundaki Ağırlığı	58118,6
15	(1-8=) Seyir Yakıtı	2500
16	(-) Beklenmedik Durum Yakıtı	125
17	(14-16=) MZFW	57993,6
18	(-) OEW	41400
19	(=) Alınabilecek En Fazla Ücretli Yük	16593,6
20	(1-17=) Uçuş için Gereken Yakıt	4806,4
21	(+) Taksi ve APU Yakıtı	250
22	(=) Toplam Yakıt	5056,4

Adım 1: En yüksek kalkış limitini belirlemek için uçağın destinasyon üzerinde MLW ağırlığına ulaştığı varsayılır ve Ek 2’de verilen tablo kullanılarak kaç kilogram yakıt tükettiği bulunur. Örnek üzerinden gidilirse 300 nm için 61.000 kiloda destinasyon üzerinde olacak şekilde 1800 kg yakıt tüketir ve bu mesafe için $MTOW = 62.800$ kg olacaktır.

Adım 2: *MTOW* ile Ek 1 kullanılarak uçağın en fazla yük ile yakıt sarfiyat tahmini yapılır. Uçak düz uçuş seviyesine gelene kadar Ek 1 rehber alınarak; düz uçuş için sıcaklık, tırmanış, havalimanı yükseklik ve kademeli tırmanış düzeltmeleri yapılır. Düz uçuştan alçalış düzeltmesi uygulanır.

- a) Sıcaklık Düzeltmesi için Eşitlik 3.51'den yararlanılır;

$$0,015(kg/^{\circ}C/nm) X \Delta ISA^{\circ}C X uçuş\ mesafesi(nm) \quad (3.51)$$

ISA=0 alındığından sıcaklık düzeltmesi 0 olacaktır.

- b) Tırmanış düzeltmesi için Ek 3 referans alınır. 62.800 kg ile FL290'a tırmanış düzeltmesi 800 kg olarak alınır.
- c) Havalimanı yüksekliğine bağlı yakıt tüketimini bulmak için Eşitlik 3.52'den yararlanılır.

$$0,5 (kg/1000kg /1000ft) X TOW(1000kg)Xhavalimanı\ yüksekliği(1000ft) \quad (3.52)$$

Uygulamada havalimanları deniz seviyesinde olduğu kabul edildiğinden düzeltme 0 olmuştur.

- d) Düz uçuş safhasında uçağın uçuş irtifasını sürekli FL290'da tuttuğu varsayılmıştır bu nedenle düzeltme 0 olarak alınır.
- e) Alçalış düzeltmesi için Ek 4 kullanılmıştır. Uçağın destinasyon üzerinde düzeltilmiş ağırlığı Tablo 3.3, 8. sırada görüldüğü üzere 60.200 kg, Ek 4'e uygulanarak 100 kg bulunmuştur.

Adım 3: Tablo 3.3'te 10. sırada iniş ağırlığı bulunan uçak için Ek 5 kullanılarak acil durumda yedek havalimanına uçulması için gereken yakıt 1016 kg olarak bulunmuştur.

Adım 4: Yedek havalimanı üzerinde ağırlığı 59.287 kg olan uçağın varsayımlarda belirtilen şartlarda bekleme yaptığı kabul edilir ve Ek 6 kullanılarak bekleme yakıtı bulunur.

Adım 5: Uçuş boyunca beklenmedik sapmalar için alınan yakıt seyir yakıtının %5'i olarak hesaplanır ve Tablo 3.3'te 16. sırada belirtilmiştir.

Adım 6: Tüm yakıt ağırlıkları belirlendikten sonra uçağın yakıtsız en fazla hangi ağırlıkta olması gerektiği Tablo 3.3, 17. sırada verilmiştir. OEW kullanılarak uçağın belirtilen mesafe için en fazla ücretli yük taşıma kapasitesi bulunur.

Adım 7: Taksi ve APU yakıtı eklenerek senaryosu yapılan uçuş için alınması gereken toplam yakıt miktarı bulunur.

Adım 8: Adım 7'ye kadar belirtilen uçuş mesafesi ve uçuş yüksekliğinde en fazla ağırlıkta ne kadar yakıt harcayacağı ve ne kadar ücretli yük taşıyabileceği bulunmuş olur. Bu adımda farklı uçak doluluk oranlarına göre kalkış ağırlığı belirlenir ve uçağın bulunan ağırlığa göre yakıt tahmini tekrar yapılır. Örnek üzerinden devam edilirse, çeşitli uçuş mesafesini FL290'da uçulduğunda ve farklı doluluk oranlarına göre uçağın alınması gereken toplam yakıt miktarı Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4 Mesafelere Göre Alınması Gereken Toplam Yakıt

FL290	Alınması Gereken Toplam Yakıt Miktarı (kg)			
	70%	80%	90%	100%
Doluluk Oranı/ Uçuş Mesafesi				
300 nm	4.726	4.858	4.908	5.055
500 nm	6.091	6.189	6.267	6.315
700 nm	7.404	7.502	7.548	7.575
900 nm	8.519	8.553	8.600	8.835
1100 nm	9.768	9.900	10.069	10.096
1300 nm	11.047	11.283	11.329	11.386

Buraya kadar verilen yakıt hesaplamaları 300 nm, 500 nm, 700 nm, 900 nm, 1100 nm, 1300 nm uçuş mesafeleri; FL290, FL310, FL330, FL350 ve FL390 düz uçuş irtifa seviyelerinde ve %70, %80, %90 ve %100 doluluk oranları için yapılmıştır. Buna ek olarak İstanbul merkez olarak alınarak yedi destinasyona düzenlenen seferler için de aynı uçuş seviyeleri ve doluluk oranları düşünülerek hesap yapılmıştır. Tablo 3.5'te FL330'da farklı merkezlere uçuşlarda alınması gereken toplam yakıt miktarları verilmiştir.

Tablo 3.5 İstanbul Merkezli Çeşitli Uçuşlar İçin Alınması Gereken Yakıt Miktarı

FL330	Alınması Gereken Toplam Yakıt Miktarı (kg)			
	Doluluk Oranı/ İstanbul'a Olan Uçuş Mesafesi	70%	80%	90%
Sofya (257nm)	4.463	4.509	4.588	4.634
Atina (317nm)	4.779	4.876	4.923	5.002
Bratislava (645nm)	6.616	6.714	6.813	6.840
Floransa (900nm)	7.982	8.132	8.230	8.258
Bağdat (955nm)	8.413	8.500	8.598	8.625
Trablus (995nm)	8.560	8.710	8.809	8.888
Tahran (1122nm)	9.365	9.419	9.491	9.570

3.6.3 Problem Çözümü

Araştırma probleminde değinildiği gibi uçuş merkezden başlayıp başka bir destinasyona gidecek ve tekrar merkez havalimanına geri dönecek şekilde planlanmıştır. Eşitlik 3.53'te orijin havalimanındaki yakıt fiyatının (c_1) destinasyon havalimanındaki yakıt fiyatına (c_2) oranının yüzde olarak hesaplanması gösterilmiştir.

$$100 \times \left(\frac{c_1}{c_2} \right) \quad (3.53)$$

Problemin çözümüne başlarken verilen modele göre uçuşun başlayacağı havalimanında (1. havalimanı) uçağın içinde kalan yakıt miktarını bir önceki seferin bilinmemesi nedeni ile gideceği havalimanından geldiği kabul edilmiştir. Böylece $y_1 = ALT_2 + HLD_2$ olarak modele uygulanmış ve c'_1 , hesaplanırken $c_0 = c_2$ olarak uygulanmış ve c'_1 Eşitlik 3.54'deki gibi bulunmuştur.

$$c'_1 = \frac{c_1 x_1 + c_2 y_1}{x_1 + y_1} \quad (3.54)$$

Farklı doluluk oranlarına sahip ve farklı mesafelerdeki uçuşlar için oluşturulan senaryolarda yakıt tüketim miktarları belirlenmiştir. Farklı yakıt fiyatlarına sahip merkezler arasında gerçekleşen uçuşlarda fazladan yakıt taşıyarak uçak yakıt maliyetini en küçüklemeyi amaçlayan problemin modeli MS Excel'de Tablo 3.1'de verilen uçak limitleri dikkate alınarak çözümlenmiştir.

Doğrusal olmayan araştırma probleminin çözümü sırasında fazladan yakıt almaya izin veren ve fazladan yakıt almaya izin vermeyen iki farklı sonuçla karşılaşılmıştır. İlk olarak Tablo 3.6’da fazladan yakıt almaya izin verilen uçuş mesafesinin 900nm, düz uçuş irtifasının 33000ft; doluluk oranının %70 ve yakıt fiyat farkının %50 olan problemin yanıt raporu verilmiştir.

Tablo 3.6 Fazladan Yakıt Taşımaya İzin Veren Problem Yanıt Raporu

Microsoft Excel 16.0 Yanıt Raporu					
Çalışma Sayfası: [900nm_FL330_Fiyat%50..xlsx]Case1_900n_Çöz					
Rapor Oluşturuldu: 10.04.2020 16:04:58					
Sonuç: Çözücü bir çözüm buldu. Tüm Kısıtlamalar ve uygunluk koşulları karşılandı.					
Çözücü Altyapısı					
Altyapı: Doğrusal Olmayan GRG					
Çözüm Süresi: 0,406 Saniye.					
Yinelemeler: 1 Alt problemler: 0					
Çözücü Seçenekleri					
Zaman Sınırı Limitsiz, Yinelemeler Limitsiz, Precision 0,000001, Otomatik Ölçeklendirme Kullan					
Yakınsama 0,00001, Popülasyon Boyutu 100, Rastgele Kök 0, İleri Türevleri, Sınır Gerektir					
En Çok Alt Problem Limitsiz, En Çok Tamsayı Çözümü Limitsiz, Tamsayı Toleransı 1%, Negatif Olmadığını Varsay					
Hedef Hücre (En Küçük)					
Hücre	Ad	İlk Değer	Son Değer		
\$B\$1	Objective Min	26344,19555	19171,07445		
Değişken Hücreleri					
Hücre	Ad	İlk Değer	Son Değer	Tamsayı	
\$B\$3	x1	15000	10641,666	Sürekli	
\$B\$4	x2	1198,334	1198,334	Sürekli	
Kısıtlamalar					
Hücre	Ad	Hücre Değeri	Formül	Durum	Serbestlik
\$E\$3	MTOW1	65023,9	\$E\$3<=\$G\$3	Farklı	776,1
\$E\$4	MTOW2	60302,234	\$E\$4<=\$G\$4	Farklı	5497,766
\$E\$5	MLW1	59103,9	\$E\$5<=\$G\$5	Farklı	1896,1
\$E\$6	MLW2	54382,234	\$E\$6<=\$G\$6	Farklı	6617,766
\$E\$7	MFW1	12703,9	\$E\$7<=\$G\$7	Farklı	6025,415
\$E\$8	MFW2	7982,234	\$E\$8<=\$G\$8	Farklı	10746,766
\$E\$9	BLOCK1	12703,9	\$E\$9>=\$G\$9	Farklı	4721,666
\$E\$10	BLOCK2	7982,234	\$E\$10>=\$G\$10	Aynı	0
\$E\$11	LEFT1	6783,9	\$E\$11>=\$G\$11	Farklı	4721,666
\$E\$12	LEFT2	3102,234	\$E\$12>=\$G\$12	Farklı	1040
\$E\$13	TANKER	4722	\$E\$13<=\$G\$13	Aynı	0

Tablo 3.6’da verilen problem çözüm raporunda görüldüğü üzere model uçağın orijin havalimanında 10.641 kg yakıt almasını, dönüşte ise sadece 1.198 kg yakıt almasına izin vermektedir. Fazladan yakıt alma kapasitesinin hepsi kullanıldığı görülmektedir.

Tablo 3.6’da verilen yanıt raporuna göre bağlayıcı kısıtların ilki; destinasyon havalimanından orijin havalimanına giderken toplam alması gereken yakıt miktarı kısıtlayıcıdır. BLOCK1 kısıtlayıcısı bağlayıcı değildir çünkü orijinden destinasyona giderken 4721 kg kapasite serbestliği vardır. Bu miktarda görüldüğü üzere fazladan yakıt kısıtlayıcısının üst limitini verir.

