

ORTA MENZİLLİ BİR UÇAK İÇİN YAKIT MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Özlem ŞAHİN (ORCID: 0000-0002-9632-5533)^{1*}
Charkaz AGHAYEVA (ORCID: 0000-0003-0507-9785)²

¹Hava Trafik Kontrol Bölümü, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye

²İktisat Bölümü, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Muş Alparslan Üniversitesi, Muş, Türkiye

Geliş / Received: 11.24.2016

Düzeltilmelerin gelişi / Received in revised form: 20.02.2017

Kabul / Accepted: 05.04.2017

ÖZ

Bu çalışmada; orta menzilli bir uçağın (Airbus 320) uçuş rotası tırmanma, düz uçuş ve alçalma olarak üç safhaya ayrılarak uçağın dinamik yörünge profili oluşturulmuştur. Her bir uçuş safhası için BADA (Base of Aircraft Database) verileri kullanılarak matematiksel yakıt modeli geliştirilmiştir. Aynı orta menzilli uçağın, iki farklı tarifeli uçuş rotasına ait uçuş bilgileri analiz edilmiştir. Bu kapsamda planlanan uçuş mesafesi ve gerçek uçuş mesafesi arasındaki fark hesaplanmış ve bu farkın maksimum (f_{max}), minimum (f_{min}) ve ortalama (f_{ort}) değerlerine karşılık gelen rotalar için yakıt tüketim hesabı tüm uçuş safhaları için hesaplanarak elde edilen yakıt tüketimi, farklı rotalardaki aynı tip uçak için karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Uçak, yakıt tüketimi, itki, dinamik yörünge profili

MODELING OF FUEL CONSUMPTION FOR A MEDIUM RANGE AIRCRAFT

ABSTRACT

In this study, the flight path for a medium-range aircraft (A320) is analyzed in three phases as climb, cruise, descent and a dynamic trajectory flight is performed. A mathematical fuel consumption model based on Base of Aircraft Database (BADA) for each flight phase is developed. Flight path data belong to two different scheduled flight operations are examined. The deviation of actual flight distance from scheduled ones are calculated, then the fuel consumption models are improved for routes corresponding to maximum (f_{max}), minimum (f_{min}) and average (f_{ort}) value of deviations. The fuel consumption is calculated for these specific routes. Finally, the fuel consumption is compared for medium range aircraft flying different routes.

Keywords: Aircraft, fuel consumption, propulsion, dynamic trajectory profile

1. GİRİŞ

Yakıt fiyatlarının giderek artması, hava taşımacılığında yakıt tüketimini azaltarak ekonomik bir uçuş planlamasını gerektirmektedir. Yakıt tüketiminin ve dolayısıyla emisyon salınımının azalması ile, çevre üzerindeki olumsuz etkilerin de azalması beklenmektedir. Havacılık endüstrisi yakıt tüketiminden uzun yıllardır etkilenmektedir. Havayolu şirketlerinin operasyonel maliyetlerinin büyük oranını yakıtın oluşturması nedeniyle, havayolu şirketleri, uçak üretici firmaları yakıt tüketimini azaltıcı yöntemler aramaktadır.

*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: +90 222 335 0585; e-mail / e-posta: osahin5@anadolu.edu.tr

ORTA MENZİLLİ BİR UÇAK İÇİN YAKIT MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Hava trafik yönetimi açısından bakıldığında etkin ve verimli operasyonel uçuş prosedürleri bu açıdan önem kazanmaktadır. Bu amaçla, günümüzde direkt rota imkanı veren Saha Seyrüsefer (RNAV-Area Navigation) rotaları prosedür tasarımında kullanılmaktadır. Bu yöntem, uçakların yere dayalı seyrüsefer yardımcılarının üzerinden uçuşmasını gerektirmeden uyduya dayalı yol noktaları ile uçuş sağlamaktadır. RNAV uçuş rotaları ve buna dayalı Gerekli Seyrüsefer Performansı (RNP-Required Navigation Performance) gibi uyduya dayalı uçuş rotaları ile hem yatay hem de dikey uçuş mesafesinde ve dolayısıyla uçuş süresinde ve yakıt tüketiminde önemli kazançlar sağlanabilmektedir. Etkin ve verimli bu uçuş prosedürlerinin uygulaması ile uçaklar Optimum Alçalma Profillerini (OPDs-Optimized Profile Descent) uygulayabilir. Devamlı Alçalma Operasyonları (CDOs-Continuous Descent Operations) OPD'nin bir çeşidi olup, uçağın adım adım alçalarak (step-down) düşük seviyelerde uzun süre düz uçuş yapması yerine, optimum olan yüksek uçuş seviyesinde daha uzun süre kalmasına imkan tanımaktadır. Daha sonra uçak, minimum motor gücüyle devamlı olarak alçalır. Uçuş prosedürlerinin optimum şekilde tasarlanması ile hem havada hem de karadaki istenmeyen gecikmelerin yaşanması da önlenerek yakıt tüketiminden tasarruf sağlanabilmektedir [1-7].

Yakıt sarfiyatının ve dolayısıyla çevresel etkilerin minimuma indirilmesi için yakıt tüketim hesabının en doğru bir şekilde yapılması gerekmektedir. İlk olarak 1980 yılında Collins [8] havayolu şirketleri için yakıt verimliliğinin ölçülmesinde bir yakıt tüketim modeli geliştirmiştir. Daha sonra Trani ve ark. [9] yakıt tüketim tahmininde Yapay Sinir Ağı (NN-Neural Network) yöntemini kullanarak araştırmalar yapmıştır. Bu modeller, detaylı uçak aerodinamik bilgisi ve uçak operasyonları ile ilgili geniş bir veri tabanı gerektirmesi nedeniyle kısıtlı kabul görmüştür. Çevresel analizler için en yaygın kullanım kazanan mevcut yakıt tüketim modelleri, ICAO'nun İniş ve Kalkış Döngü Metodu (LTO-Landing and Take off Cycle) veya Eurocontrol'un uçak verileri manueli olan BADA (Base of Aircraft Data)'ya dayalıdır. Patterson ve ark. [10] yakın zamanda yaptıkları çalışmada, ICAO'nun "time-in-mode" yönteminin gerçek havayolu operasyonları için örnek olmadığını göstermiştir. BADA yakıt modeli, enerji dengeli itki modelini kullanır ve İtki Özgül Yakıt Sarfiyatını (TSFC-Thrust Specific Fuel Consumption), hava hızının fonksiyonu olarak modellemiştir [11]. BADA yakıt modelinin, düz uçuşta (cruise) en iyi sonuçları vererek, havayolu şirketlerinin belirttiği değerler ile %3 fark gösterdiği Maltwitz ve ark. [12] ve Lee ve ark. [13] tarafından belgelenmiştir. Terminal sahada ise, BADA yakıt modelinin, Uçuş Verisi Kayıt Sisteminden (FDR-Flight Data Record System) elde edilen yakıt tüketim değerleri ile karşılaştırılması durumunda düz uçuşa göre çok doğru sonuçlar vermediği görülmüştür. Önerilen yakıt tüketim modeli ile FDR'dan elde edilen yakıt tüketim değerleri arasındaki farklılıklar, terminal saha için mevcut yöntemin geliştirilmesi gerektiğini ortaya çıkarmıştır.

