

**HAVA TRAFİK YÖNETİMİNİN
UÇAKLARDA YAKIT TÜKETİMİ VE EMİSYONA
OLAN ETKİLERİNİN GERÇEK UÇUŞ VERİLERİNE
DAYALI ANALİZİ ve BİR MODEL ÖNERİSİ**

Ali Ozan CANARSLANLAR
Doktora Tezi

Fen Bilimleri Enstitüsü
Hava Trafik Kontrol Anabilim Dalı
Mart-2015

Bu tez çalışması Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırmalar Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 111Y048 nolu araştırma projesi kapsamında desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Ali Ozan CANARSLANLAR'ın 'Hava Trafik Yönetiminin Uçaklarda Yakıt Tüketimi ve Emisyona Olan Etkilerinin Gerçek Uçuş Verilerine Dayalı Analizi ve Bir Model Önerisi' başlıklı Hava Trafik Kontrol Anabilim Dalındaki, Doktora tezi 19/02/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Doç. Dr. ÖZNUR USANMAZ
Üye	: Prof. Dr. Tuncay DÖĞEROĞLU
Üye	: Prof. Dr. Veli ÇELİK
Üye	: Doç. Dr. Enis Turhan TURGUT
Üye	: Yard. Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

ÖZET

Doktora Tezi

HAVA TRAFİK YÖNETİMİNİN UÇAKLARDA YAKIT TÜKETİMİ ve EMİSYONA OLAN ETKİLERİNİN GERÇEK UÇUŞ VERİLERİNE DAYALI ANALİZİ ve BİR MODEL ÖNERİSİ

Ali Ozan CANARSLANLAR

**Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Hava Trafik Kontrol Anabilim Dalı**

Danışman: Doç.Dr. Öznur USANMAZ

2015, 157 sayfa

Hızla artan hava trafiği nedeniyle hava taşımacılığı endüstrisinin hava kirliliği ve iklimsel değişiklikler ile ilgili çevresel etkileri son yıllarda artış göstermiştir. Bu çevresel etkilerin azaltılması amacıyla yakıt tüketiminin ve emisyon miktarının düşürülmesinde uçak ve motor teknolojilerinin geliştirilmesinin yanı sıra hava trafik yönetimi (ATM-Air Traffic Management) verimsizliğinin de dikkate alınması gerekmektedir. Bu çalışmada; yurt içi uçuşlardaki hem yakıt tüketiminin hem de emisyon miktarının ATM ile ilişkisi gerçek verilere dayalı olarak ortaya konulmuştur. Bu amaç doğrultusunda; havaalanı çevresindeki, terminal manevra sahasındaki (TMA-Terminal Manoeuvring Area) ve yol safhasındaki yakıt tüketimleri ve buna bağlı ortaya çıkan emisyon miktarları belirlenmiştir. Havaalanı ve çevresindeki ATM uçuş verimsizliğinin belirlenmesi amacıyla İniş ve kalkış döngüsü (LTO-Landing and Take-off Cycle) safha süreleri çalışma kapsamındaki her bir havaalanı için belirlenmiş ve ICAO LTO ile kıyaslamaları yapılmıştır. TMA ve yol safhasındaki ATM uçuş verimsizliğinin belirlenmesi için yurt içi uçuşların yatay ve dikey uçuş verimsizlik analizleri yapılmıştır. Bu analizler neticesinde ATM verimsizliğinin karmaşık hesaplama yöntemleri olmadan kolay bir şekilde ölçülebilmesi amacıyla ATM uçuş verimsizlik modeli geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hava Trafik Yönetimi, Uçuş Verimsizliği, Yakıt Tüketimi, Uçak Emisyonları

ABSTRACT

PhD Dissertation

ANALYSIS OF EFFECTS OF AIR TRAFFIC MANAGEMENT ON FUEL CONSUMPTION AND AIRCRAFT EMISSIONS BASED ON ACTUAL FLIGHT DATA AND A MODEL PROPOSAL

Ali Ozan CANARSLANLAR

**Anadolu University
Graduate School of Sciences
Air Traffic Control Program**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Öznur USANMAZ