Tablo 3.7 Fazladan Yakıt Taşımaya İzin Veren Problem Duyarlılık Raporu

Microsoft Excel 16.0 Duyarlılık Raporu			
Çalışma Sayfası: [900nm_FL330_Fiyat%50..xlsx]Case1_900n_Çöz			
Rapor Oluşturuldu: 10.04.2020 16:05:00			
Değişken Hücreleri			
		Son	Azaltılmış
Hücre	Ad	Değer	Gradyan
\$B\$3	x1	10641,666	0
\$B\$4	x2	1198,334	0
Kısıtlamalar			
		Son	Lagrange
Hücre	Ad	Değer	Çarpan
\$E\$3	MTOW1	65023,9	0
\$E\$4	MTOW2	60302,234	0
\$E\$5	MLW1	59103,9	0
\$E\$6	MLW2	54382,234	0
\$E\$7	MFW1	12703,9	0
\$E\$8	MFW2	7982,234	0
\$E\$9	BLOCK1	12703,9	0
\$E\$10	BLOCK2	7982,234	2,245886823
\$E\$11	LEFT1	6783,9	0
\$E\$12	LEFT2	3102,234	0
\$E\$13	TANKER	4721,666	-0,599033123

Tablo 3.7’de görüldüğü üzere modelde bağlayıcı olan kısıtların Lagrange çarpanları verilmiştir. Lagrange çarpanı kısıtlı kaynağın değişmesinin amaç fonksiyonu değerini nasıl etkileyeceğini söyler, başka bir deyişle kaynağın marjinal değerini ifade eder¹¹⁵. Fazladan yakıt taşınmasına izin verilen bu çözümde destinasyondan dönüşte alınması

¹¹⁵ Erdoğan & Alptekin, 2006. **a.g.k.**, s.80

gereken yakıt miktarının 1kg artması gidiş-dönüş seferleri için toplam yakıt maliyetini 2.24\$ artıracaktır. Aynı şekilde uçağın fazladan yakıt alma kapasitesinin 1kg artması toplam yakıt maliyetini yaklaşık 0.6 \$ azaltacaktır.

Fazladan yakıt taşınmasına izin verilmeyen bir problem çözüm sonucu Tablo 3.8’de verilmiştir. Problem senaryosu 700 nm uçuş mesafesine, düz uçuş irtifası 29.000 ft, yakıt fiyat farkı %80 ve doluluk oranı %70 olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.8 Fazladan Yakıt Taşımaya İzin Vermeyen Problem Yanıt Raporu

Microsoft Excel 16.0 Yanıt Raporu					
Çalışma Sayfası: [700nm_FL290_Fiyat%80..xlsx]Case1_700n_Çöz					
Rapor Oluşturuldu: 10.04.2020 17:29:43					
Sonuç: Çözücü bir çözüm buldu. Tüm Kısıtlamalar ve uygunluk koşulları karşılandı.					
Çözücü Altyapısı					
Altyapı: Doğrusal Olmayan GRG					
Çözüm Süresi: 0,656 Saniye.					
Yinelemeler: 3 Alt problemler: 0					
Çözücü Seçenekleri					
Zaman Sınırı Limitsiz, Yinelemeler Limitsiz, Precision 0,000001, Otomatik Ölçeklendirme Kullan					
Yakınsama 0,00001, Popülasyon Boyutu 100, Rastgele Kök 0, İleri Türevleri, Sınır Gerektir					
En Çok Alt Problem Limitsiz, En Çok Tamsayı Çözümü Limitsiz, Tamsayı Toleransı 1%, Negatif Olmadığını Varsay					
Hedef Hücre (En Küçük)					
Hücre	Ad	İlk Değer	Son Değer		
\$B\$1	Objective Min	34704,98975	21991,16896		
Değişken Hücreleri					
Hücre	Ad	İlk Değer	Son Değer	Tamsayı	
\$B\$3	x1	10000	5342,5	Sürekli	
\$B\$4	x2	5342,499574	5342,49999	Sürekli	
Kısıtlamalar					
Hücre	Ad	Hücre Değeri	Formül	Durum	Serbestlik
\$E\$3	MTOW1	59724,434	\$E\$3<=\$G\$3	Farklı	5675,566
\$E\$4	MTOW2	59724,43399	\$E\$4<=\$G\$4	Farklı	5675,56601
\$E\$5	MLW1	54381,934	\$E\$5<=\$G\$5	Farklı	6618,066
\$E\$6	MLW2	54381,93399	\$E\$6<=\$G\$6	Farklı	6618,06601
\$E\$7	MFW1	7404,434	\$E\$7<=\$G\$7	Farklı	11324,881
\$E\$8	MFW2	7404,43399	\$E\$8<=\$G\$8	Farklı	11324,56601
\$E\$9	BLOCK1	7404,434	\$E\$9>=\$G\$9	Aynı	0
\$E\$10	BLOCK2	7404,43399	\$E\$10>=\$G\$10	Aynı	0
\$E\$11	LEFT1	2061,934	\$E\$11>=\$G\$11	Aynı	0
\$E\$12	LEFT2	3046,93399	\$E\$12>=\$G\$12	Farklı	984,9999899
\$E\$13	TANKER	0	\$E\$13<=\$G\$13	Farklı	5029,566

Tablo 3.8’de problem çözümü fazladan yakıt almaya izin vermemektedir. Gidiş ve dönüş seferlerinin uçuş mesafesi, yüksekliği, doluluk oranı ve uçak yakıt yakma oranını etkileyen birçok faktörün aynı olduğu düşünüldüğünden; orijin ve destinasyon havalimanlarından alınması gereken optimum yakıt miktarı eşit olmuştur. Uçağa alınması gereken toplam yakıt kısıtlayıcıları (BLOCK1, BLOCK2) sağlandıktan sonra maliyeti düşük tutmak için daha fazla yakıt alınmasına izin verilmemiştir.

Tablo 3.9 Fazladan Yakıt Taşımaya İzin Vermeyen Problem Duyarlılık Raporu

Microsoft Excel 16.0 Duyarlılık Raporu			
Çalışma Sayfası: [700nm_FL290_Fiyat%80..xlsx]Case1_700n_Çöz			
Rapor Oluşturuldu: 10.04.2020 17:29:45			
Değişken Hücreleri			
		Son	Azaltılmış
Hücre	Ad	Değer	Gradyan
\$B\$3	x1	5342,5	0
\$B\$4	x2	5342,49999	0
Kısıtlamalar			
		Son	Lagrange
Hücre	Ad	Değer	Çarpan
\$E\$3	MTOW1	59724,434	0
\$E\$4	MTOW2	59724,43399	0
\$E\$5	MLW1	54381,934	0
\$E\$6	MLW2	54381,93399	0
\$E\$7	MFW1	7404,434	0
\$E\$8	MFW2	7404,43399	0
\$E\$9	BLOCK1	7404,434	0,618699934
\$E\$10	BLOCK2	7404,43399	1,675590581
\$E\$11	LEFT1	2061,934	1,110617021
\$E\$12	LEFT2	3046,93399	0
\$E\$13	TANKER	0	0

Tablo 3.9’da bağlayıcı kısıtların lagrange çarpan değerleri ve indirgenmiş gradyan değerleri görülmektedir. Problemden destinasyon yakıt fiyatının daha fazla olması toplam yakıt kısıtlarının lagrange çarpan değerlerinin farklı olmasına neden olmuştur. Destinasyonda alınması gereken toplam yakıt miktarının 1 kg artması maliyeti 1.67 \$ etkilerken orijinde bu değer 0.62 \$’dır. Orijinde sefere başlamadan önce uçağın içinde kalan yakıt kısıtlayıcısı uçağın yine 2. havalimanından geldiği varsayılarak oluşturulmuştur. İçinde kalan yakıtın fiyatı, ağırlıklı ortalama hesabı ile yapıldığı için optimum sonucun bulunmasında etkili olmuştur.

3.6.4 Parametrik Çözüm Sonuçlarının Analizi

Parametrik olarak kurulan senaryolar ve problemleri ile fazladan yakıt taşımanın uçuş mesafelerinden, yakıt fiyat farklarından, düz uçuş yüksekliğinden ve farklı doluluk oranlarından nasıl etkilendiği araştırılmıştır.

Tablo 3.10 Parametrik Problem Çözümünün Önerdiği Fazladan Yakıt Taşıma Miktarı

KG	Düz Uçuş Yüksekliği	FL290					FL310					
		50%	60%	70%	80%	90%	50%	60%	70%	80%	90%	
300 nm	Fiyat Oranı - Doluluk Oranı											
	70%	2.665	2.665	2.665	2.665	2.665	2.718	2.718	2.718	2.718	2.718	
	80%	2.770	2.770	2.770	2.770	2.770	2.770	2.770	2.770	2.770	2.770	
	90%	1.834	1.834	0	0	0	1.859	1.859	0	0	0	
500 nm	100%	274	0	0	0	0	299	0	0	0	0	
	70%	4.030	4.030	4.030	4.030	4.030	3.925	3.925	3.925	3.925	3.925	
	80%	3.354	3.354	0	0	0	3.261	3.261	0	0	0	
	90%	1.794	0	0	0	0	1.701	0	0	0	0	
700 nm	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	70%	5.030	5.030	0	0	0	4.761	4.761	0	0	0	
	80%	3.470	3.470	0	0	0	3.201	3.201	0	0	0	
	90%	0	0	0	0	0	1.461	0	0	0	0	
900 nm	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	70%	4.794	4.794	0	0	0	4.604	4.604	0	0	0	
	80%	3.234	3.234	0	0	0	3.044	0	0	0	0	
	90%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1100 nm	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	70%	4.715	0	0	0	0	4.549	0	0	0	0	
	80%	0	0	0	0	0	2.948	0	0	0	0	
	90%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1300 nm	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	70%	3.794	0	0	0	0	4.092	0	0	0	0	
	80%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	90%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1500 nm	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	70%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	80%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	90%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tablo 3.10 (Devam) Parametrik Problem Çözümünün Önerdiği Fazladan Yakıt Taşıma Miktarı

KG	Düz Uçuş Yüksekliği	FL330					FL350				
		Fiyat Oranı - Doluluk Oranı	50%	60%	70%	80%	90%	50%	60%	70%	80%
300 nm	70%	2.665	2.665	2.665	2.665	2.665	2.665	2.665	2.665	2.665	2.665
	80%	2.718	2.718	2.718	2.718	2.718	2.665	2.665	2.665	2.665	2.665
	90%	1.762	1.762	0	0	0	1.762	1.762	0	0	0
	100%	202	0	0	0	0	202	0	0	0	0
500 nm	70%	3.715	3.715	3.715	3.715	3.715	3.715	3.715	3.715	3.715	3.715
	80%	3.267	3.267	0	0	0	3.169	3.169	0	0	0
	90%	1.707	0	0	0	0	1.609	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
700 nm	70%	4.772	4.772	4.772	0	0	4.765	4.765	4.765	4.765	4.765
	80%	3.212	3.212	0	0	0	3.222	3.212	0	0	0
	90%	1.652	0	0	0	0	1.669	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
900 nm	70%	4.722	4.722	0	0	0	4.522	4.522	0	0	0
	80%	3.162	0	0	0	0	2.962	0	0	0	0
	90%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1100 nm	70%	4.667	0	0	0	0	4.467	0	0	0	0
	80%	3.102	0	0	0	0	2.907	0	0	0	0
	90%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1300 nm	70%	4.509	0	0	0	0	4.417	0	0	0	0
	80%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	90%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1500 nm	70%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	80%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	90%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tablo 3.10 (Devam) Parametrik Problem Çözümünün Önerdiği Fazladan Yakıt Taşıma Miktarı

KG	Düz Uçuş Yüksekliği	FL370					FL390					
		Fiyat Oranı	Doluluk Oranı	50%	60%	70%	80%	90%	50%	60%	70%	80%
300 nm	70%	2.560	2.560	2.560	2.560	2.560	2.560	2.560	2.560	2.560	2.560	2.560
	80%	2.560	2.560	2.560	2.560	2.560	2.508	2.508	2.508	2.508	2.508	2.508
	90%	1.767	1.767	0	0	0	1.665	1.665	0	0	0	0
	100%	207	0	0	0	0	105	0	0	0	0	0
500 nm	70%	3.610	3.610	3.610	3.610	3.610	3.558	3.558	3.558	3.558	3.558	3.558
	80%	3.174	3.174	0	0	0	3.172	3.172	0	0	0	0
	90%	1.614	0	0	0	0	1.612	0	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
700 nm	70%	4.660	4.660	4.660	4.660	4.660	4.581	4.581	4.581	4.581	4.581	4.581
	80%	3.119	3.119	0	0	0	3.120	3.120	0	0	0	0
	90%	1.559	0	0	0	0	1.560	0	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
900 nm	70%	4.527	4.527	0	0	0	3.706	3.706	0	0	0	0
	80%	2.967	0	0	0	0	2.146	0	0	0	0	0
	90%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1100 nm	70%	4.472	4.472	0	0	0	2.594	0	0	0	0	0
	80%	2.912	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	90%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1300 nm	70%	4.417	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	80%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	90%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1500 nm	70%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	80%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	90%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tablo 3.10’da orijin havalimanı yakıt fiyatının bütün uçuşlarda destinasyon havalimanına göre daha ucuz olduğu varsayıldığında kısa mesafelerde modelin %90 yakıt fiyat oranına kadar fazladan yakıt taşımaya izin verdiği görülmüştür. Yakıt fiyat oranının daha çok %80 ve altında olduğu zamanlarda fazladan yakıt taşıma gerçekleşmiştir. 1300 nm mesafeli yakıt fiyat farkının %50 olduğunda ve doluluk oranı %70 kabul edildiğinde modelin 4.417 kg fazladan yakıt taşımaya izin verdiği gösterilmiştir.