Bu çalışmada, aynı rotadaki farklı uçuş yörüngelerinin yakıt tüketimi üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, BADA verilerine dayanarak, Airbus 320 (A320) uçağının performans karakteristikleri dikkate alınmış ve tırmanma, düz uçuş ve alçalma safhaları için yakıt tüketim modeli geliştirilmiştir. Yakıt sarfiyatı, uçağın kullandığı motor tipi ve motor sayısı da ilişkilidir. A320 uçaklarında büyük oranda CFM56-5A, yüksek bypasslı bir turbofan motoru kullanılmaktadır. Bu çalışma, CFM56-5A, iki motorlu A320 için yapılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Hava seyrüsefer planlaması yapılırken, izlenmesi gereken uçuş rotası, uçuş süresi, uçuş için gerekli olan yakıt ve acil durumlarda yedek hava meydanına gidebilmesi için ya da herhangi bir bekleme durumunda kullanılması için ilave yakıt vb. hesaplanarak uçağın maksimum kalkış ağırlığı belirlenmektedir. Bu doğrultuda elde edilen uçuş bilgilerinde planlanan uçuş mesafesi mevcuttur, fakat herhangi bir durumda kontrolör müdahalesi ya da kötü hava şartları gibi sebeplerle her zaman planlanan uçuş mesafesi kadar mesafe uçulmayabilir. Bu nedenle, verilerden elde edilen gerçek uçuş mesafesi de dikkate alınmış ve değerlendirme yapılırken planlanan ve gerçek uçuş mesafeleri arasındaki fark değerleri maksimum (f_{max}), minimum (f_{min}) ve ortalama (f_{ort}) olarak incelenmiştir. f_{min} , f_{max} ve f_{ort} 'nin yakıt tüketimi üzerindeki etkileri karşılaştırılarak, yakıt tüketiminin f_{ort} için hesaplanan değerden ne kadar farklılık gösterdiği araştırılmıştır. Uçuş rotası mesafeye göre; kısa, orta ve uzun menzilli olarak sınıflandırılmaktadır. Kısa ve orta mesafeli uçuşlar için genellikle, iki motorlu dar gövdeli uçaklar kullanılırken, uzun menzilli kıtalararası uçuşlarda iki ya da dört motorlu geniş gövdeli uçaklar kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, iki motorlu dar gövdeli uçağın, tarifeli olarak gerçekleştirdiği iki farklı orta menzilli uçuş rotası incelenmiştir. Çalışmada kullanılan uçuş verileri flight-aware [15] adresinden elde edilen dört aylık veriler olup,

- planlanan uçuş mesafesi
- gerçek uçuş mesafesi deniz mili (nm) olarak
- uçuş süresi
- uçuş hızı

Ö. ŞAHİN, C. AGHAYEVA

e) tırmanma/alçalma oranı gibi uçuş bilgilerini kapsamaktadır.

Bu çalışmada, özellikle uçuş süreleri farklı olan iki uçuş rotasının analiz edilmesinin nedeni, uçuş süresinin yakıt tüketiminde gösterdiği etkinin önemini araştırmaktır. Bu amaç doğrultusunda elde edilen verilerin içerdiği parametreler arasındaki ilişki analiz edilmiştir. Farklı uçuş safhalarında etkin olan değişkenler belirlenmiştir. Değişkenler arasındaki fonksiyonel ilişki dikkate alınarak, çalışmada orta menzilli uçuşta kullanılan Airbus 320 (A320) uçağına ait BADA verileri incelenmiştir. Bu verilere dayalı olarak her safha için yakıt tüketim modeli geliştirilmiştir.

2.1. A320 için Yakıt Tüketim Modeli

Uçuşun safhaları tırmanma, düz uçuş, alçalma olarak üç ayrı bölümde incelenmiştir. Farklı uçuş safhalarındaki yakıt tüketiminde parametrelerinin etki katsayısının değişiklik gösterdiği görülmektedir. Bu analizler dikkate alınarak, her üç safha için yakıt tüketim modeli geliştirilmiştir.

Yapılan kaynak tarama çalışmasında, tüm büyük motor üreticilerinden alınan TFSC plotları, hız (M), itki (F/δ) ve irtifa (h) fonksiyonu olarak gösterilmektedir. Senzing ve Fleming [11] tarafından önerilen kalkış TFSC algoritması, bu parametreler arasındaki lineer ilişkiye ek olarak Hill ve Petersen [14]'in boyutsal analizine dayanan sıcaklık oranının (θ) karekökü ile olan bağlantısını da kullanmaktadır. Önerilen kalkış TFSC algoritması Denklem (1)'de verilmiştir.