2015, 157 pages

In the last decade, air traffic has increased dramatically with a significant increase in fuel consumption and emissions. So the environmental impact air transportation has increased in recent years. Air traffic management has a fundamentally important role in reducing the environmental impacts of air transportation by reducing the inefficiencies in the paths flown by aircraft. In this study, fuel consumption and emissions in the domestic flights regarding ATM has been demonstrated based on actual flight data. Therefore, fuel consumption and aircraft emissions in the vicinity of airports, terminal manoeuvring area (TMA) and enroute were determined. In order to determine of ATM flight inefficiencies in the vicinity of airports, ICAO LTO time-in mode has been determined for every airport which are in scope of this study. Then results have been compared with results of ICAO LTO. In order to determine of TMA and enroute ATM inefficiencies, horizontal and vertical flight inefficiencies of domestic flights analyzes were conducted. In the results of these analysis model of ATM flight inefficiencies has been developed. Through this modelş ATM flight inefficiencies can be determined without complex calculations.

Anahtar Kelimeler: Air Traffic Management, Flight Inefficiency, Fuel Consumption, Aircraft Emissions

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitim sürecimin tüm aşamalarında yardım ve desteğini benden esirgemeyen, her zaman arkamda olduğu hissettiren, akademik gelişimimde büyük pay sahibi olan tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Öznur USANMAZ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme jürileri süresince önerileri ve eleştirileri ile çalışmanın son halini almasını sağlayan ve bu süreçte bilgi ve tecrübeleri ile her zaman yol gösteren değerli hocalarım Doç. Dr. Enis Turhan TURGUT ve Prof. Dr. Tuncay DÖĞEROĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Yoğun çalışma temposu içerisinde bulunduğum zaman süresince beni anlayışla karşılayarak her zaman yanımda olan sevgili eşim Remziye CANARSLANLAR'a ve hayatta vardığım her noktada büyük destek ve katkıları olan, bana olan inançlarını ve sevgilerini hiç eksik etmeyen, maddi ve manevi destekleriyle daima arkamda olan sevgili anneme, babama ve abime sonsuz teşekkür ederim.

Hazırladığım çalışmanın konu ile ilgilenenlere yararlı olmasını dileyerek saygılarımı sunarım.

Ali Ozan CANARSLANLAR
Mart 2015

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Kaynak Özetleri.....	3
1.1.1 Uçak emisyonlarının belirlenmesi ve çevresel etkileri ile ilgili çalışmalar	3
1.1.2 Havaalanı ve çevresindeki yakıt tüketimi ve emisyonların belirlenmesi ile ilgili çalışmalar	6
1.1.3 TMA ve yol safhasındaki yakıt tüketimlerinin ve emisyonların azaltılmasına yönelik yapılan çalışmalar	9
1.1.4 Uluslararası havacılık kuruluşlarının yakıt tüketim ve Emisyon konulu gerçekleştirdikleri çalışmalar	15
2. HAVA TRAFİK YÖNETİMİ VE UÇAK EMİSYONLARI	21
2.1.Hava Trafik Yönetimi	22
2.2. Uçak Emisyonları	29
2.1.1 Karbondioksit (CO ₂)	29
2.1.2 Su buharı (H ₂ O)	30
2.1.3 Azot oksit (NO _x).....	30
2.1.4 Uçucu organik bileşikler (VOC)	31
2.1.5 Karbonmonoksit (CO).....	31
2.1.6 Partikül madde (PM).....	31
2.1.7 Kükürt dioksit (SO ₂)	31
2.1.8 Ozon (O ₃)	32