Tablo 3.6 fazladan yakıt taşıma miktarlarına bakıldığında en uygun düz uçuş seviyesinin 33.000 ft olduğu görülmektedir. Uçak doluluk oranının yükseldiği başka bir deyişle uçaktaki ücretli yük ağırlığının arttığı seferlerde uçakta fazladan yakıt almak için yeterli kapasite bulunsa da maliyet artacağından model fazladan yakıt almaya izin vermemiştir. En fazla fazladan taşıma kapasitesi 700nm mesafede oluşmuş ve model yakıt fiyat farklarının ve doluluk oranlarının uygun olmasına bağlı olarak bazı senaryolarda fazladan yakıt taşımayı önermiştir.

Tablo 3.11 Parametrik Problem Çözümü Sonucu Fazladan Yakıt Alma ile Sağlanan Tasarruf Oranı

%	Düz Uçuş Yüksekliği	FL290					FL310				
		50%	60%	70%	80%	90%	50%	60%	70%	80%	90%
Uçuş Mesafesi	Fiyat Oranı - Doluluk Oranı										
300 nm	70%	30,50%	21,81%	14,14%	7,33%	1,23%	31,83%	23,31%	15,79%	9,11%	3,13%
	80%	31,43%	22,61%	15,30%	8,57%	2,56%	32,47%	24,03%	16,58%	9,96%	4,04%
	90%	20,72%	14,01%	0	0	0	21,76%	16,09%	0	0	0
	100%	3,17%	0	0	0	0	3,57%	0	0	0	0
500 nm	70%	31,67%	23,13%	15,59%	8,89%	2,90%	32,07%	23,58%	16,09%	9,43%	3,45%
	80%	26,34%	19,36%	0	0	0	26,62%	19,56%	0	0	0
	90%	14,06%	0	0	0	0	13,60%	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
700 nm	70%	29,53%	21,46%	0	0	0	29,35%	21,06%	0	0	0
	80%	20,21%	14,70%	0	0	0	19,20%	13,56%	0	0	0
	90%	0	0	0	0	0	9,56%	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
900 nm	70%	23,15%	23,15%	0	0	0	22,79%	16,25%	0	0	0
	80%	15,26%	15,26%	0	0	0	14,77%	0	0	0	0
	90%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1100 nm	70%	18,89%	0	0	0	0	19,12%	0	0	0	0
	80%	0	0	0	0	0	12,36%	0	0	0	0
	90%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1300 nm	70%	14,11%	0	0	0	0	14,47%	0	0	0	0
	80%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	90%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1500 nm	70%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	80%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	90%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tablo 3.11 (Devam) Parametrik Problem Çözümü Sonucu Fazladan Yakıt Alma ile Sağlanan Tasarruf Oranı

%	Düz Uçuş Yüksekliği	FL330					FL350				
		50%	60%	70%	80%	90%	50%	60%	70%	80%	90%
Uçuş Mesafesi	Fiyat Oranı - Doluluk Oranı										
300 nm	70%	31,80%	23,28%	15,76%	9,07%	5,26%	32,46%	24,01%	16,56%	9,94%	4,02%
	80%	32,68%	24,27%	16,85%	10,25%	4,34%	33,32%	24,99%	17,64%	11,10%	5,25%
	90%	21,03%	15,55%	0	0	0	21,03%	15,39%	0	0	0
	100%	2,46%	0	0	0	0	2,34%	0	0	0	0
500 nm	70%	31,31%	22,72%	15,15%	8,41%	2,39%	31,78%	23,25%	15,73%	9,04%	3,05%
	80%	27,32%	19,90%	0	0	0	26,84%	19,53%	0	0	0
	90%	14,03%	0	0	0	0	13,20%	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
700 nm	70%	30,74%	22,21%	14,65%	0	0	32,13%	23,65%	16,17%	9,51%	3,56%
	80%	20,54%	14,95%	0	0	0	21,66%	15,91%	0	0	0
	90%	10,48%	0	0	0	0	11,31%	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
900 nm	70%	25,14%	18,31%	0	0	0	23,86%	17,12%	0	0	0
	80%	16,79%	0	0	0	0	15,07%	0	0	0	0
	90%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1100 nm	70%	20,47%	0	0	0	0	19,43%	0	0	0	0
	80%	13,33%	0	0	0	0	12,47%	0	0	0	0
	90%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1300 nm	70%	17,01%	0	0	0	0	16,92%	0	0	0	0
	80%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	90%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1500 nm	70%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	80%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	90%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tablo 3.11 (Devam) Parametrik Problem Çözümü Sonucu Fazladan Yakıt Alma ile Sağlanan Tasarruf Oranı

%	Düz Uçuş Yüksekliği	FL370					FL390				
		50%	60%	70%	80%	90%	50%	60%	70%	80%	90%
Uçuş Mesafesi	Fiyat Oranı - Doluluk Oranı										
300 nm	70%	31,07%	22,45%	14,85%	8,09%	2,04%	32,43%	23,99%	16,54%	9,91%	3,99%
	80%	31,87%	23,35%	15,84%	9,16%	3,18%	30,80%	22,15%	14,52%	7,74%	1,67%
	90%	21,95%	16,07%	0	0	0	19,82%	14,17%	0	0	0
	100%	2,62%	0	0	0	0	1,30%	0	0	0	0
500 nm	70%	31,74%	23,21%	15,68%	8,98%	3,00%	30,99%	22,36%	14,75%	7,98%	1,93%
	80%	27,67%	20,13%	0	0	0	27,12%	19,45%	0	0	0
	90%	14,18%	0	0	0	0	13,96%	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
700 nm	70%	31,12%	22,51%	14,91%	8,16%	2,12%	30,52%	21,83%	14,17%	7,35%	1,26%
	80%	20,30%	14,47%	0	0	0	20,30%	14,47%	0	0	0
	90%	10,11%	0	0	0	0	9,99%	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
900 nm	70%	24,24%	17,26%	0	0	0	20,05%	14,36%	0	0	0
	80%	15,37%	0	0	0	0	11,42%	0	0	0	0
	90%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1100 nm	70%	19,76%	13,96%	0	0	0	11,50%	0	0	0	0
	80%	12,29%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	90%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1300 nm	70%	16,48%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	80%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	90%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1500 nm	70%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	80%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	90%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fazladan yakıt taşıma sonucunda artan ağırlık nedeniyle yakıt sarfiyatının arttığı gözlemlenmiştir. Artan yakıt sarfiyatı ise ek yakıt maliyetleri doğurmuştur. Fakat Tablo 3.7’de fazladan yakıt taşıma sonucunda gidiş ve geliş toplam yakıt maliyetinden ne kadar tasarruf edildiği, fazladan yakıt taşıma sonrası artan ağırlık ile oluşan ek maliyet düşülerek hesaplanmıştır. Fazladan yakıt taşıyarak maliyeti düşürme stratejisinin doluluk

oranının en düşük ve yakıt fiyat farkının en yüksek olduğu zamanda sağlandığı görülmüştür. En iyi tasarruf oranının küçük farklarla da olsa, farklı düz uçuş yükseklikleri kıyaslandığında uçuş mesafesine bağlı olarak değişkenlik gösterdiği saptanmıştır. Uçuş mesafesinin 300 nm ve 500 nm olduğu gidiş-geliş seferlerinde fazladan yakıt stratejisi ile tasarruf sağlamak için en uygun yüksekliğin 31.000 ft olduğu, fakat sefer uçuş mesafesi 700 nm'a çıktığında en uygun düz uçuş irtifasının 35.000 ft olduğu saptanmıştır.

3.6.5 İstanbul'u Merkez Alan Senaryonun Problem Çözüm Sonuçlarının Analizi

Türkiye jeopolitik konumu itibariyle nüfus yoğunluğunun fazla olduğu birçok Avrupa ve Orta Doğu'daki merkezlere yakınlığı ve burada yakıt fiyatlarının birçok merkeze oranla avantajlı olması nedeniyle İstanbul'u merkez alan bir fazladan yakıt alma uygulaması gerçekleştirilmiştir. İstanbul'dan Tablo 3.2'de verilen yakıt fiyatının daha pahalı olduğu Bratislava, Floransa, Atina, Sofya ve Bağdat havalimanlarına ve yakıt fiyatlarının daha ucuz olduğu Tahran ve Trablus'a seferler simule edilmiştir. Belirlenen merkezlere olan uçuş mesafelerinin belirlendiği uçuş rotaları Ek 7-13'de verilmiştir. Parametrik çalışmada olduğu gibi düz uçuş seviyeleri 29.000ft, 31.000ft, 33.000ft, 35.000ft, 37.000ft ve 39.000ft olarak test edilmiştir.

Tablo 3.12'de görüldüğü üzere yakıt fiyat farkının fazla ve uçuş mesafesinin fazla olmadığı beş merkeze uçak %100 doluluk oranı ile uçuyor olsa bile İstanbul'dan yakıt alarak gidilmesi önerilmektedir. Yakıt fiyat farkının daha az, uçuş mesafesinin fazla olduğu Tahran'a ve Trablus'a fazladan yakıt taşınması hiçbir doluluk oranı için önerilmemiştir. Uçuş mesafelerinin yakın olduğu seferler için fazladan yakıt taşıma miktarı uçulan farklı düz uçuş seviyelerine göre karşılaştırıldığında çok fazla farkın olmadığı görülmektedir. Daha önce verilen parametrik çalışmalara benzer şekilde uçuş mesafesi 645nm olan Bratislava'ya uçarken en yüksek fazladan yakıt taşıma kapasitesi oluşmuş ve tüm doluluk oranlarında yakıt fiyat oranının %35 olmasından dolayı fazladan yakıt taşınabilmiştir. İstanbul'da yakıt fiyatının Sofya, Atina, Bratislava, Floransa ve Bağdat şehirlerinden iki kattan daha fazla ucuz olması, neredeyse tüm senaryolarda fazladan yakıt taşınabileceğini göstermektedir. Model, kısa mesafelerde tüketilecek yakıt ve doluluk oranı az olduğunda alınan fazla yakıt sayesinde destinasyondan hiç yakıt aldırılmadan döndürmüştür.

Tablo 3.12 İstanbul Merkezli Uçuş Ağı Problem Çözümünün Önerdiği Fazladan Yakıt Taşıma Miktarı

kg	Düz Uçuş Yüksekliği						
Destinasyon, Uçuş Mesafesi ve Fiyat Oranı	Doluluk Oranı	FL290	FL310	FL330	FL350	FL370	FL390
Sofya-257nm-%44	70%	2.455	2.350	2.402	2.402	2.323	2.324
	80%	2.507	2.455	2.402	2.402	2.402	2.324
	90%	1.868	1.871	1.771	1.774	1.779	1.675
	100%	308	311	211	214	219	115
Atina-317nm-%40	70%	2.823	2.770	2.717	2.717	2.665	2.639
	80%	2.875	2.822	2.770	2.665	2.665	2.665
	90%	1.851	1.850	1.750	1.761	1.761	1.660
	100%	291	293	194	201	201	100
Bratislava-645nm-%35	70%	4.870	4.660	4.555	4.450	4.300	4.293
	80%	3.310	3.221	3.229	3.134	3.136	3.135
	90%	1.751	1.661	1.669	1.574	1.579	1.575
	100%	191	101	109	14	16	15
Floransa-900nm-%41	70%	4.793	4.604	4.721	4.522	4.527	3.706
	80%	3.233	3.044	3.161	2.962	2.967	2.146
	90%	1.673	1.484	1.601	1.402	1.407	586
	100%	0	0	0	0	0	0
Bağdat-955nm-%37	70%	4.778	4.589	4.704	4.509	4.512	3.445
	80%	3.218	3.029	3.144	2.949	2.952	1.885
	90%	1.658	1.469	1.584	1.389	1.392	325
	100%	0	0	0	0	0	0
Trablus-995nm-%59	70%	0	0	0	0	0	0
	80%	0	0	0	0	0	0
	90%	0	0	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0
Tahran-1122nm-%87	70%	0	0	0	0	0	0
	80%	0	0	0	0	0	0
	90%	0	0	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0

Tablo 3.13'te İstanbul merkezli uçuşlarda fazladan yakıt taşınması sonucu gidiş-dönüş seferi için toplam yakıt maliyetinden normal yakıt alınan uçuşa göre ne kadar tasarruf sağlandığını göstermektedir.