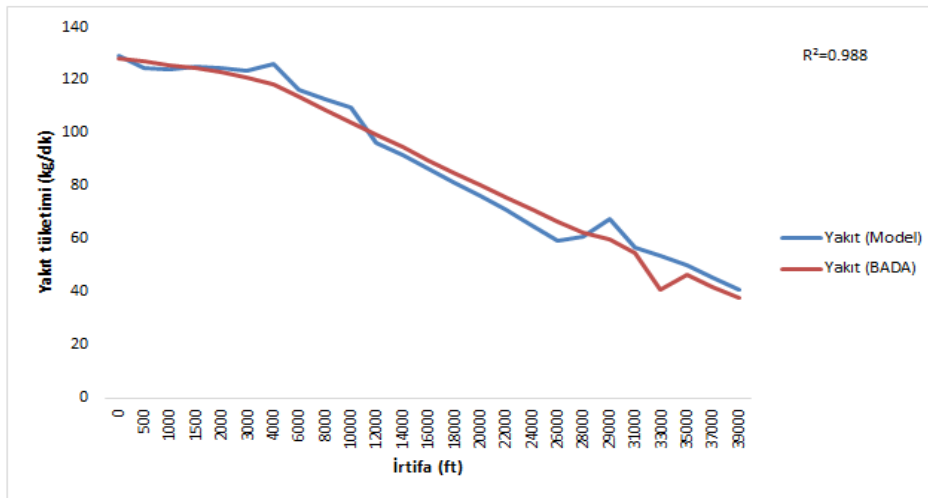
$$TSFC/\sqrt{\theta} = K_1 + K_2M + K_3h_{MSL} + K_4F/\delta \quad (1)$$

Denklem (1) için K₁, kalkış yakıt tüketim sabit katsayısı olup, K₂, K₃ ve K₄ sırasıyla hız, irtifa ve itkinin kalkış yakıt tüketim katsayılarını ifade etmektedir.

Tırmanma safhası için; irtifa değişimi, hız ve tırmanma oranı gibi parametrelerinin yakıt tüketimine olan etkisi BADA verileri kapsamında incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, belirtilen parametrelerin yakıt ile arasındaki ilişki için korelasyon analizi yapılmıştır. Yakıtın irtifa ve hız ile kuvvetli, tırmanma oranı ile ise orta düzeyde bir ilişkisi olduğu görülmüştür. SPSS programı ile eğri tahmini yöntemi kullanılarak katsayılar belirlenmiştir. Yakıtın diğer parametreler ile olan korelasyon ilişkisinin doğruluğu geliştirilen denklemin katsayıları ile tekrar ortaya konulmaktadır. Bu parametrelerin etkisi dikkate alınarak, yakıt tüketimi için Denklem (2)'deki model önerilmiştir.

$$y = 106,85 + 0,008\delta - 0,117V + 0,019\vartheta \quad (2)$$

y, yakıt tüketimini; δ, zamana göre irtifa değişimini; V, hakiki hava hızını (TAS-True Air Speed), ϑ, Tırmanma Oranını (ROC-Rate of Climb) göstermektedir. Şekil 1'de, tırmanma safhası için geliştirilen yakıt tüketim modeli ve BADA yakıt tüketimi arasındaki ilişki gösterilmektedir (R²=0,988). Önerilen yakıt tüketim modeli ile BADA yakıt tüketim verilerinin örtüşmesi modelin uygunluğunu desteklemektedir.



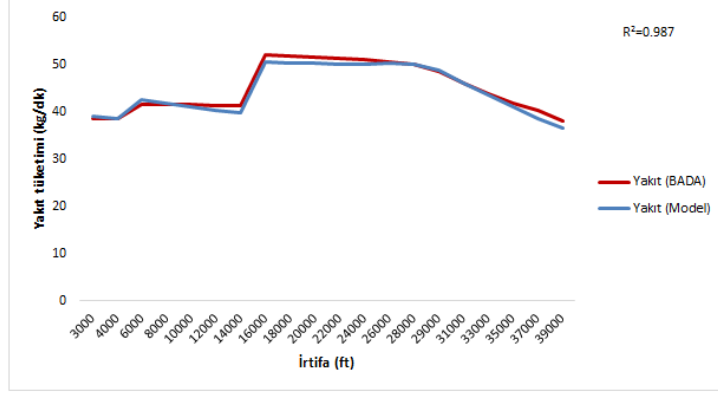
Şekil 1. Tırmanma safhası için geliştirilen yakıt tüketim modeli ve BADA yakıt tüketimi

ORTA MENZİLLİ BİR UÇAK İÇİN YAKIT MODELİNİN OLUŞTURULMASI

BADA verileri düz uçuş safhası için incelendiğinde, irtifa değişimi ile hız parametrelerinin etkisinin önemi dikkate alınarak Denklem (3)'teki yakıt tüketim modeli geliştirilmiştir.

$$y = 30,573 + 5,633 * 10^{-5} \delta + 0,039V \tag{3}$$

Alınan sonuçlar doğrultusunda elde edilen analiz sonuçları grafiksel olarak Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Düz uçuş safhası için geliştirilen yakıt tüketim modeli ve BADA yakıt tüketimi

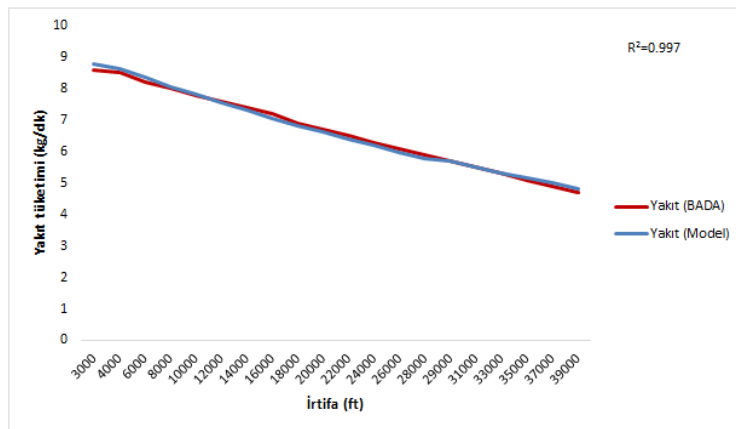
Yapılan kaynak tarama çalışmasında, Hill ve Petersen [10]’a dayalı olup, Yoder tarafından geliştirilen, terminal sahadaki geliş trafikleri için TSFC algoritması Denklem (4)’de gösterilmektedir.

$$TSFC/\sqrt{\theta} = \alpha + \beta_1 M + \beta_2 e^{-\beta_3(F/\delta/F_0)} \tag{4}$$