2.2. Uçak Emisyonlarının Çevresel Etkisi.....	32
2.3. Uçak Emisyonlarının Çevresel Etkilerinin Hesaplanması	36
2.3.1 Basit yaklaşım	38
2.3.1.1 Seçenek A.....	38
2.3.1.2 Seçenek B.....	40
2.3.2 İleri yaklaşım.....	42
2.3.3 Karmaşık yaklaşım.....	44
2.4. Uçak Emisyonlarının Azaltılması İçin Önlemler	45
3. MATERYAL ve YÖNTEM	50
3.1. Materyal.....	51
3.2. Yöntem	61
3.2.1. Havaalanı ve çevresinde ATM etkisi	63
3.2.2. Terminal ve yol safhasındaki ATM etkisi.....	73
4. BULGULAR	84
4.1. Türkiye’deki Havaalanları İçin LTO Safha Sürelerinin, Yakıt Tüketimlerinin ve Emisyonlarının Analizi.....	84
4.1.1 Taksi-out safhası	84
4.1.2 Taksi-in safhası	88
4.1.3 Tırmanma safhası	95
4.1.4 Kalkış safhası	98
4.1.5 Yaklaşma safhası.....	103
4.2. Yurt-içi Uçuşlar İçin Terminal ve Yol Safhasında Süre ve Yakıt Tüketim Analizleri	114
4.2.1. Yurt içi uçuşlar için yatay verimsizlik analizleri	114
4.2.2. Yurt içi uçuşlar için dikey verimsizlik analizleri	124
4.2.3. Uçuş safhalarına göre yakıt tüketimi ve emisyon analizleri	126
4.3. Yurt içi ATM Uçuş Verimsizliği Modeli	129
4.3.1 Modelde kullanılacak verilerin oluşturulması.....	130
4.3.2 Normal dağılım kontrolü.....	135
4.3.3 Değişkenler arasındaki korelasyon ve regresyon	137

4.4. Modelle İlgili Bulgular	142
5. SONUÇ, TARTIŞMA ve ÖNERİLER	145
KAYNAKLAR	150

ŞEKİLLER DİZİNİ

2.1. Havacılıkta ATM'e bağlı CO ₂ seviyesi ve nedenleri	22
2.2. Hava Trafik Yönetimi Faaliyetleri	23
2.3. Havacılığın çevre üzerine etki zinciri	35
2.4. Uçuş verimsizliğine neden olan faktörler	48
3.1. Yönteme ait iş akış şeması	51
3.2. Türk hava sahası içerisinde 2011 yılına ait tüm uçuşların uçak tipine göre dağılımı	52
3.3. 2011 yılına ait THY'nin filosundaki uçak tiplerini yüzde olarak dağılımı	53
3.4. THY'nin 2011 yılında İstanbul Atatürk Havaalanı'ndan gerçekleştirdiği yurt içi uçuşların gösterimi	53
3.5. ATM uçuş verimliliği için etki diyagramı	63
3.6. ICAO Referans LTO Döngüsü.....	63
3.7. Radar vektörü ve direkt rota farkı	73
3.8. Rotalara ait en düşük yakıt tüketimlerinin belirlenmesi (örnek).....	77
3.9. Optimum ve gerçek uçuş profilleri	78
3.10. Örnek uçuşa ait optimum ve gerçek uçuş profilleri	80
3.11. Referans yakıt tüketimi için uçuşlara ait yakıt tüketimlerinin belirlenmesi (örnek)	82
4.1. Havaalanlarına ait taksi-out süreleri.....	86
4.2. Havaalanlarına ait taksi-out safhasındaki yakıt tüketimleri	87
4.3. Havaalanlarına ait 2011 yılı trafik sayısı	88
4.4. Havaalanlarına ait taksi-in süreleri.....	92
4.5. Havaalanlarına ait taksi-in safhasındaki yakıt tüketimleri	92
4.6. Amasya Havaalanı plan görünümü	93
4.7. Havaalanlarına ait tırmanma süreleri	97
4.8. Havaalanlarına ait tırmanma safhasındaki yakıt tüketimleri.....	98
4.9. Havaalanlarına ait kalkış süreleri	102
4.10. Havaalanlarına ait kalkış safhasındaki yakıt tüketimleri	102
4.11. Havaalanlarına ait yaklaşma süreleri	106

4.12. Havaalanlarına ait yaklaşma safhasındaki yakıt tüketimleri.....	106
4.13. Sinop Havaalanı 23 pisti NDB/DME aletli yaklaşma planı.....	108
4.14. Havaalanları LTO döngüsü toplam süreleri.....	112
4.15. İki meydan arasındaki büyük daire ve gerçek uçuş mesafe farkı.....	115
4.16. IST-ESB (kırmızı) ve ESB-IST (sarı) uçuşlarının plan görünümü.....	118
4.17. Yurt içi uçuşlarda meydan çiftleri arasında büyük daire (optimal) ve ortalama gerçek uçuş mesafeleri	122
4.18. Yurt içi uçuşlarda meydan çiftleri arasında büyük daire (optimal) ve gerçekleşen en kısa uçuş mesafeleri.....	123
4.19. Kayseri Havaalanı 25 pisti VOR/DME aletli yaklaşma planı.....	125
4.20. Farklı seyir irtifalarında gerçekleşen yakıt tüketim değerleri	127
4.21. Uçuş safhalarına göre oluşan yakıt tüketim değerleri (örnek)	128
4.22. Meydan çiftleri bazında ortalama yakıt tüketimleri ve referans yakıt tüketimleri ile yüzdeler olarak farklılıkları	133
4.23. Yakıt-oran ve mesafe-oran verilerine ait dağılım grafikleri	137
4.24. Toplam dikey verimsizlik verilerine ait dağılım grafikleri.....	137
4.25. İlgili rotaların %1'lik yatay verimsizlik oranı iyileştirmesi sonucundaki uçuş mesafesi ve yakıt tüketimleri kazançları.....	144