Tablo 3.13 İstanbul Merkezli Uçuş Ağı Problem Çözümü Sonucu Fazladan Yakıt Alma ile Sağlanan Tasarruf Oranı

	Düz Uçuş Yüksekliği						
Destinasyon, Uçuş Mesafesi ve Fiyat Oranı	Doluluk Oranı	FL290	FL310	FL330	FL350	FL370	FL390
Sofya-257 nm-%44	70%	37,42%	36,68%	38,06%	37,71%	37,01%	37,12%
	80%	37,21%	37,40%	37,71%	37,71%	37,69%	37,35%
	90%	12,69%	28,33%	26,69%	27,31%	28,68%	25,85%
	100%	4,64%	2,65%	2,67%	3,36%	3,59%	1,80%
Atina-317nm-%40	70%	41,61%	41,05%	40,47%	41,57%	41,55%	40,95%
	80%	41,10%	42,13%	42,12%	41,54%	41,54%	41,08%
	90%	26,67%	27,20%	25,77%	26,84%	27,36%	25,30%
	100%	4,24%	4,36%	2,41%	3,11%	3,17%	1,02%
Bratislava-645nm-%35	70%	46,95%	46,84%	47,11%	47,39%	46,84%	46,52%
	80%	31,56%	32,09%	33,19%	32,95%	33,46%	33,22%
	90%	16,61%	16,43%	17,17%	16,57%	16,68%	16,35%
	100%	1,83%	1,01%	1,13%	0,15%	0,18%	0,16%
Floransa-900 nm-%41	70%	29,50%	29,27%	31,81%	30,53%	31,15%	25,68%
	80%	19,59%	18,98%	21,21%	19,51%	19,91%	14,64%
	90%	9,73%	8,97%	10,83%	9,13%	9,33%	3,91%
	100%	0	0	0	0	0	0
Bağdat-955 nm-%37	70%	31,42%	31,24%	33,49%	32,80%	33,21%	25,60%
	80%	21,03%	20,33%	22,27%	21,12%	21,22%	13,87%
	90%	10,80%	9,57%	11,28%	9,91%	9,87%	2,45%
	100%	0	0	0	0	0	0
Trablus-995nm-%59	70%	0	0	0	0	0	0
	80%	0	0	0	0	0	0
	90%	0	0	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0
Tahran-1122nm-%87	70%	0	0	0	0	0	0
	80%	0	0	0	0	0	0
	90%	0	0	0	0	0	0
	100%	0	0	0	0	0	0

Tablo incelendiğinde en yüksek tasarrufun; en az doluluk oranı ve en yüksek fiyat farkı olduğu seferlerde toplam yakıt maliyetinden %40'lar seviyesinde bir tasarruf oranı görülmüştür. 645nm mesafeli Bratislava uçuşunda en fazla tasarrufun sağlandığı görülmüştür. Düz uçuş seviyelerinin arasında çok büyük farklar olmasa da fazladan yakıt taşıma ile tasarruf için en uygun düz uçuş irtifasının 33.000ft ve 35.000ft olduğu söylenebilir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Havayolu yönetiminde yakıt maliyetleri, giderlerin en büyük kısmını oluşturan elemandır. Bu çalışmada fazladan yakıt taşıma operasyonel uygulaması doğrusal olmayan programlama problemi modellenmiş ve yakıt fiyat farklarının yüksek olduğu merkezler arasında gerçekleşecek seferlerde her havalimanından yakıt maliyetini eniyileyen optimum yakıt alma miktarlarına belirlenmesine destek olacak bir uçuş planlama uygulaması önerilmiştir. Problemlerin çözümü için GİG metodu kullanılmış ve hepsinde global optimal sonuca ulaşılmıştır. Çözücü olarak MS Excel eklentisi kullanılmıştır.

Çalışmanın uygulama kısmında fazladan yakıt taşımanın en uygun olduğu koşulların değerlendirilebilmesi için senaryolar geliştirilmiş ve merkezler arasında gerçekleşecek seferin uçuş mesafesinin, yakıt fiyat oranının, düz uçuş yüksekliğinin ve doluluk oranının fazladan yakıt taşımaya etkisi parametrik olarak gösterilmiştir. Uçuş yapılacak merkezler arasındaki yakıt fiyat oranı %50'nin üzerinde ve doluluk oranı %70'in üzerinde ise 1300nm ve üzeri uçuş mesafeleri için fazladan yakıt taşıma toplam yakıt maliyetini artıracaktır. Merkezler arasındaki uçuş mesafesi kısaltıkça; yakıt fiyat farklarının az ve doluluk oranları yüksek olsa da fazladan yakıt taşınabileceği görülmüştür. Uçuş mesafesi 300nm'in üzerinde olduğu durumlarda eğer doluluk oranı %80 ve üzeri, yakıt fiyat oranı %70 ve üzerinde ise bu uçuşlar için fazladan yakıt taşıma yapılması maliyeti artıracaktır. Problem çözüm sonuçları incelendiğinde, düz uçuş irtifasının fazladan yakıt taşıma miktarına fazla etkisi olmadığı görülmüştür. Fakat yakıt sarfiyatı açısından, en verimli uçuş seviyelerinin fazladan yakıt taşıma miktarını artırdığı gözlemlenmiştir.

Araştırma probleminin önerdiği fazladan yakıt taşıma ile yakıt sarfiyatında ortalama %3-3,5 artış olduğu gözlemlense de fazladan yakıt taşınmadan gerçekleşecek uçuşlara göre gidiş-geliş seferlerinin toplam yakıt maliyetinden, fiyat farkının artmasıyla doğru orantılı ve doluluk oranının artmasıyla ters orantılı olarak %2'lerden %30'lara kadar tasarruf edilebileceği gösterilmiştir.

Oluşturulan model İstanbul merkezli bir uçuş ağı senaryosu üzerine uygulanmıştır. Gerçekte yakın olan merkezler arasında büyük yakıt farklılıkları olabileceğinden bu uygulama önemlidir. İstanbul'daki yakıt fiyatının Sofya, Atina, Floransa, Bratislava ve Bağdat gibi şehirlere oranlara iki kat veya daha fazla ucuz olması sayesinde, modelin bu

merkezler arasında hemen hemen tüm doluluk oranlarında fazladan yakıt taşımaya izin verdiği görülmüştür. Fazladan yakıt taşıma ile gidiş-dönüş seferlerinin toplam yakıt maliyetinden %2 ile %47 arasında tasarruf sağlamayı başarmıştır.

Problemin çözümü sırasında kısıtların sağ taraf değerleri Lagrange çarpanı değeri ile yorumlanması sonucunda az yakıt tüketen verimli ve yük taşıma kapasitesi yüksek olan uçaklar ile fazladan yakıt taşıma uygulandığında daha çok tasarruf sağlanabileceği görülmüştür. Üretilen yeni nesil uçakların bu özellikleri taşımaları nedeniyle havayolu firmaları fazladan yakıt taşıma uygulaması ile yakıt maliyetinden daha çok tasarruf edilebilecektir.

Yazılan bu tezin uygulamasında Airbus A319 uçağı temel alınmıştır. Yakıt tahmini için ise uçağın üretici tarafından yazılan FCOM kullanılmıştır. Daha kesin sonuçlara ulaşmak için FCOM'dan daha hassas yakıt tahmini yapan hesaplama veya yazılımlardan faydalanılabilir ve havayolu şirketleri uçuş planlama yazılımlarını dış kaynak kullanmadan kendileri geliştirebilirler.

Oluşturulan senaryolarda, çeşitli hava durumları, rüzgâr, havalimanı yükseltisi, düz uçuş sırasında uçuş seviyesi değiştirme gibi unsurlar işlem karmaşıklığını artıracığından göz ardı edilmiştir. Ayrıca uçağın ulaştığı destinasyondan tekrar orijine döndüğü varsayılmıştır. Varsayılan bu durum geleneksel havayolu işletmelerinin ağ yapısına uygun olsa da, düşük maliyetli, charter, bölgesel havayolları ve hava kargo taşıyıcılarının ağ yapıları farklılık gösterebilir. Bu araştırmaya ek olarak fazladan yakıt taşıma çalışmalarında uçak yakıt sarfiyat tahmini yaparken varsayılan hava koşullarının etkisi üzerinde durulabilir. Ayrıca kurulan model tüm ağ yapılarının ihtiyacını karşılayacağından; fazladan yakıt taşıma uygulamasının düşük maliyetli havayolu, charter havayolu, bölgesel havayolu ve hava kargo taşıyıcı ağ yapılarına uygulanabilir.

KAYNAKÇA

- Abadie, J. (Ed.), 1970. *Nonlinear Programming*. North Holland, Amsterdam.'dan aktaran
Arora, J. S. (2017). *Introduction To Optimum Design*. Academic Press, 4. Baskı.
Elsevier.
- Abadie, J., & Carpentier, J. (1969). Generalization Of The Wolfe Reduced Gradient
Method To The Case Of Nonlinear Constraints. In: Fletcher, R. (ed.)
Optimization, Proceedings of a Symposium Held at University of Keele, 1968, pp.
37–47. Academic Press, London
- Abdelghany, K., Abdelghany, A., & Raina, S. (2005). A model for the airlines' fuel
management strategies. *Journal of Air Transport Management*, 11(4), s. 199-206.
- Ackert, S. (2013). *Aircraft payload-range analysis for financiers*. Aircraft Monitor: San
Francisco, CA, USA.
- Adamson, R., Hobbs, M., Silcock, A., & Montague, G. (2015). Real Time Optimisation
Of Industrial Gas Supply Networks. *IFAC-PapersOnLine*, 48(8), 355-360.
- Air Transport Department Cranfield University, (2008). *Fuel and Air Transport;
European Commission*, s. 1.
- Airbus, S. A. S. (1998). *Getting to Grips with Cost Index*. Flight Operations Support &
Line Assistance, (2).
- Airbus, S. A. S. (2004). *Getting to grips with Fuel Economy*. Flight Operations Support
& Line Assistance, (4)
- Airbus, S. A. S. (2011). *A319-Airplane Characteristics for Airport Planning AC*.
- Airbus. (2016) Safety First, *The Airbus Safety Magazine*.21 s. 9.
- Avery, D. (2010). The evolution of flight management systems. *IEEE software*, 28(1), s.
11.
- Battal, Ü., ve Mühim, S. A. (2016). Havayolu Taşımacılığında Yakıt Anlaşmalarında
Riskten Korunma Yöntemleri ve Türkiye Uygulaması. *Finans Politik &
Ekonomik Yorumlar*, 53(611), s. 49.
- Burghouwt, G. (2016). *Airline network development in Europe and its implications for
airport planning*. Routledge.
- Carter, D. A., Rogers, D. A., & Simkins, B. J. (2006). Does hedging affect firm value?
Evidence from the US airline industry. *Financial management*, 35(1), s. 53-86.
- Darnell, D. W., & Loflin, C. (1977). National airlines fuel management and allocation
model. *Interfaces*, 7(2), s. 1-16.
- Delipınar, E. (2001). *Modern Yolcu Uçaklarında Uçuş Yönetim Sistemine (FMS) Girilen
Maliyet Katsayısı (Cost Index) Analizi*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi.
Eskişehir: Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Deo, V. A., Silvestre, F. J., & Morales, M. (2020). The Benefits Of Tankering Considering Cost Index Flying And Optional Refuelling Stops. *Journal of Air Transport Management*, 82, 101726.
- Doganis, R., (2002). *Flying Off Course: The Economics of International Airlines*. Psychology Press.
- Erdoğan, N. K., & Alptekin, N. (2006). *Lineer Olmayan Programlama Problemleri*. Anadolu Üniversitesi Yayınları, Eskişehir. s. 53.
- EUROCONTROL. (2019). *Fuel Tankering: Economic Benefits And Environmental Impact*. Aviation Intelligence Unit - Think Paper, s. 5.
- European Commission. (2008). Commission Regulation (EC) No 859/2008 of 20 August 2008 amending Council Regulation (EEC) No 3922/91 as regards common technical requirements and administrative procedures applicable to commercial transportation by aeroplane. *Official Journal of European Union*.
- Frank, S., Steponavice, I. & Rebennack, S. (2012). Optimal Power Flow: A Bibliographic Survey I. *Energy Syst* 3, 221–258. s. 236-237.
- Gerede, E. (2010). The Evolution of Turkish Air Transport Industry: Significant Developments and the Impacts of 1983 Liberalization. *Journal of Management & Economics*, 17(2), s. 75.
- Gerede, E., & Orhan, G. (2015). Türk havayolu taşımacılığındaki ekonomik düzenlemelerin gelişim süreci. E. Gerede (Ed.) içinde (s. 169-170). *Havayolu taşımacılığı ve ekonomik düzenlemeler teori ve Türkiye uygulaması*, Ankara: Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü Yayınları.
- Gilani, M., & Körpe, D. S. (2019). Effect of Ambient Temperature Variations on the Direct Operating Cost of a Domestic Flight. *Journal of Aeronautics and Space Technologies*, 12(2), s. 197-207.
- Guerreiro Fregnani, J. A. T., Müller, C., & Correia, A. R. (2013). A fuel tankering model applied to a domestic airline network. *Journal of Advanced Transportation*, 47(4), s. 386-398.
- Harris, F. D. (2005). *An economic model of US airline operating expenses*, National Aeronautics and Space Administration (NASA).
- Holloway, S. (2008). *Straight and Level: Practical Airline Economics: Practical Airline Economics*. Routledge.
- Hsu, C. I., & Eie, W. Y. (2013). Airline network design and adjustment in response to fluctuation in jet fuel prices. *Mathematical and Computer Modelling*, 58(11-12), 1791-1803.
- Hubert, T. vd., (2015). Tankering Fuel on US Air Force Transport Aircraft: An Assessment of Cost Savings (No. RR-837-AF). *Rand Project Air Force Santa Monica Ca*.