Burada; α , geliş yakıt tüketim sabit katsayısı olup, β_1 , β_2 , β_3 ise geliş için hız, irtifa ve itkisinin katsayılarını göstermektedir. Denklem 4’ten görüldüğü üzere; alçalma safhasında yakıt tüketiminin, hız ve alçalma oranının (ROD) fonksiyonu olan itki parametresi ve irtifa ile bağlantılı olduğu görülmektedir. Çalışmada bu ilişki dikkate alınarak, A320 için yakıt tüketim modeli Denklem (5)’teki gibi elde edilmiştir.

$$y = 9,22 e^{-1659*10^{-5} * h} \tag{5}$$

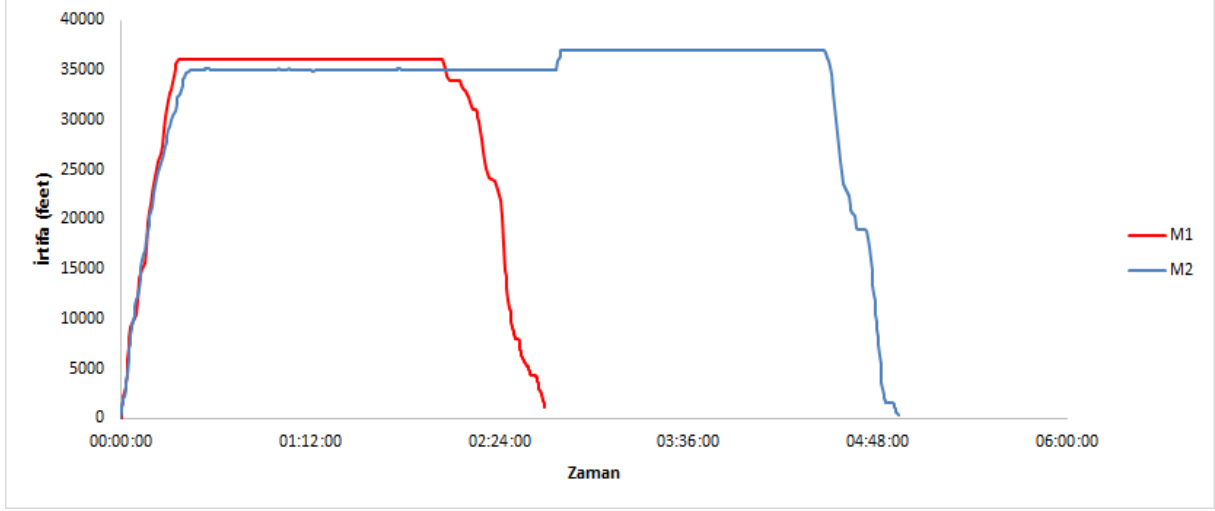
h, uçuş irtifasını ifade etmektedir. Şekil 3’te önerilen yakıt tüketim modeli ve BADA yakıt tüketimi grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.



Şekil 3. Alçalma safhası için geliştirilen yakıt tüketim modeli ve BADA yakıt tüketimi

Ö. ŞAHİN, C. AGHAYEVA

Uçuş süresinin yakıt tüketimi üzerindeki etkisini analiz etmek amacıyla seyir irtifaları birbirine yakın iki uçuş rotası seçilmiş ve uçuş profilleri incelenmiştir. Şekil 4' te yaklaşık üç saat (M1 uçuş) ve yaklaşık beş saat (M2 uçuş) süren uçuş rota profilleri gösterilmektedir.

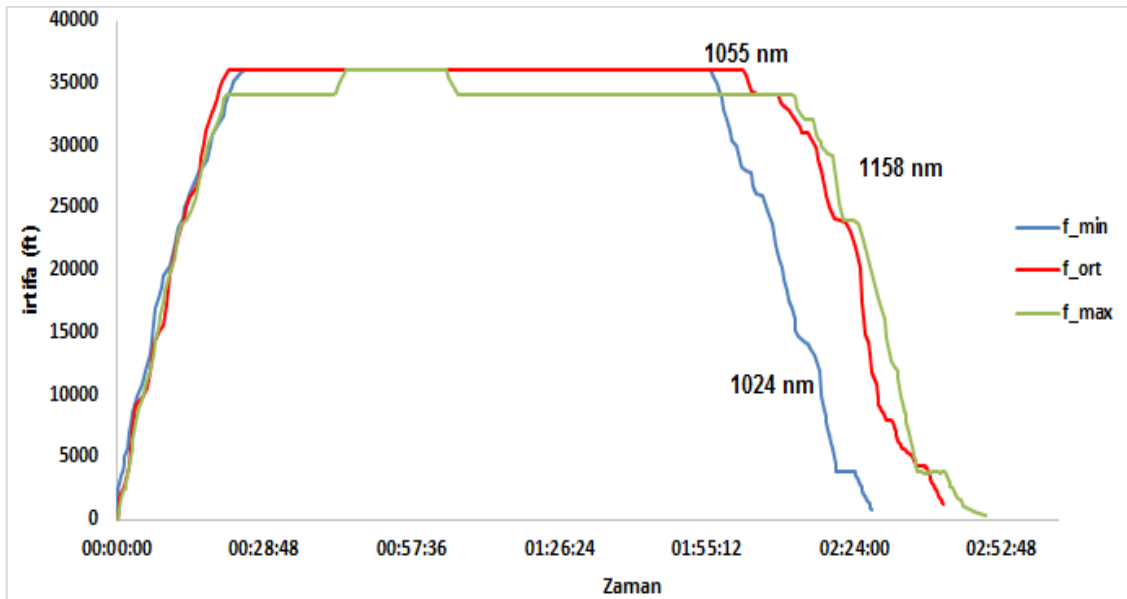


Şekil 4. M1 ve M2 uçuş rotaları

İlerleyen bölümlerde her iki uçuş rotası için f_{max} , f_{min} ve f_{ort} değerlerine karşılık gelen uçuş rotaları tırmanma, düz uçuş ve alçalma olmak üzere üç safha için ayrı ayrı incelenecektir. Bununla birlikte, farklı safhalar için geliştirilen yakıt tüketim modeli uçuş profillerine uygulanacaktır.