ÇİZELGELER DİZİNİ

1.1. ICAO LTO ile Zürich Havaalanı Operasyonel LTO arasındaki zaman farklılıkları	8
1.2. LTO ile ilgili yapılan çalışmalar sonucunda ortaya çıkan emisyon değerlerinin kıyaslanması	9
1.3. Hava trafik sisteminin etkinliğini arttırmaya yönelik literatürdeki çalışmalar	16
1.4. Hava trafik sisteminin etkinliğini arttırmaya yönelik yapılan uluslararası çalışmalarda elde edilen yakıt tasarrufu ve emisyon kazançları	19
2.1. Havacılık emisyonları ve küresel etkileri.....	33
2.2. Uçak tiplerine göre emisyon faktörleri	39
2.3. Emisyon hesaplama yaklaşımları için gerekli verilerin gösterimi	46
3.1. Havaalanlarına ait bilgiler	54
3.2. A320 FDR Parametre Listesi	56
3.3. B737 FDR Parametre Listesi	57
3.4. Verilerin rota, uçak tipi ve aylara göre dağılımı	59
3.5. ICAO LTO döngüsü safha süreleri ve itki ayarları.....	64
3.6. Kalkış Havaalanlarına ait motor tipi verileri.....	70
3.7. İniş havaalanlarına ait motor tipi verileri	71
3.8. Uçak motor tiplerine ait yakıt akışı ve emisyon faktörü değerleri.....	72
4.1. Havaalanlarının belirlenen taxi-out süreleri ve ortalama yakıt tüketimleri	85
4.2. Taksi-out safhasına ait emisyon değerleri.....	89
4.3. Meydanların belirlenen taxi-in süreleri ve ortalama yakıt tüketimleri.....	90
4.4. Taksi-in safhasına ait emisyon değerleri.....	94
4.5. Havaalanlarının belirlenen tırmanma süreleri ve ortalama yakıt tüketimleri	96
4.6. Tırmanma safhasına ait emisyon değerleri	99
4.7. Havaalanlarının belirlenen kalkış süreleri ve ortalama yakıt tüketimleri ...	100
4.8. Kalkış safhasına ait emisyon değerleri.....	103

4.9. Havaalanlarının belirlenen yaklaşma süreleri ve ortalama yakıt tüketimleri	104
4.10. Yaklaşma safhasına ait emisyon değerleri	109
4.11. Operasyonel LTO ile ICAO LTO arasındaki farklılıklar.....	110
4.12. “Medium” uçak kategorisi için belirlenen LTO safha süreleri	111
4.13. CODA ile operasyonel taksi-in ve taksi-out süreleri kıyaslaması	113
4.14. Uçuş mesafesine ait betimsel istatistikler	116
4.15. Yakıt tüketimine ait betimsel istatistikler	117
4.16. Yatay uçuş verimsizliği analiz sonuçları.....	119
4.17. Dikey verimsizlik analizleri	124
4.18. Uçuş safhalarına göre mil başına düşen yakıt tüketimi, CO ₂ ve H ₂ O emisyon değerleri	129
4.19. Meydan çiftleri arasındaki rota bazında hesaplanan referans yakıt tüketimleri ve uçuş süreleri	132
4.20. Kalkış Ağırlıkları ile ilgili betimsel istatistikler.....	134
4.21. Değişkenlerin çarpıklık-basıklık değerleri	136
4.22. Değişkenler arasındaki korelasyon	139
4.23. Varyans Analizi Tablosu.....	140
4.24. Katsayı Tablosu.....	141
4.25. Rotaların ATM kaynaklı verimsizlik puanları	142
4.26. Yatay ve dikey iyileştirmelerin yüzdesel olarak ATM verimsizlik puanına etkisi	143
5.1. Rota bazında yapılan %1’lik iyileştirmelerle elde edilecek olası yakıt tasarrufları	148