- ICAO (2009) Available Capacity And Average Passenger Mass. Tenth Sesiion Of The Statistics Division. Montreal, s. 5.
- ICAO. (2018). *Annex 6–Operation of aircraft. Part I–International Commercial Air Transport–Aeroplanes*, 11. Baskı, Montreal, s. 4-12.
- International Civil Aviation Organization. (1993). *Manual of the ICAO Standard Atmosphere: Extended to 80 Kilometres (262 500 Feet)* (Vol. 7488). International Civil Aviation Organization.
- Kocamaz, M., & Çiçekli, U. G. (2014). Pastörize Likit Yumurta Üretim Planı Optimizasyonu. *Dokuz Eylül Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi*, 15(1), 1-12.
- Lasdon, L. S., Fox, R. L., & Ratner, M. W. (1974). Nonlinear Optimization Using The Generalized Reduced Gradient Method. *Revue Française D'automatique, Informatique, Recherche Opérationnelle. Recherche Opérationnelle*, 8(V3), 73-103.
- Lasdon, L. S., Waren, A. D., Jain, A., & Ratner, M. (1978). Design and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear programming. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, 4(1), 34-50
- Lim, S. H., & Hong, Y. (2014). Fuel hedging and airline operating costs. *Journal of air transport management*, 36, s. 33-40.
- Lufthansa AG (2003): Data via Email Rothmann V. Lufthansa, Frankfurt'den aktaran Helms, H., & Lambrecht, U. (2007). The potential contribution of light-weighting to reduce transport energy consumption. *Int. J. Life Cycle Assess*, 12(1), s. 58-64.
- McConnachie, D., Wollersheim, C., & Hansman, R. J. (2013). *The impact of fuel price on airline fuel efficiency and operations*. In 2013 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (p. 4291).
- Memiş, M. Ü., ve Tüm, K. (2015). Döviz Cinsinden Alımlarda Döviz Alım Opsiyonları ve Riskten Korunma Muhasebesi. *Journal of Accounting & Finance*, s. 46.
- Morrell, P., & Swan, W. (2006). Airline jet fuel hedging: Theory and practice. *Transport Reviews*, 26(6), s. 713.
- Nocedal, J., & Wright, S. (2006). *Numerical Optimization*. Springer Science & Business Media. s.
- O'Kelly, M. E. (2012). Fuel burn and environmental implications of airline hub networks. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17(7), 555-567.
- Odoni, A., vd. (2013). *Airport systems: Planning, design, and management*. McGraw-Hill Professional.
- Osipovich, A. (2012). Airline Hedging Falling Short of Best Practices. *Energy Risk*'den aktaran Battal, Ü., ve Mühim, S. A. (2016). Havayolu Taşımacılığında Yakıt Anlaşmalarında Riskten Korunma Yöntemleri ve Türkiye Uygulaması. *Finans Politik & Ekonomik Yorumlar*, 53(611), s. 46.

- Park, Y., & O'Kelly, M. E. (2018). Examination of cost-efficient aircraft fleets using empirical operation data in US aviation markets. *Journal of Air Transport Management*, 69, 224-234.
- Rao, S. S. (2009). *Engineering Optimization: Theory and Practice*. 4. Baskı. John Wiley & Sons. s. 412-418
- Rudd, K., Foderaro, G., & Ferrari, S. (2013). A Generalized Reduced Gradient Method For The Optimal Control Of Multiscale Dynamical Systems. *In 52nd IEEE Conference on Decision and Control* (pp. 3857-3863). IEEE.
- Rudd, K., Foderaro, G., Zhu, P., & Ferrari, S. (2017). A Generalized Reduced Gradient Method For The Optimal Control Of Very-Large-Scale Robotic Systems. *IEEE Transactions on Robotics*, 33(5), 1226-1232.
- Rutner, S. M., & Brown, J. H. (1999). Outsourcing as an airline strategy. *Journal of Air Transportation World Wide*. 4(2). s. 26.
- Ryerson, M. S., & Hansen, M. (2013). Capturing the impact of fuel price on jet aircraft operating costs with Leontief technology and econometric models. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 33, 282-296.
- Sadraey, M. H. (2017). *Aircraft performance: an engineering approach*. CRC Press
- Sarılgan, A.E. vd. (2016) *Havayolu Yönetimi*, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, Açıköğretim Fakültesi Yayını.
- Sharma, R., & Glemmestad, B. (2013). On Generalized Reduced Gradient Method With Multi-Start And Self-Optimizing Control Structure For Gas Lift Allocation Optimization. *Journal of Process Control*, 23(8), 1129-1140.
- Smith, S., & Lasdon, L. (1992). Solving Large Sparse Nonlinear Programs Using GRG. *ORSA Journal on Computing*, 4(1), 2-15.
- Speciale, R. C. (2006). *Fundamentals of Aviation Law*. McGraw-Hill.
- Stroup, J. S., & Wollmer, R. D. (1992). A fuel management model for the airline industry. *Operations Research*, 40(2), s. 229-237.
- Toplu, M. S., & Körpe, D. S. (2018). Genel İndirgenmiş Gradyan Metodu ile Eniyileme Çözücüsü Geliştirilmesi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(3), 960-969.
- Training, A. *A319/A320/A321 Flight Crew Operating Manual*, Operating Limitations. Airbus FCOM, 3, 70.
- Tuncer, B., & Aydoğan, K. (2019). Yakıt Maliyetlerinin Taşınan Hava Kargo Miktarı Üzerine Etkileri: 2007-2018 Türkiye Örneği. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, s. 146-147.
- Türk Hava Kuvvetleri (2007) *Meteoroloji* (1. Baskı) 2. Ana Jet Üs Komutanlığı, İzmir, s. 17.

https://investor.turkishairlines.com/documents/ThyInvestorRelations/IR_PRESENTATION_1Q2019TR_vF2.pdf (Erişim Tarihi 03.07.2019)

https://www.iata.org/contentassets/3b5a413027704ce08976fe1890fb43e2/acmg_flyer_flyer_2014_2015.pdf (Erişim Tarihi: 11.07.2019)

<https://www.exxonmobil.com/en/aviation/products-and-services/products/jet-a-jet-a-1> (Erişim Tarihi 16.10.2019)

<https://corporatefinanceinstitute.com/resources/knowledge/trading-investing/crack-spread/> (Erişim Tarihi 20.10.2019)

https://www.eia.gov/dnav/pet/pet_pri_spt_s1_d.htm (Erişim Tarihi 20.10.2019)

<https://skyvector.com/> (Erişim tarihi: 16.12.2019)

<http://aeroportos.weebly.com/fuel-prices.html#.XfdHkugzbIW> (Erişim tarihi: 14.02.2020)

<https://www.iata.org/contentassets/08ea7f485007409d998575257c822ee9/passenger-analysis-jun-2019.pdf> (Erişim Tarihi: 06.03.2020)

http://www.flugzeuginfo.net/acdata_php/acdata_a319_en.php Erişim Tarihi:(13.03.2020)

<https://airinsight.com/total-ground-time-a-key-operational-metric-for-airlines/> (Erişim Tarihi: 13.03.2020)

<https://www.airliners.net/aircraft-data/airbus-a319/22> (Erişim Tarihi: 13.03.2020)

<https://www.predictivemobility.com/family-A319> (Erişim Tarihi: 13.03.2020)

<https://www.solver.com/smooth-nonlinear-technology> (Erişim Tarihi: 24.03.2020)

EK-1: Yakıt Hesaplama Tablosu

A319 A320 A321 <small>FLIGHT CREW OPERATING MANUAL</small>	FLIGHT PLANNING	2.05.15	P 4
	CALCULATION TABLES	SEQ 001	REV 22

1	(1) Max TO Weight at BRAKE RELEASE	▼	▶					•	
2	WEIGHT Overhead Destination		▶					•	
3	- Temperature Correction for CRUISE		-					•	
4	+ Correction for Low Air Conditioning		+					•	
5	- CLIMB correction		-					•	
6	+ TO Altitude correction		+					•	
7	- STEP CLIMB correction		-					•	
8	= Corrected Weight Overhead Destination		=					•	
9	+ DESCENT correction (including 6 min IFR)		+					•	
10	(2) Landing Weight at Destination		=					•	
11	- ALTERNATE Fuel		-					•	
12	= ALTERNATE Landing Weight		=					•	
13	- HOLDING		-					•	
14	= Weight at END OF HOLDING		=					•	
15	TRIP FUEL (1) - (2)							•	//////////
16	- "En Route" Reserve		-					•	
17	(3) ZERO FUEL WEIGHT		=					•	
18	- OPERATING WEIGHT EMPTY		-					•	
19	= Max Allowable Payload		=					•	

BLOCK FUEL CALCULATION									
20	Required Fuel (1) - (3)		▶					•	
21	+ Taxi		+					•	
22	= Block Fuel		=					•	

FLIGHT TIME CALCULATION (H. MIN)									
23	Time from integrated Cruise Tables		▶					•	
24	+ CLIMB Correction		+					•	
25	+ DESCENT Correction (including 6 min IFR)		+					•	
26	= Flight Time		=					•	

Note : Line 3 : temperature correction :

$$0.015 \text{ (kg/}^\circ\text{C/NM)} \times \Delta\text{ISA (}^\circ\text{C)} \times \text{air distance (NM)} \text{ or}$$

$$0.033 \text{ (lb/}^\circ\text{C/NM)} \times \Delta\text{ISA (}^\circ\text{C)} \times \text{air distance (NM)}$$

Line 6 : TO altitude correction :

$$0.5 \text{ (kg/1000 kg/1000 ft)} \times \text{TOW (1000 kg)} \times \text{airport elevation (1000 ft)} \text{ or}$$

$$0.5 \text{ (lb/1000 lb/1000 ft)} \times \text{TOW (1000 lb)} \times \text{airport elevation (1000 ft)}$$

Line 10 : Check that landing weight at destination is lower than maximum landing weight.

Line 17 : Check that the zero fuel weight is lower than maximum zero fuel weight.

Line 22 : Check that the block fuel value is lower than maximum tank capacity.

EK-2A: Düz Uçuş Yakıt Sarfiyatı

A319 A320 A321 <small>FLIGHT CREW OPERATING MANUAL</small>	FLIGHT PLANNING	2.05.30	P 2
	INTEGRATED CRUISE	SEQ 220	REV 27

R

INTEGRATED CRUISE										
MAX. CRUISE THRUST LIMITS NORMAL AIR CONDITIONING ANTI-ICING OFF				ISA CG=33.0% TAS= 462KT		DISTANCE (NM) TIME (MIN)		M.78 FL290		
WEIGHT (1000KG)	0	.2	.4	.6	.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8
40	0 0	36 5	73 9	109 14	145 19	182 24	218 28	254 33	290 38	326 42
42	363 47	399 52	435 57	471 61	507 66	543 71	579 75	615 80	651 85	687 89
44	723 94	759 99	795 103	831 108	867 113	903 117	939 122	975 127	1011 131	1046 136
46	1082 141	1118 145	1154 150	1189 155	1225 159	1261 164	1297 169	1332 173	1368 178	1403 182
48	1439 187	1475 192	1510 196	1546 201	1581 206	1617 210	1652 215	1688 219	1723 224	1759 229
50	1794 233	1829 238	1865 242	1900 247	1935 252	1971 256	2006 261	2041 265	2076 270	2111 274
52	2147 279	2182 284	2217 288	2252 293	2287 297	2322 302	2357 306	2392 311	2427 315	2462 320
54	2497 325	2532 329	2566 334	2601 338	2636 343	2671 347	2706 352	2740 356	2775 361	2810 365
56	2845 370	2879 374	2914 379	2948 383	2983 388	3018 392	3052 397	3086 401	3121 406	3155 410
58	3190 415	3224 419	3258 423	3293 428	3327 432	3361 437	3396 441	3430 446	3464 450	3498 455
60	3532 459	3566 463	3600 468	3634 472	3668 477	3702 481	3736 486	3770 490	3804 494	3838 499
62	3872 503	3905 508	3939 512	3973 516	4007 521	4040 525	4074 529	4108 534	4141 538	4175 543
64	4208 547	4242 551	4275 556	4308 560	4342 564	4375 569	4408 573	4442 577	4475 582	4508 586
66	4541 590	4574 595	4608 599	4641 603	4674 607	4707 612	4740 616	4773 620	4806 625	4838 629
68	4871 633	4904 637	4937 642	4970 646	5002 650	5035 654	5068 659	5100 663	5133 667	5166 671
70	5198 676	5231 680	5263 684	5296 688	5328 692	5360 697	5393 701	5425 705	5457 709	5489 713
72	5522 718	5554 722	5586 726	5618 730	5650 734	5682 738	5714 743	5746 747	5778 751	5809 755
74	5841 759	5873 763	5905 767	5936 772	5968 776	6000 780	6031 784	6063 788	6094 792	6126 796
76	6157 800	6189 804	6220 808	6251 812	6283 817	6314 821	6345 825	6376 829	6407 833	6438 837
LOW AIR CONDITIONING ΔFUEL = - 0.6 %			ENGINE ANTI ICE ON ΔFUEL = + 2.5 %				TOTAL ANTI ICE ON ΔFUEL = + 4.5 %			