2.2. Orta Menzilli M1 Uçuş Rotası

M1 uçuş rotası incelendiğinde, daha önce belirtilen f_{max} , f_{min} ve f_{ort} değerlerine göre elde edilen uçuş rotası için grafikler çizilmiştir (Şekil 5). M1 rotası için planlanan uçuş mesafesi 1007 nm'dir (≈ 1867 km). Planlanan mesafe ile gerçek uçuş mesafesi arasındaki farklara bakıldığında, 1158,34 nm (≈ 2145 km), 1054,94 nm (≈ 1954 km), 1023,65 nm (≈ 1896 km) sırasıyla maksimum, ortalama ve minimum fark değerlerine karşılık gelen uçuş rotalarıdır.



Şekil 5. M1 için uçuş profili

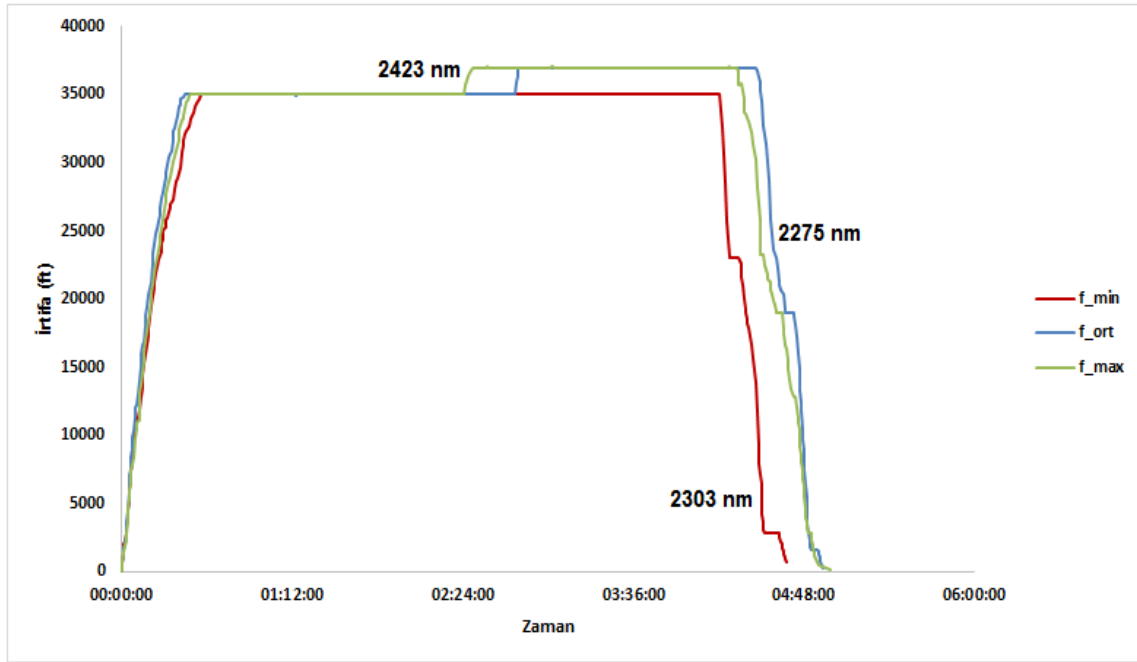
ORTA MENZİLLİ BİR UÇAK İÇİN YAKIT MODELİNİN OLUŞTURULMASI

M1 uçuş rotasında üç farklı durum (f_{max} , f_{ort} , f_{min}) için uçuş profillerinde değişimler gözlenmiştir. Bu değişimlerin her safhada yakıt tüketimi açısından farklı etkilerinin olduğu dikkate alınarak, ayrıntılı analiz yapılmasına karar verilmiştir.

2.3. Orta menzilli M2 Uçuş Rotası

Daha önce analiz edilen M1 uçuşu için planlanan mesafe (1007 nm) dört aylık uçuş verilerinde aynı olmasına rağmen, M2 uçuş rotasında planlanan uçuş mesafesi her bir uçuş için farklılık göstermektedir.

Planlanan mesafe ile gerçek uçuş mesafesi arasındaki fark değerleri incelenmiştir. Maksimum farka karşılık gelen uçuş rotasının (f_{max}) gerçek mesafesi 2422,71nm (\approx 2145 km), ortalama fark değerine karşılık gelen uçuş rotasının (f_{ort}) gerçek mesafesi 2275 nm (\approx 1954 km) ve minimum fark değerine karşılık gelen uçuş rotasının (f_{min}) gerçek mesafesi 2302,79nm (\approx 1896 km) olarak belirlenmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. M2 için uçuş profili

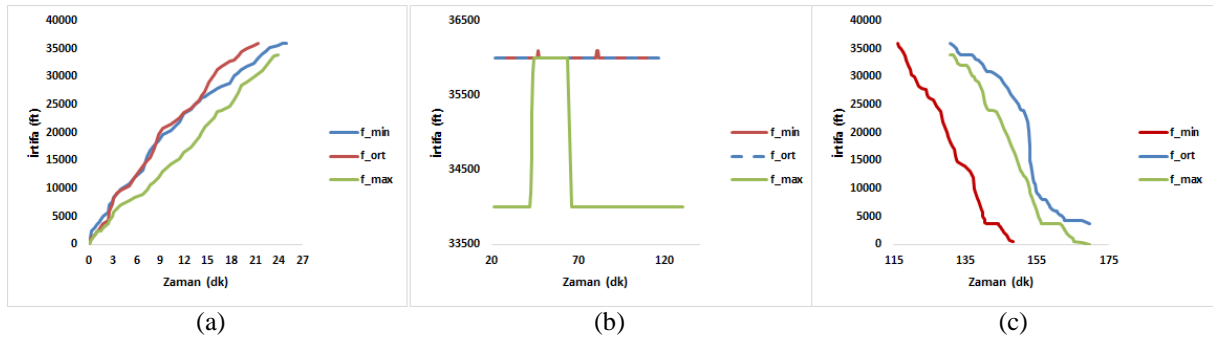
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. M1 Uçuş Rotası