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

x	: Oransal yakıt fazlalığı
τ	: Oransal mesafe fazlalığı
Cond _j	: Ortam koşulları (irtifa, hız, sıcaklık, basınç)
F _{GER}	: Gerçek toplam yakıt tüketimi
F _{REF}	: Referans yakıt tüketimi
L	: Uçuş için referans uçuş seviyesi (FL)
l	: Düz uçuş boyunca uçuş seviyesi (FL)
M _{GER}	: Gerçek toplam uçuş mesafesi,
M _{OPT}	: Optimal mesafe
N _{ek}	: k uçak tipindeki motor sayısı
t _i	: Düz uçuş süresi
T	: Uçuşun toplam süresi
V _i	: Dikey verimsizlik
ACARE	: Avrupa Havacılık Araştırmaları Danışma Konseyi (Advisory Council for Aviation Research in Europe)
ACC	: Saha Kontrol Merkezi (Area Control Centre)
AIP	: Havacılık Bilgi Yayını (Aeronautical Information Publication)
AMAN	: Geliş Yönetimi (Arrival Management)
APP	: Yaklaşma Kontrol (Approach Control)
ASM	: Hava Sahası Yönetimi (Airspace Management)
ATC	: Hava Trafik Kontrol (Air Traffic Control)
ATFM	: Hava Trafik Akış Yönetimi (Air Traffic Flow Management)

ATM	: Hava Trafik Yönetimi (Air Traffic Management)
ATS	: Hava Trafik Hizmetleri (Air Traffic Services)
BADA	: Uçak Veri Tabanı (Base of Aircraft Data)
CALM	: Bilgisayar Destekli Yaklaşma ve İniş Yönetimi (Computer-assisted Approach and Landing Management)
CANSO	: Sivil Hava Seyrüsefer Hizmetleri Teşkilatı (Civil Air Navigation Services Organisation)
CCO	: Devamlı Tırmanma Operasyonları (Continuous Climb Operations)
CDA	: Devamlı Alçalarak Yaklaşma (Continuous Descent Approach)
CDO	: Devamlı Alçalma Operasyonları (Continuous Descent Operations)
CI	: Maliyet katsayısı (Cost Index)
CO	: Karbon monoksit (Carbon monoxide)
CO ₂	: Karbondioksit (Carbondioxide)
CODA	: Gecikme Analizi Merkez Ofisi (Central Office for Delay Analysis)
CONTRAIL	: Yoğunlaşma İzi (Condensation Trail)
DHMI	: Devlet Hava Meydanları İşletmesi
DME	: Mesafe Ölçüm Cihazı (Distance Measuring Equipment)
EEDB	: Uçak Egzoz Emisyonları Veri tabanı (Engine Emissions Databank)

EI	: Emisyon İndeksi (Emission Index)
EUROCONTROL	: Avrupa Hava Seyrüsefer Emniyeti Teşkilatı (European Organisation for the Safety of Air Navigaton)
FAA	: Federal Havacılık İdaresi (Federal Aviation Administration)
FDR	: Uçuş Veri Kaydedici (Flight Data Recorder)
FIR	: Uçuş bilgi bölgesi (Flight Information Region)
FMS	: Uçuş Yönetim Sistemi (Flight Management System)
FPA	: Uçuş Yol Açısı (Flight Path Angle)
IATA	: Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği (International Air Transport Association)
ICAO	: Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatı (International Civil Aviation Organisation)
IPCC	: İklim Değişikliği Paneli (Intergovernmental Panel on Climate Change)
LTO	: İniş-kalkış döngüsü (Landing and Take-off Cycle)
NASA	: Amerika Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (National Aeronautics and Space Administration)
NDB	: Yönlendirilmemiş Radyo Bikını (Non-directional Radio Beacon)
NM	: Deniz mili (Nautical Mile)
NOx	: Azot oksitler (Nitrogen Oxides)
RNAV STAR	: Saha Seyrüsefer Standart Geliş Yolları (Area Navigation Standard Terminal Arrival Routes)