EK-2B: Düz Uçuş Yakıt Sarfıyatı

A319 A320 A321 <small>FLIGHT CREW OPERATING MANUAL</small>	FLIGHT PLANNING	2.05.30	P 3
	INTEGRATED CRUISE	SEQ 220	REV 27

R

INTEGRATED CRUISE										
MAX. CRUISE THRUST LIMITS NORMAL AIR CONDITIONING ANTI-ICING OFF				ISA CG=33.0% TAS= 458KT		DISTANCE (NM) TIME (MIN)		M.78 FL310		
WEIGHT (1000KG)	0	.2	.4	.6	.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8
40	0 0	39 5	78 10	117 15	156 20	195 26	234 31	273 36	312 41	351 46
42	390 51	429 56	468 61	507 66	546 72	584 77	623 82	662 87	701 92	739 97
44	778 102	817 107	855 112	894 117	933 122	971 127	1010 132	1048 137	1087 142	1125 147
46	1164 153	1202 158	1240 163	1279 168	1317 173	1355 178	1394 183	1432 188	1470 193	1508 198
48	1546 203	1584 208	1623 213	1661 218	1699 223	1737 228	1775 233	1813 238	1851 243	1888 248
50	1926 253	1964 257	2002 262	2040 267	2077 272	2115 277	2153 282	2190 287	2228 292	2266 297
52	2303 302	2341 307	2378 312	2416 317	2453 322	2491 327	2528 331	2565 336	2602 341	2640 346
54	2677 351	2714 356	2751 361	2788 366	2826 370	2863 375	2900 380	2937 385	2974 390	3010 395
56	3047 400	3084 404	3121 409	3158 414	3195 419	3231 424	3268 428	3304 433	3341 438	3378 443
58	3414 448	3451 452	3487 457	3523 462	3560 467	3596 471	3632 476	3669 481	3705 486	3741 490
60	3777 495	3813 500	3849 505	3885 509	3921 514	3957 519	3993 523	4029 528	4065 533	4101 538
62	4136 542	4172 547	4208 552	4243 556	4279 561	4315 566	4350 570	4386 575	4421 580	4456 584
64	4492 589	4527 593	4562 598	4598 603	4633 607	4668 612	4703 617	4738 621	4773 626	4808 630
66	4843 635	4878 639	4913 644	4948 649	4982 653	5017 658	5052 662	5086 667	5121 671	5156 676
68	5190 680	5225 685	5259 689	5293 694	5328 698	5362 703	5396 707	5430 712	5465 716	5499 721
70	5533 725	5567 730	5601 734	5635 739	5669 743	5702 748	5736 752	5770 756	5804 761	5837 765
72	5871 770	5904 774	5938 778	5971 783	6005 787	6038 792	6071 796	6105 800	6138 805	6171 809
74	6204 813	6237 818	6270 822	6303 826	6336 831	6369 835	6402 839	6434 844	6467 848	6500 852
76	6532 856	6565 861	6597 865	6629 869	6662 873	6694 878	6726 882	6758 886	6791 890	6823 894
LOW AIR CONDITIONING Δ FUEL = - 0.6 %			ENGINE ANTI ICE ON Δ FUEL = + 2.5 %				TOTAL ANTI ICE ON Δ FUEL = + 4.5 %			

EK-2C: Düz Uçuş Yakıt Sarfıyatı

A319 A320 A321 <small>FLIGHT CREW OPERATING MANUAL</small>	FLIGHT PLANNING	2.05.30	P 4
	INTEGRATED CRUISE	SEQ 220	REV 27

R

INTEGRATED CRUISE										
MAX. CRUISE THRUST LIMITS NORMAL AIR CONDITIONING ANTI-ICING OFF			ISA CG=33.0% TAS= 454KT			DISTANCE (NM) TIME (MIN)		M.78 FL330		
WEIGHT (1000KG)	0	.2	.4	.6	.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8
40	0 0	42 6	84 11	126 17	168 22	210 28	252 33	294 39	336 44	378 50
42	420 56	461 61	503 67	545 72	587 78	628 83	670 89	711 94	753 100	794 105
44	836 111	877 116	919 122	960 127	1002 132	1043 138	1084 143	1125 149	1166 154	1208 160
46	1249 165	1290 171	1331 176	1372 181	1413 187	1454 192	1495 198	1536 203	1576 208	1617 214
48	1658 219	1699 225	1739 230	1780 235	1821 241	1861 246	1902 252	1942 257	1983 262	2023 268
50	2064 273	2104 278	2144 284	2184 289	2225 294	2265 300	2305 305	2345 310	2385 315	2425 321
52	2465 326	2505 331	2545 337	2584 342	2624 347	2664 352	2704 358	2743 363	2783 368	2822 373
54	2862 379	2901 384	2941 389	2980 394	3019 399	3059 405	3098 410	3137 415	3176 420	3215 425
56	3254 430	3293 436	3332 441	3371 446	3410 451	3449 456	3488 461	3526 466	3565 471	3604 477
58	3642 482	3681 487	3719 492	3758 497	3796 502	3835 507	3873 512	3911 517	3949 522	3987 527
60	4025 532	4063 537	4101 542	4139 547	4177 552	4215 557	4253 562	4290 567	4328 572	4366 577
62	4404 582	4441 587	4478 592	4516 597	4553 602	4591 607	4628 612	4665 617	4702 622	4739 627
64	4776 632	4813 637	4850 641	4887 646	4924 651	4961 656	4997 661	5034 666	5071 671	5107 675
66	5144 680	5180 685	5216 690	5253 695	5289 700	5325 704	5361 709	5397 714	5433 719	5469 723
68	5505 728	5541 733	5577 738	5613 742	5648 747	5684 752	5719 756	5755 761	5790 766	5826 770
70	5861 775	5896 780	5931 784	5966 789	6001 794	6036 798	6071 803	6105 807	6140 812	6175 817
72	6210 821	6244 826	6278 830	6313 835	6347 839	6381 844	6416 849	6450 853	6484 858	6518 862
74	6552 867	6585 871	6619 875	6653 880	6686 884	6720 889	6753 893	6787 898	6820 902	6853 906
76	6887 911	6919 915	6952 919	6985 924	7018 928	7051 933	7084 937	7116 941	7149 945	7181 950
LOW AIR CONDITIONING ΔFUEL = - 0.6 %			ENGINE ANTI ICE ON ΔFUEL = + 2.5 %			TOTAL ANTI ICE ON ΔFUEL = + 4.5 %				

EK-2D: Düz Uçuş Yakıt Sarfiyatı

A319 A320 A321 <small>FLIGHT CREW OPERATING MANUAL</small>	FLIGHT PLANNING	2.05.30	P 5
	INTEGRATED CRUISE	SEQ 220	REV 27

R

INTEGRATED CRUISE										
MAX. CRUISE THRUST LIMITS NORMAL AIR CONDITIONING ANTI-ICING OFF			ISA CG=33.0% TAS= 450KT			DISTANCE (NM) TIME (MIN)		M.78 FL350		
WEIGHT (1000KG)	0	.2	.4	.6	.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8
40	0 0	45 6	90 12	135 18	180 24	225 30	270 36	315 42	360 48	405 54
42	450 60	495 66	539 72	584 78	629 84	673 90	718 96	762 102	807 108	851 114
44	896 120	940 125	984 131	1028 137	1072 143	1117 149	1161 155	1205 161	1249 167	1293 172
46	1337 178	1380 184	1424 190	1468 196	1512 202	1555 208	1599 213	1642 219	1688 225	1729 231
48	1773 237	1816 242	1859 248	1902 254	1946 260	1989 265	2032 271	2075 277	2118 283	2161 288
50	2203 294	2246 300	2289 305	2331 311	2374 317	2417 323	2459 328	2502 334	2544 340	2587 345
52	2629 351	2671 356	2713 362	2755 368	2798 373	2840 379	2881 385	2923 390	2965 396	3007 401
54	3049 407	3090 412	3132 418	3174 424	3215 429	3257 435	3298 440	3339 446	3380 451	3422 457
56	3463 462	3504 468	3545 473	3586 479	3627 484	3668 489	3708 495	3749 500	3789 506	3830 511
58	3871 517	3911 522	3951 527	3992 533	4032 538	4072 543	4112 549	4152 554	4192 559	4232 565
60	4272 570	4312 575	4351 581	4391 586	4431 591	4470 597	4510 602	4549 607	4588 612	4627 618
62	4667 623	4706 628	4744 633	4783 638	4822 644	4861 649	4900 654	4938 659	4977 664	5015 669
64	5054 674	5092 679	5130 685	5168 690	5206 695	5244 700	5282 705	5320 710	5357 715	5395 720
66	5433 725	5470 730	5507 735	5545 740	5582 745	5619 750	5656 755	5693 760	5730 765	5767 770
68	5804 775	5840 779	5877 784	5913 789	5950 794	5986 799	6022 804	6058 808	6094 813	6130 818
70	6166 823	6201 828	6237 832	6272 837	6308 842	6343 846	6378 851	6413 856	6448 861	6483 865
72	6518 870	6553 874	6587 879	6622 884	6656 888	6691 893	6725 897	6759 902	6793 907	6827 911
74	6861 916	6895 920	6929 925	6962 929	6996 934	7029 938	7063 943	7096 947	7129 951	7162 956
76	7195 960	7228 965	7261 969	7293 973	7326 978	7359 982	7391 986	7423 991	7456 995	7488 999
LOW AIR CONDITIONING ΔFUEL = - 0.6 %			ENGINE ANTI ICE ON ΔFUEL = + 2.5 %			TOTAL ANTI ICE ON ΔFUEL = + 4.5 %				

EK-2E: Düz Uçuş Yakıt Sarfıyatı

A319 A320 A321 <small>FLIGHT CREW OPERATING MANUAL</small>	FLIGHT PLANNING	2.05.30	P 6
	INTEGRATED CRUISE	SEQ 220	REV 27

R

INTEGRATED CRUISE										
MAX. CRUISE THRUST LIMITS NORMAL AIR CONDITIONING ANTI-ICING OFF			ISA CG= 33.0% TAS= 447KT			DISTANCE (NM) TIME (MIN)		M.78 FL370		
WEIGHT (1000KG)	0	.2	.4	.6	.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8
40	0 0	48 6	96 13	145 19	193 26	241 32	289 39	337 45	385 52	433 58
42	481 64	528 71	576 77	624 84	671 90	719 96	766 103	814 109	861 115	908 122
44	956 128	1003 134	1050 141	1096 147	1143 153	1190 160	1237 166	1284 172	1331 178	1377 185
46	1424 191	1470 197	1517 203	1563 210	1609 216	1656 222	1702 228	1748 234	1794 241	1840 247
48	1886 253	1932 259	1977 265	2023 271	2069 277	2115 284	2160 290	2205 296	2251 302	2296 308
50	2341 314	2386 320	2431 326	2476 332	2521 338	2566 344	2611 350	2655 356	2700 362	2745 368
52	2789 374	2834 380	2878 386	2922 392	2966 398	3011 404	3054 410	3098 416	3142 421	3186 427
54	3230 433	3273 439	3317 445	3360 451	3404 456	3447 462	3490 468	3533 474	3576 480	3619 485
56	3662 491	3705 497	3747 503	3790 508	3833 514	3875 520	3917 525	3960 531	4002 537	4044 542
58	4086 548	4128 554	4169 559	4211 565	4253 570	4294 576	4335 581	4377 587	4418 592	4459 598
60	4500 604	4541 609	4582 614	4622 620	4663 625	4704 631	4744 636	4784 642	4824 647	4864 652
62	4905 658	4944 663	4984 668	5024 674	5063 679	5103 684	5142 690	5181 695	5220 700	5259 705
64	5298 711	5336 716	5375 721	5413 726	5452 731	5490 736	5528 741	5566 747	5604 752	5642 757
66	5680 762	5717 767	5755 772	5792 777	5830 782	5867 787	5904 792	5941 797	5977 802	6014 807
68	6051 812	6087 816	6124 821	6160 826	6196 831	6232 836	6268 841	6304 845	6340 850	6375 855
70	6411 860	6446 865	6482 869	6517 874	6552 879	6587 883	6622 888	6656 893	6691 897	6726 902
72	6760 907	6795 911								
74										
76										
LOW AIR CONDITIONING ΔFUEL = - 0.6 %			ENGINE ANTI ICE ON ΔFUEL = + 2.5 %			TOTAL ANTI ICE ON ΔFUEL = + 4.5 %				