M1 uçuş rotası incelendiğinde, üç farklı durum (f_{max} , f_{ort} , f_{min}) için uçuş profillerinde değişimler gözlenmiştir. Bu değişimlerin tırmanma, düz uçuş ve alçalma safhalarının her birinde A320 uçağının iki motorunun yakıt tüketimi açısından farklı etkilerinin olduğu dikkate alınarak detaylı analiz yapılmıştır. Şekil 7'de tüm uçuş safhaları için zamana bağlı uçuş profilleri verilmiştir. Tırmanma safhasında farklı durumların (f_{max} , f_{ort} , f_{min}) tırmanma oranları, düz uçuş safhasında ve alçalma safhasında ise irtifa değişimi ile ilişkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 1'de her bir uçuş safhası için uçuş süresi ve iki motor için yakıt tüketimleri gösterilmektedir. Uçuş süresi, uçuş mesafesi ve tüketilen yakıt arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada, uçulan mesafe ve planlanan uçuş mesafe için üç farklı durum ele alınmış ve analizler buna göre verilmiştir. Tablo 1'de de üç farklı duruma göre toplam yakıt tüketimine bakıldığında, uçuş süresi ya da uçuş mesafesi ile yakıt tüketiminin arasındaki ilişki tekrar kanıtlanmıştır. Bunun yanı sıra, farklı uçuş safhaları ile yakıt tüketimi üç ayrı durum için analiz edildiğinde, bu ilişkinin aynı eğilimi korumadığı görülmektedir. Bu durumu analiz etmek için, farklı parametrelerin etkisini göz önüne almak gerekmektedir.

Ö. ŞAHİN, C. AGHAYEVA



Şekil 7. a) Tırmanma safhası, b) Düz uçuş, c) Alçalma safhası

Tablo 1. Üç farklı durum için yakıt tüketimi (kg)

	Tırmanma		Düz uçuş		Alçalma		Toplam	
	Süre (dk)	Yakıt (kg)	Süre (dk)	Yakıt (kg)	Süre (dk)	Yakıt (kg)	Süre (dk)	Yakıt (kg)
f_{max}	21	1469	110	5171,23	39	522,30	170	7162,53
f_{ort}	21	1680	101	4683	40	494,54	162	6857,54
f_{min}	25	1692	91	4352	32	299,63	148	6343,63

Yukarıda belirtilen bu durumu etkileyen önemli unsurlardan birisi uçuş süresidir. Uçuş sürelerinin değişikliği göstermesi nedeniyle, yakıt tüketimi yerine yakıt tüketim akışını karşılaştırmak daha doğru olacaktır. Bu nedenle Tablo 2’de yakıt akış oranları (FF-Fuel Flow, kg/dk) verilmiştir. En yüksek yakıt tüketim akışımın tırmanma safhasında olduğu görülmektedir.

Tablo 2. Üç farklı durum için yakıt tüketimi (kg/dk)

	f_{max}	f_{ort}	f_{min}
Tırmanma	69,95	80,00	67,68
Düz uçuş	47,01	46,37	47,82
Alçalma	13,39	12,36	9,36
Toplam	42,13	42,33	42,86

Planlanan uçuş mesafesi ile gerçek uçuş mesafesi arasındaki farkın ortalamasına (f_{ort}) karşılık gelen uçuş verilerine göre uçuş süresi; en küçük fark değerindeki (f_{min}) uçuşta %8.64 azalma; en büyük fark değerindeki (f_{max}) uçuşta %4,94 artış görülmüştür. Aynı zamanda yukarıda belirtilen durumlar için yakıt değişimleri Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. F_{ort} ’a göre yakıt tüketimi değişimi (kg)

	Yakıt (kg)			
	Tırmanma	Düz uçuş	Alçalma	Toplam
f_{max}	-% 12,56	% 10,42	% 5,62	% 4,44
f_{min}	% 0,71	-% 7,06	-% 39,41	-% 7,49

Uçuş mesafesinin uzun olması durumunda yakıt tüketiminin de fazla olması beklenir. Tablo 3’te f_{max} ’ın tüm uçuşu için yakıt tüketimi f_{ort} ile karşılaştırıldığında %4,44 oranında artış olduğu görülmektedir; fakat, uçuşun safhaları ayrı ayrı olarak incelendiğinde ise, tırmanma safhasında, f_{max} ’taki yakıt tüketiminde %12,56 oranında bir azalma elde edilmiştir. Bu beklenmedik durum, uçağın tırmanma açısı, maksimum kalkış ağırlığı vb. faktörlerin yakıt tüketimi üzerinde etkisi olduğunu göstermektedir. Bu analizde, Şekil 5’teki uçuş profilleri incelendiğinde f_{ort} ’un daha yüksek bir tırmanma açısı ile tırmanması dolayısıyla yakıt tüketiminde artış olduğu söylenebilir. f_{min} için ise, toplam yakıt tüketiminin f_{ort} a göre karşılaştırılmasında beklenen azalma elde edilmiş

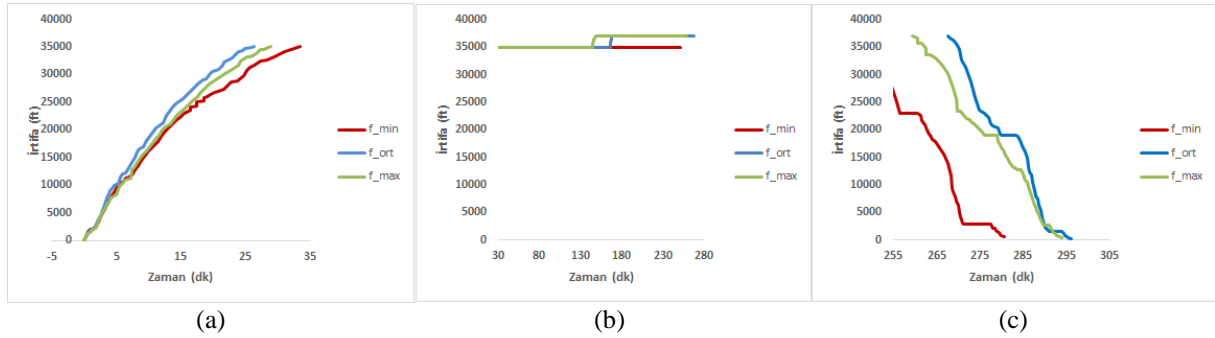
ORTA MENZİLLİ BİR UÇAK İÇİN YAKIT MODELİNİN OLUŞTURULMASI

fakat tırmanma safhasında ise yakıt tüketiminde artış görülmüştür. Her iki karşılaşılan durum değerlendirildiğinde, bu çalışmada tırmanma safhası için geliştirilen yakıt tüketim modelini etkileyen farklı faktörlerin de olduğu kanısına varılmış ve bu faktörlerin de etkisinin göz önüne alınarak bu modelin ileriki çalışmalarda iyileştirilebileceği öngörüsü elde edilmiştir.