EK-2F: Düz Uçuş Yakıt Sarfıyatı

A319 A320 A321 <small>FLIGHT CREW OPERATING MANUAL</small>	FLIGHT PLANNING	2.05.30	P 7
	INTEGRATED CRUISE	SEQ 220	REV 27

R

INTEGRATED CRUISE										
MAX. CRUISE THRUST LIMITS NORMAL AIR CONDITIONING ANTI-ICING OFF				ISA CG=33.0% TAS= 447KT		DISTANCE (NM) TIME (MIN)		M.78 FL390		
WEIGHT (1000KG)	0	.2	.4	.6	.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8
40	0 0	51 7	102 14	154 21	205 27	256 34	307 41	358 48	409 55	460 62
42	510 68	561 75	611 82	662 89	712 96	763 102	813 109	863 116	913 122	963 129
44	1013 136	1063 143	1113 149	1162 156	1212 163	1261 169	1311 176	1360 182	1409 189	1458 196
46	1508 202	1556 209	1605 215	1654 222	1703 228	1752 235	1800 241	1848 248	1897 254	1945 261
48	1993 267	2041 274	2089 280	2137 287	2185 293	2233 299	2280 306	2328 312	2375 319	2423 325
50	2470 331	2517 338	2564 344	2611 350	2658 356	2704 363	2751 369	2797 375	2844 381	2890 388
52	2936 394	2982 400	3028 406	3074 412	3120 418	3166 425	3211 431	3256 437	3301 443	3347 449
54	3392 455	3437 461	3481 467	3526 473	3571 479	3615 485	3660 491	3704 497	3748 503	3792 509
56	3836 514	3879 520	3923 526	3966 532	4009 538	4053 544	4096 549	4138 555	4181 561	4224 566
58	4266 572	4309 578	4351 583	4393 589	4435 595	4477 600	4518 606	4559 611	4601 617	4642 623
60	4684 628	4724 634	4765 639	4806 645	4847 650	4887 655	4927 661	4967 666	5007 672	5047 677
62	5088 682	5127 688	5166 693	5206 698	5245 703	5285 709	5323 714	5362 719	5400 724	5439 729
64	5477 735	5516 740	5554 745	5593 750						
66										
68										
70										
72										
74										
76										
LOW AIR CONDITIONING ΔFUEL = - 0.6 %			ENGINE ANTI ICE ON ΔFUEL = + 2.5 %			TOTAL ANTI ICE ON ΔFUEL = + 4.5 %				

EK-3: Tırmanış Düzeltme Tablosu

A319 A320 A321 <small>FLIGHT CREW OPERATING MANUAL</small>	FLIGHT PLANNING	2.05.30	P 23
	INTEGRATED CRUISE	SEQ 220	REV 27

CLIMB CORRECTION

The planner must correct the values for the fuel and the time obtained from the integrated cruise tables with the numbers given in the following tables. The tables which are established for M.78 and long range speed, take into account climbing from the brake release point at 250kt/300kt/M.78.

M.78 and LONG RANGE SPEED

R

CORRECTION ON FUEL CONSUMPTION (1000 KG)									
FL	WEIGHT AT BRAKE RELEASE (1000 KG)								Time Correction
	50	54	58	62	66	70	74	78	
390	0.8	0.9	0.9	1.0	–	–	–	–	4 min
370	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	–	–	4 min
350	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1	5 min
330	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.1	5 min
310	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	5 min
290	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	5 min
270	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	5 min
250	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	4 min
200	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	4 min
150	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	3 min
100	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	3 min

STEP CLIMB CORRECTION

R When the flight includes one or more step climbs (2000 feet below FL290, 4000 feet above), apply a correction of 70 kg per step climb to the fuel consumption.

EK-4: Alçalış Düzeltme Tablosu

A319 A320 A321 FLIGHT CREW OPERATING MANUAL	FLIGHT PLANNING	2.05.30	P 24
	INTEGRATED CRUISE	SEQ 220	REV 27

DESCENT CORRECTION

Correct the fuel and time values determined in the integrated cruise tables as follows to take into account the descent down to 1500 feet followed by a 6 minute IFR approach and landing.

R

CORRECTION ON FUEL CONSUMPTION (1000 KG)								
FL	WEIGHT OVERHEAD DESTINATION (1000 KG)							Time Correction
	46	50	54	58	62	66	70	
390	0	0.1	0.1	0.2	0.2	–	–	10 min
370	0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	10 min
350	0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	10 min
330	0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	10 min
310	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	10 min
290	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	10 min
270	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	10 min
250	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	10 min
200	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	9 min
150	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	8 min
100	0	0	0	0	0	0	0	8 min

EK-5A: Yedek Yakıt Tablosu

A319 A320 A321 <small>FLIGHT CREW OPERATING MANUAL</small>	FLIGHT PLANNING	2.05.50	P 2
	ALTERNATE	SEQ 220	REV 27

R

ALTERNATE PLANNING FROM DESTINATION TO ALTERNATE AIRPORT GO-AROUND : 80 KG - CLIMB : 250KT/300KT/M.78 - CRUISE : LONG RANGE DESCENT : M.78/300KT/250KT - VMC PROCEDURE : 60 KG (4MIN)									
REF. LDG WT AT ALTERNATE = 50000 KG				ISA		FUEL CONSUMED (KG)			
NORMAL AIR CONDITIONING				CG = 33.0 %					
ANTI-ICING OFF						TIME (H.MIN)			
AIR DIST. (NM)	FLIGHT LEVEL						CORRECTION ON FUEL CONSUMPTION (KG/1000KG)		
	100	120	140	160	180	200	FL100 FL120	FL140 FL160	FL180 FL200
20									
40	483 0.12						2		
60	642 0.16	615 0.16	611 0.16	612 0.16			3	3	
80	801 0.20	768 0.20	757 0.20	751 0.19	749 0.19	751 0.19	5	4	4
100	961 0.25	921 0.24	903 0.23	891 0.23	883 0.23	879 0.22	6	5	5
120	1120 0.29	1075 0.28	1050 0.27	1030 0.27	1016 0.26	1006 0.26	8	6	6
140	1280 0.33	1228 0.32	1196 0.31	1170 0.30	1149 0.30	1134 0.29	9	7	7
160	1441 0.37	1382 0.35	1343 0.35	1310 0.34	1283 0.34	1262 0.33	10	8	8
180	1601 0.41	1536 0.39	1490 0.38	1450 0.38	1417 0.37	1390 0.36	11	9	9
200	1762 0.45	1690 0.43	1637 0.42	1590 0.41	1551 0.41	1519 0.40	13	10	10
220	1923 0.49	1845 0.47	1784 0.46	1731 0.45	1685 0.44	1647 0.43	14	11	11
240	2084 0.53	1999 0.51	1931 0.50	1871 0.49	1819 0.48	1776 0.47	15	12	12
260	2246 0.57	2154 0.54	2078 0.53	2012 0.52	1953 0.52	1904 0.50	17	13	13
280	2407 1.01	2309 0.58	2226 0.57	2153 0.56	2088 0.55	2033 0.53	18	14	14
300	2569 1.05	2464 1.02	2374 1.01	2293 1.00	2223 0.99	2162 0.97	19	15	15
320	2732 1.09	2619 1.06	2522 1.04	2435 1.03	2357 1.02	2291 1.00	20	16	16
340	2894 1.13	2774 1.10	2670 1.08	2576 1.07	2492 1.06	2420 1.04	22	17	17
360	3057 1.17	2930 1.13	2818 1.12	2717 1.11	2627 1.09	2550 1.07	23	18	18
380	3220 1.21	3086 1.17	2966 1.16	2859 1.14	2762 1.13	2679 1.11	24	19	19
400	3384 1.25	3242 1.21	3115 1.19	3001 1.18	2898 1.17	2809 1.14	25	20	20
420	3548 1.28	3398 1.25	3263 1.23	3142 1.22	3033 1.20	2939 1.17	27	21	21
440	3712 1.32	3554 1.28	3412 1.27	3284 1.25	3169 1.24	3069 1.21	28	22	22
460	3876 1.36	3710 1.32	3561 1.30	3426 1.29	3305 1.27	3199 1.24	29	23	23
480	4040 1.40	3867 1.36	3710 1.34	3569 1.33	3440 1.31	3329 1.27	30	24	24
500	4205 1.44	4024 1.39	3859 1.38	3711 1.36	3576 1.34	3460 1.31	31	25	25
LOW AIR CONDITIONING ΔFUEL = - 0.5 %			ENGINE ANTI ICE ON ΔFUEL = + 3.5 %			TOTAL ANTI ICE ON ΔFUEL = + 6.5 %			

EK-5B: Yedek Yakıt Tablosu

A319 A320 A321 <small>FLIGHT CREW OPERATING MANUAL</small>	FLIGHT PLANNING	2.05.50	P 3
	ALTERNATE	SEQ 220	REV 27

R

ALTERNATE PLANNING FROM DESTINATION TO ALTERNATE AIRPORT GO-AROUND : 80 KG - CLIMB : 250KT/300KT/M.78 - CRUISE : LONG RANGE DESCENT : M.78/300KT/250KT - VMC PROCEDURE : 60 KG (4MIN)								
REF. LDG WT AT ALTERNATE=50000KG					ISA		FUEL CONSUMED (KG)	
NORMAL AIR CONDITIONING					CG = 33.0 %		TIME (H.MIN)	
ANTI-ICING OFF							CORRECTION ON FUEL CONSUMPTION (KG/1000KG)	
AIR DIST. (NM)	FLIGHT LEVEL					FL230	FL310	FL390
	230	270	310	350	390	FL270	FL350	
100	880 0.22					6		
120	999 0.25	1005 0.24				7		
140	1119 0.28	1113 0.28				8		
160	1238 0.32	1221 0.31	1226 0.30			9	10	
180	1358 0.35	1330 0.34	1324 0.33	1332 0.32		9	11	
200	1477 0.38	1438 0.37	1422 0.36	1423 0.35		10	12	
220	1597 0.41	1546 0.40	1521 0.39	1515 0.38		11	13	
240	1717 0.44	1655 0.43	1619 0.42	1606 0.41	1608 0.40	12	14	14
260	1836 0.48	1763 0.46	1718 0.45	1698 0.44	1695 0.43	12	15	16
280	1956 0.51	1872 0.49	1817 0.48	1790 0.47	1782 0.46	13	16	17
300	2076 0.54	1980 0.52	1915 0.51	1882 0.50	1869 0.48	14	17	18
320	2197 0.57	2089 0.55	2014 0.54	1974 0.52	1955 0.51	15	18	19
340	2317 1.01	2198 0.58	2113 0.57	2066 0.55	2042 0.54	16	19	20
360	2437 1.04	2307 1.01	2212 1.00	2158 0.58	2130 0.57	16	20	22
380	2558 1.07	2416 1.04	2311 1.03	2251 1.01	2217 0.59	17	21	23
400	2678 1.10	2525 1.07	2410 1.06	2343 1.04	2304 1.02	18	22	24
420	2799 1.13	2635 1.10	2510 1.09	2436 1.07	2392 1.05	19	23	25
440	2920 1.16	2744 1.14	2609 1.12	2528 1.10	2479 1.07	20	24	26
460	3041 1.20	2853 1.17	2708 1.15	2621 1.12	2567 1.10	20	25	28
480	3162 1.23	2963 1.20	2808 1.18	2714 1.15	2654 1.13	21	26	29
500	3283 1.26	3073 1.23	2908 1.21	2807 1.18	2742 1.15	22	27	30
LOW AIR CONDITIONING ΔFUEL = - 0.5 %					ENGINE ANTI ICE ON ΔFUEL = + 3.5 %		TOTAL ANTI ICE ON ΔFUEL = + 6.5 %	

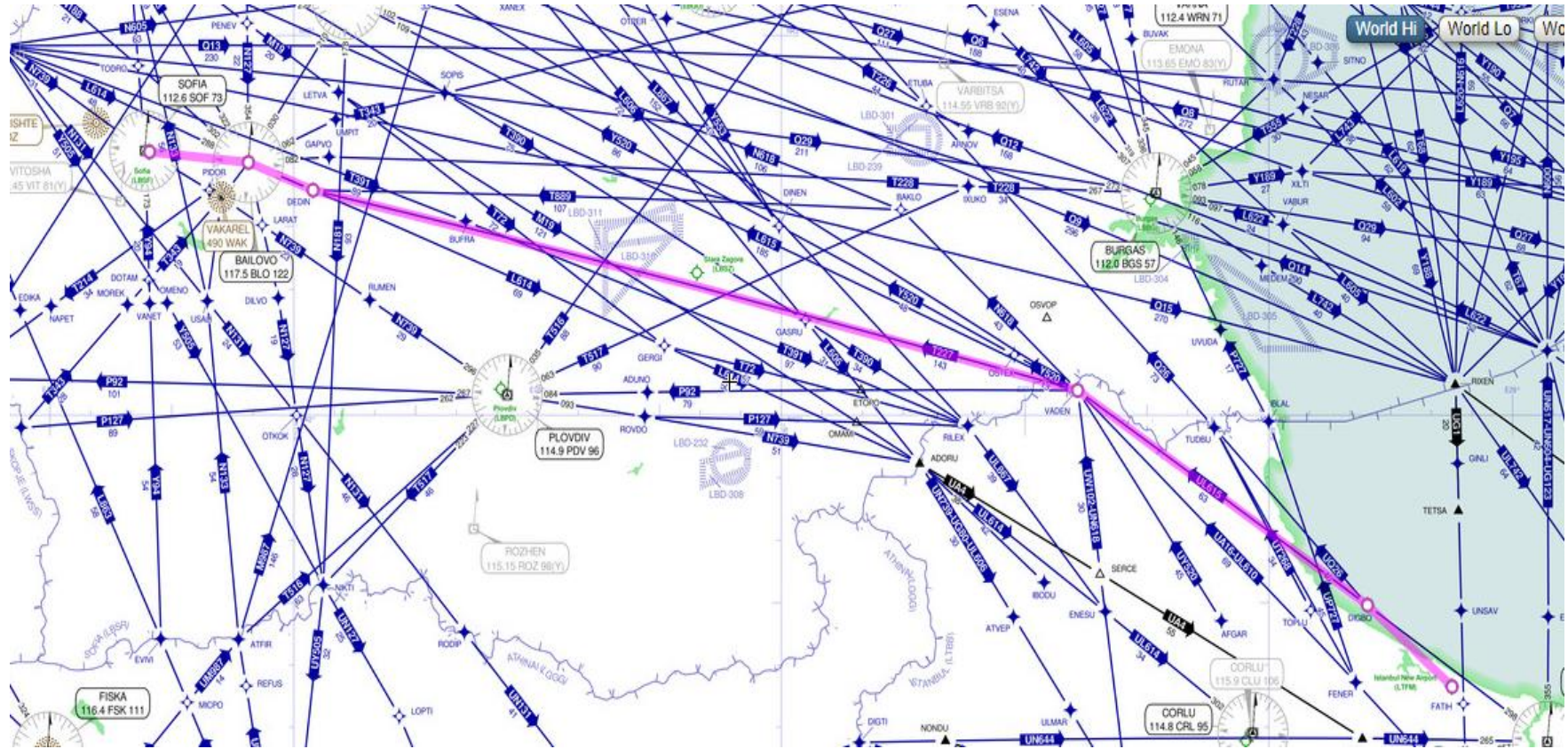
EK-6: Bekleme Yakıt Tablosu

A319 A320 A321 <small>FLIGHT CREW OPERATING MANUAL</small>	IN FLIGHT PERFORMANCE	3.05.25	P 2
	HOLDING	SEQ 280	REV 31

R

RACE TRACK HOLDING PATTERN - GREEN DOT SPEED								
MAX. CRUISE THRUST LIMITS CLEAN CONFIGURATION NORMAL AIR CONDITIONING ANTI-ICING OFF						ISA CG=33.0%		N1 (%) FF (KG/H/ENG)
WEIGHT (1000KG)	FL 15	FL 50	FL100	FL140	FL180	FL200	FL220	FL250
44	44.6 889	46.7 869	50.0 848	52.8 835	56.1 821	57.7 813	59.3 807	61.9 797
46	45.5 924	47.7 907	51.0 885	53.8 872	57.3 856	58.7 848	60.3 841	63.2 829
48	46.4 960	48.7 945	51.9 922	54.9 908	58.2 891	59.7 884	61.4 877	64.4 861
50	47.2 997	49.7 981	52.8 958	56.0 943	59.1 926	60.7 918	62.5 909	65.5 890
52	48.1 1035	50.4 1017	53.7 995	57.1 979	60.1 962	61.7 953	63.6 941	66.4 917
54	49.0 1074	51.2 1054	54.7 1033	58.1 1016	61.0 997	62.7 985	64.6 973	67.4 946
56	49.9 1110	52.0 1091	55.6 1069	58.9 1051	61.9 1030	63.7 1017	65.7 1002	68.3 974
58	50.7 1147	52.8 1127	56.5 1105	59.7 1086	62.8 1063	64.7 1048	66.6 1029	69.2 1004
60	51.3 1184	53.5 1163	57.5 1142	60.5 1122	63.8 1094	65.7 1079	67.4 1057	70.1 1034
62	52.0 1220	54.3 1201	58.5 1180	61.3 1156	64.7 1126	66.6 1107	68.3 1086	71.0 1065
64	52.7 1256	55.1 1239	59.3 1216	62.1 1189	65.7 1157	67.4 1134	69.1 1115	71.8 1097
66	53.4 1293	55.9 1278	60.0 1251	62.9 1222	66.6 1186	68.2 1163	70.0 1145	72.6 1130
68	54.2 1330	56.8 1315	60.7 1287	63.8 1255	67.4 1214	69.0 1192	70.8 1175	73.4 1164
70	54.9 1369	57.6 1353	61.4 1320	64.6 1287	68.1 1241	69.8 1222	71.5 1207	74.3 1199
72	55.6 1408	58.4 1391	62.1 1354	65.4 1319	68.9 1271	70.6 1252	72.3 1239	75.1 1234
74	56.3 1448	59.2 1429	62.8 1387	66.2 1348	69.6 1301	71.3 1282	73.0 1272	75.9 1272
76	57.1 1487	60.0 1467	63.5 1420	67.0 1378	70.3 1331	72.0 1314	73.7 1306	76.6 1311
LOW AIR CONDITIONING ΔFF = - 0.3 %	ENGINE ANTI ICE ON ΔFF = + 6 %		TOTAL ANTI ICE ON ΔFF = + 10 %		PER 1° ABOVE ISA ΔFF = + 0.3 %		STRAIGHT LINE ΔFF = - 5 %	

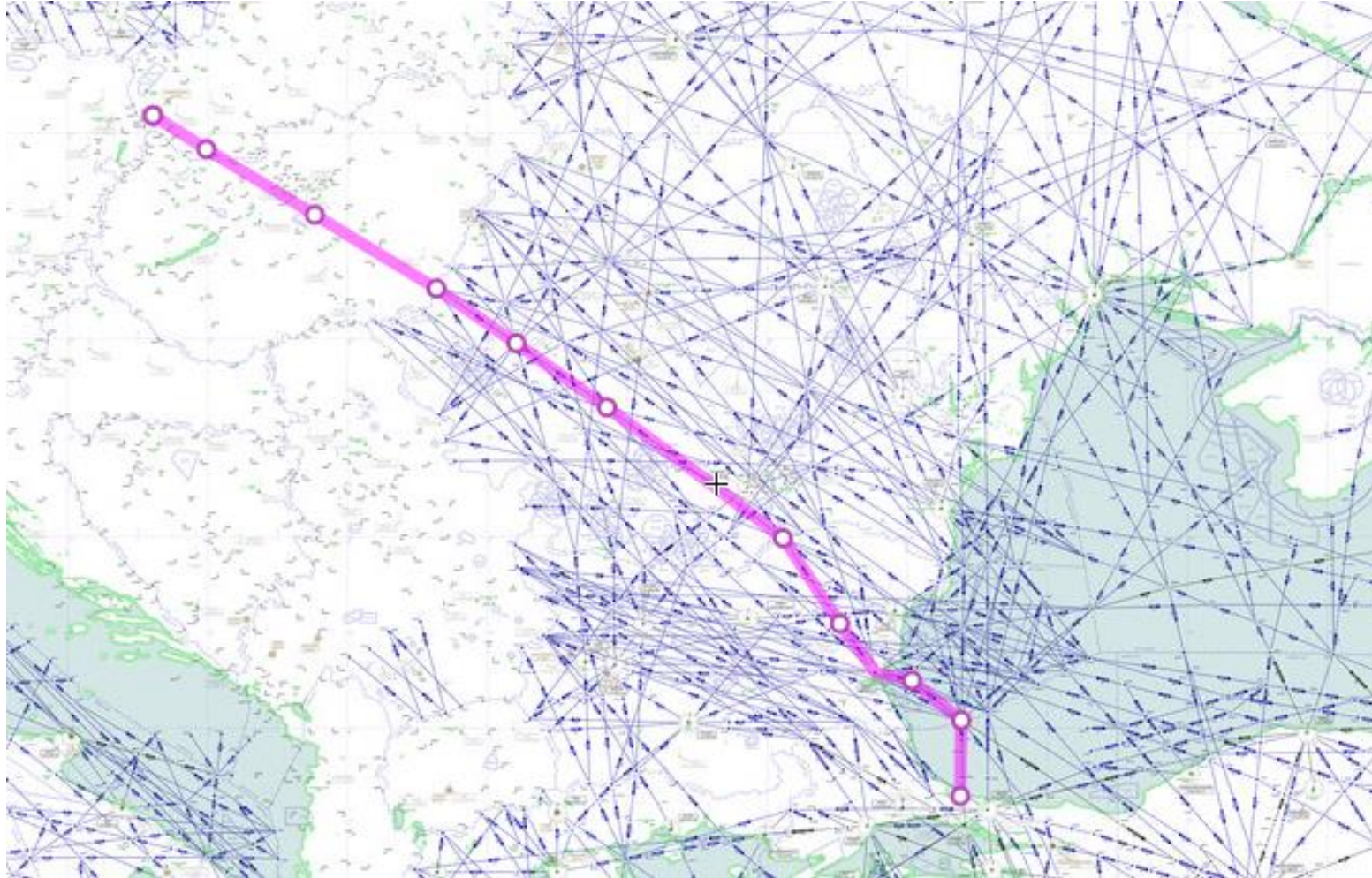
EK-7: İstanbul-Sofya Uçuş Rotası



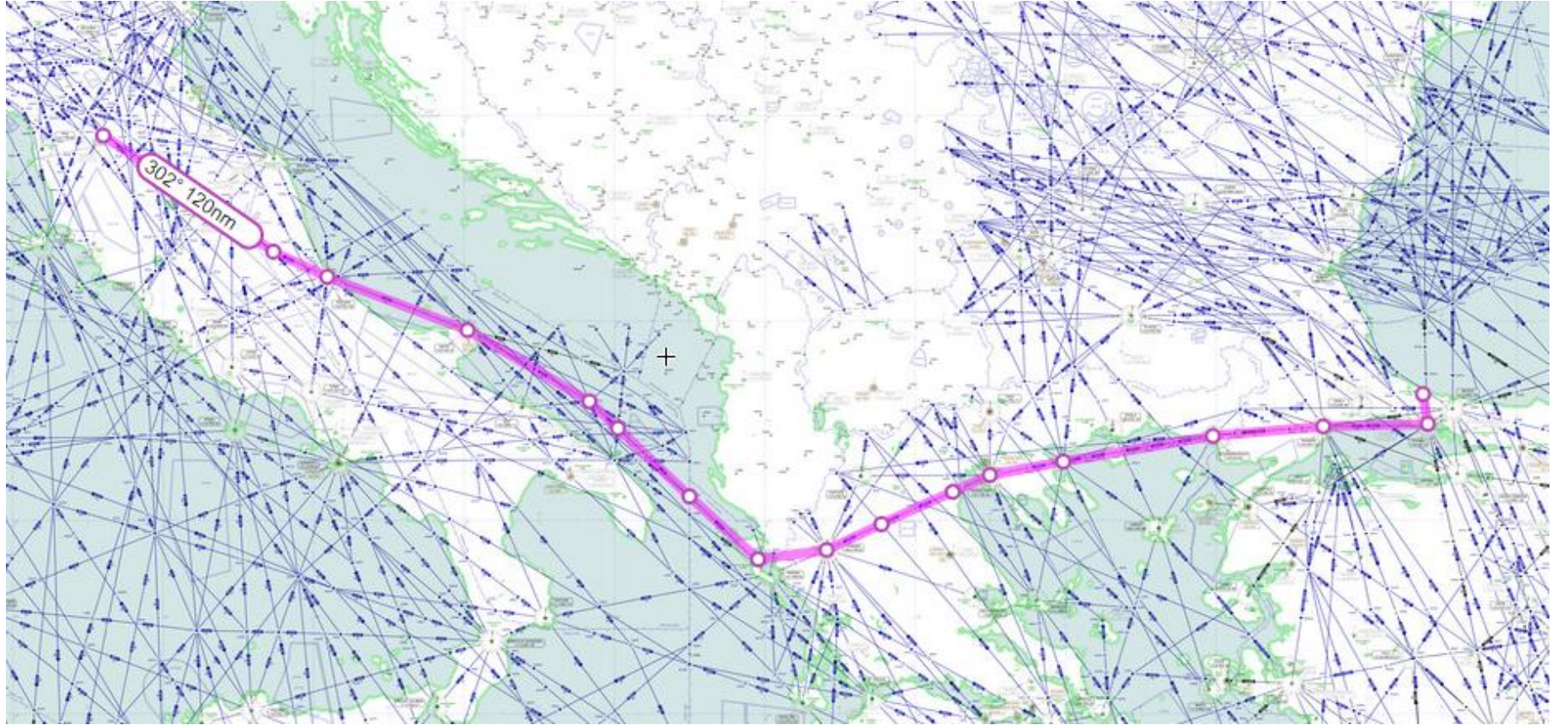
EK-8: İstanbul-Atina Uçuş Rotası



EK-9: İstanbul-Bratislava Uçuş Rotası



EK-10: İstanbul-Floransa Uçuş Rotası



EK-11: İstanbul-Bağdat Uçuş Rotası



EK-12: İstanbul-Tahran Uçuş Rotası



EK-13: İstanbul-Trablus Uçuş Rotası