Düz uçuş safhası ve alçalma safhasındaki toplam yakıt tüketiminin uçuş mesafesi arasında beklenen pozitif ilişki gözlenmiştir. Tablo 2’de görüldüğü gibi en az yakıt tüketimi alçalma safhasındadır. Alçalma safhasındaki yakıt tüketiminin, toplam yakıt tüketiminin değişimine olan etkisinin de en az olduğu görülmektedir (Tablo 3).

3.2. M2 Uçuş Rotası

M2 uçuş rotası detaylı olarak analiz edilmiş ve Şekil 8’ de M2 rotası için tüm uçuş safhalarındaki zamana bağlı uçuş profilleri verilmiştir.



Şekil 8. a) Tırmanma safhası, b) Düz uçuş, c) Alçalma safhası

Üç farklı durum (f_{max} , f_{ort} , f_{min}) için, tırmanma, düz uçuş ve alçalma safhalarındaki yakıt tüketimi (kg) hesaplanmıştır (Tablo 4). Ayrıca, aynı Tabloda toplam uçuş süresi, uçuş mesafesi ve yakıt tüketimi (kg) gösterilmektedir.

Tablo 4. Üç farklı durum için yakıt tüketimi (kg)

	Tırmanma		Düz uçuş		Alçalma		Toplam		
	Süre (dk)	Yakıt (kg)	Süre (dk)	Yakıt (kg)	Süre (dk)	Yakıt (kg)	Süre (dk)	Yakıt (kg)	Mesafe (nm)
f_{max}	29	2018	231	11539	35	332	295	13889	2423
f_{ort}	26	1735	242	11983	28	385	296	14103	2275
f_{min}	33	2032	219	11114	28	539	280	13685	2303

M2 rotası için toplam yakıt tüketimi uçuş süresi açısından analiz edildiğinde doğru orantılı bir ilişki gözlemlenirken, uçuş mesafesi açısından aynı şey söylenememektedir. Tırmanma ve düz uçuş safhalarında uçuş süresi ve yakıt tüketimi açısından doğru orantılı ilişki korunurken, alçalma safhasında karşılaşılan düz uçuşlar nedeniyle yakıt tüketiminin etkisinin özellikle f_{min} uçuş rotasında daha fazla yakıt tüketimine neden olduğu görülmektedir. Tablo 5’te yakıt tüketiminin analizinde daha net bilgi sağlayacak olan FF (kg/dk) verilmiştir. En yüksek yakıt tüketim akışının tırmanma, en düşük yakıt tüketim akışının da alçalma safhasında olduğu görülmektedir.

Tablo 5. Üç farklı durum için yakıt tüketimi (kg/dk)

	f_{max}	f_{ort}	f_{min}
Tırmanma	69,58	66,73	61,57
Düz uçuş	49,95	49,51	50,74
Alçalma	9,485	13,75	19,25
Toplam	47,08	47,64	48,87

Ö. ŞAHİN, C. AGHAYEVA

M2 uçuş rotasındaki her bir uçuş için planlanan uçuş mesafelerinin değişiklik göstermesi nedeniyle, M1 rotası için yapılan f_{ort} 'a göre karşılaştırılma analizi M2 rotası için anlamsız olacaktır. Bu nedenle, yakıt tüketim analizlerinin uçuş süresi göre yapılmasının daha anlamlı olacağı kanaatine varılmıştır. Uçuş süresi açısından f_{min} 'e göre analiz yapıldığında, uçuş süresi ve toplam yakıt tüketiminin doğru ilişkili olduğu görülmektedir. Aynı zamanda, bu doğru ilişki düz uçuşta korunurken, diğer safhalar için ters ilişki olduğu gözlenmiştir. Tırmanma ve alçalma safhasındaki uçuş sürelerinin az olması nedeniyle bu safhalardaki yakıt tüketiminde karşılaşılan durum (ters orantılı ilişki) toplam yakıt tüketimi ile uçuş süresi arasındaki ilişkiyi değiştirmemektedir (Tablo 6).

Tablo 6. f_{min} 'e göre uçuş süresi ve yakıt tüketim değişimi (%)

	Uçuş süresi (%)	Yakıt tüketimi (%)			
		Tırmanma	Düz uçuş	Alçalma	Toplam
f_{max}	5,36	-0,69	3,82	-38,40	1,49
f_{ort}	5,71	-14,61	7,82	-28,57	3,05

3.3. M1 ve M2 Uçuş Rotasının Karşılaştırılması

Bu çalışmanın amaçlarından biri de farklı uçuş süresinin yakıt tüketimine etkisinin araştırılması olması nedeniyle, M1 ve M2 için f_{ort} uçuş rotaları dikkate alınarak uçuş mesafe artışına göre uçuş süresi ve yakıt tüketimi arasındaki ilişki incelenmiştir (Tablo 7).

Tablo 7. M1 ve M2 için f_{ort} 'a göre uçuş süresi, mesafesi ve yakıt tüketimi

	Tırmanma		Düz uçuş		Alçalma		Toplam		
	Süre (dk)	Yakıt (kg)	Süre (dk)	Yakıt (kg)	Süre (dk)	Yakıt (kg)	Süre (dk)	Yakıt (kg)	Mesafe (nm)
F_{ort} (M1)	21	1680	101	4683	40	494.54	162	6857.54	1055
F_{ort} (M2)	26	1735	242	11983	28	385	296	14103	2275

M1 ve M2 uçuş rotaları karşılaştırıldığında, toplam mesafenin %115,64 artışı, %105,67 oranında toplam yakıt tüketimine ve %82,72 oranında ise toplam uçuş süresi artışına neden olduğu görülmüştür. Safhalara göre yakıt tüketimi analizi yapıldığında, tırmanma safhasında %3,27, düz uçuş safhasında %155,88 oranında artış; alçalma safhasında ise %22,06 oranında azalma gözlenmiştir. Analizden görüldüğü gibi uçuş süresinin değişiminin en fazla düz uçuş safhasındaki yakıt tüketimini etkilediği saptanmıştır. M1 ve M2 rotası için yakıt akışını gösteren Tablo 2 ve Tablo 5 karşılaştırıldığında ise uçuş süresi ve uçuş mesafesinin farklı uçuş safhalarındaki ve toplamdaki yakıt tüketiminde etkisinin az olduğu gözlenmiştir. Bu durumun M1 ve M2 rotası için aynı tip uçak (A320) kullanılması ile ilişkili olduğu söylenebilir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, iki motorlu dar gövdeli uçağın, tarifeli olarak gerçekleştirdiği iki farklı orta menzilli uçuş rotası incelenmiştir. Çalışmada dört aylık uçuş verileri kullanılmıştır. Uçuş süresinin yakıt tüketiminde gösterdiği etkinin önemi araştırılmıştır. Uçuş verilerinin içerdiği parametreler arasındaki ilişki analiz edilmiştir. Farklı uçuş safhalarında etkin olan değişkenler belirlenmiştir. Değişkenler arasındaki fonksiyonel ilişki dikkate alınarak her safha için yakıt tüketim modeli geliştirilmiştir.

Önerilen yakıt tüketim modeli ile BADA yakıt tüketim verileri analiz edilerek grafiksel olarak ortaya konmuştur. Grafiklerin incelenmesi sonucunda verilerin birbiri ile örtüştüğü gözlenmiş ve modelin uygunluğu kanıtlanmıştır.

M1 ve M2 uçuş rotaları incelenerek f_{max} , f_{min} ve f_{ort} değerlerine göre elde edilen uçuş rotası için grafikler verilmiştir. Önerilen model doğrultusunda, farklı safhalar için yakıt tüketim hesabı yapılmıştır. En fazla toplam yakıt tüketiminin düz uçuş safhasında (Tablo 1), en yüksek yakıt tüketim akışının (kg/dk) ise tırmanma safhasında olduğu görülmüştür (Tablo 2).

ORTA MENZİLLİ BİR UÇAK İÇİN YAKIT MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Farklı uçuş süresinin yakıt tüketimine etkisinin araştırılmasında, M1 ve M2 için f_{ort} uçuş rotaları dikkate alınmıştır. Uçuş mesafe artışına göre uçuş süresi ve yakıt tüketimi arasındaki ilişki incelenmiştir. Düz uçuş safhası ve alçalma safhasındaki toplam yakıt tüketiminin uçuş mesafesi ile beklenen pozitif ilişkisi gözlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda uçuş mesafesinin değişiminin toplam yakıt tüketimi ile yakın derece ilişkisi olduğu gözlenmiştir. Farklı safhalar açısından bakıldığında, yakıt tüketimine olan etkinin en fazla düz uçuşta olduğu görülmüştür. Düz uçuş safhasının en çok yakıt tüketiminin gerçekleştiği bölüm olması, yapılan araştırmanın önemini göstermektedir.

Yapılan çalışma sonucunda, yakıt tüketim modelinin ek parametrelerin de dikkate alınması ile iyileştirilerek geliştirilmesi kanaatine varılmıştır. İleriki çalışmalarda uçuş mesafesi ile doğru orantılı ilişkili olan uçuş süresi açısından yakıt tüketiminin analizi yapılması planlanmaktadır. Ayrıca, farklı uçak tipleri ve performans özelliklerine göre BADA verilerine dayalı yakıt tüketim modellerinin geliştirilmesi düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] CAO, Y., KOTEGAWA, T., SUN, D., DELAURENTIS, D., POST, J., “Evaluation of Continuous Descent Approach as a Standard Terminal Airspace Operation”, Ninth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, Berlin, Germany, 2011.
- [2] PINKERTON, S., “Arrival Procedures-From Standard to Tailored Arrivals”, LAX /Community Noise Roundtable, Recap of the Regular Meeting, 2013.
- [3] SAHIN, O., USANMAZ, O., “A New Standard Instrument Arrival: The Point Merge System”, Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal, 85, 136–143, 2013.
- [4] SAHIN, O., “Etkileşimli Havaalanları için Geliş Yolu Önerisi”, Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, 8, 19-26, 2015.
- [5] ROBINSON J.E., KAMGARPOUR, M., “Benefits of Continuous Descent Operations in High-Density Terminal Airspace Under Scheduling Constraints”, 10th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference, Fort Worth, Texas, 2010.
- [6] TURGUT, E.T., USANMAZ, O., CANARSLANLAR, A.O., SAHIN, O., “Energy and Emission Assessments of Continuous Descent Approach”, Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal, 82, 32–38, 2010.
- [7] SAHIN, O., TURAN, O., “Evaluation of Aircraft Descent Profile”, Energy Procedia, 95, 308-313, 2016.
- [8] COLLINS, B., “Estimation of Aircraft Fuel Consumption,” Journal of Aircraft, 19, 969–975, 1982.
- [9] TRANI, A., WING-HO, F., SCHILLING, G., BAIK, H., SESHADRI, A., “A Neural Network Model to Estimate Aircraft Fuel Consumption”, 4th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Forum, Chicago, USA, 20–22, 2004.
- [10] PATTERSON, J., NOEL, G., SENZIG, D., ROOF, C., AND FLEMING, G., “Analysis of ICAO Departure Profile Using Real-Time Cockpit Flight Data Recorder Information,” Transportation Research Board 87th Annual Meeting, 1823-1840, 2008.
- [11] SENZIG, D.A., FLEMING G.G., “Modeling of Terminal Area Airplane Fuel Consumption”, Journal of Aircraft, 46, 1089-1093, 2009.
- [12] https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/apl/research/models/sage/media/FAA-EE-2005-03_SAGE-Validation.pdf (erişim tarihi 12.10.2016).
- [13] LEE, J., WAITZ, I., KIM, B., FLEMING, G., MAURICE, L., HOLSCLAW, C., “System for Assessing Aviation’s Global Emissions (SAGE), Part 2:Uncertainty Assessment”, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 12, 381–395, 2007.
- [14] HILL, P., and PETERSEN, C., Mechanics and Thermodynamics of Propulsion, (2nd ed.), Addison-Wesley, Reading, MA, 1992.
- [15] <http://flightaware.com/> (erişim tarihi 07.10.2016).