SID	: Standart Aletli Kalkış Rotası (Standard Instrument Departures)
SO _x	: Kükürt oksitler (Sulphur Oxides)
TIM	: Uçuş safhası zamanı (Time-in-mode)
TMA	: Terminal Manevra Sahası (Terminal Manoeuvring Area)
TOD	: Alçalmaya Başlama Noktası (Top of Descent)
VOC	: Uçucu organik bileşikler (Volatile Organic Compounds)
VOR	: VHF Çok Yönlü Radyo Seyrüsefer Cihazı (VHF Omni-directional Range)

1. GİRİŞ

Hava taşımacılığı, insanları ve kültürleri bir araya getirerek küreselleşmeye katkıda bulunan ve ülkeler için ekonomik büyüme yaratan bir endüstri haline gelmiştir. Hızla artan hava trafiği nedeniyle bu endüstrinin hava kirliliği ve iklimsel değişiklikler ile ilgili çevresel etkileri son yıllarda artış göstermiştir.

Hava taşımacılığı kaynaklı çevresel etkilerin azaltılması için uçak ve motor teknolojileri, ileri hava trafik yönetimi ve operasyonel prosedürleri, alternatif yakıtları ve hükümet politikalarını içeren birçok seçenek mevcuttur. Özellikle son zamanlarda hava taşımacılığı endüstrisinde uçak ve motor üzerinde yakıt verimliliğini artırmak üzere yeni uçak modelleri ya da uçak içerisinde yeni sistemler geliştirilmeye çalışılmaktadır. Fakat, kapasite ve diğer problemlerden dolayı hava trafik sistemlerinin etkili bir şekilde kullanılamaması nedeniyle her yıl tonlarca yakıt boşa harcanmakta ve geliştirilmeye çalışılan bu sistemlerden elde edilecek kazancın kaybına neden olmaktadır. Bu nedenle; yakıt tüketiminin ve emisyon miktarının azaltılmasında uçak ve motor teknolojilerinin geliştirilmesinin yanı sıra hava trafik yönetimi (ATM-Air Traffic Management) verimliliğinin de dikkate alınması gerekmektedir [1]. Dünya genelinde; hava trafik yönetimi yaygın bir şekilde ATM kısaltması ile kullanıldığı için tezin bundan sonraki bölümlerinde hava trafik yönetimi bu kısaltma ile ifade edilmiştir.

ATM'in temel amacı, uçuşların bütün safhalarında yer temelli ve havayla bağlantılı sistemlere dayalı olarak hava trafik akışının ekonomik, hızlı, düzenli ve emniyetli bir şekilde gerçekleştirilmesidir. Aynı zamanda ATM sayesinde hava sahasının en etkin şekilde işletilmesi de sağlanmaktadır. ATM sistemi, Hava Trafik Hizmetleri (ATS-Air Traffic Services), Hava Trafik Akış Yönetimi (ATFM-Air Traffic Flow Management) ve Hava Sahası Yönetimi (ASM-Airspace Management) faaliyetlerinden oluşmaktadır ve bu birimlerin birbirleri ile sürekli etkileşimleri söz konusudur.

Sivil uçuşların planlanan rotaları, ilgili Hava Trafik Kontrol (ATC-Air Traffic Control) üniteleri tarafından onaylanmaktadır, fakat gerçek uçuş planlanandan daha farklı olabilmektedir. Uçuş esnasında direkt rota izni alınarak uçuş mesafesi azaltılabileceği gibi meteorolojik şartlar, trafik yoğunluğu ve tahditli bölgeler gibi nedenlerle bu mesafe artabilmektedir. Başka bir deyişle; kimi zaman

ATM sisteminin kısıtlamaları nedeniyle uçuşlar planlanandan daha uzun gerçekleşebilmektedir. Uçuşun herhangi bir safhasında meydana gelen gecikmeler ve fazladan uçulan mesafeler, hem havayollarının operasyon maliyetlerini arttırmakta hem de kullanılan fazladan yakıt sonucunda çevreye direkt bir etkiye bulunmaktadır. Kısacası, hava trafik kontrolörlerinin hava trafiğinin emniyetli ve etkin bir şekilde akışının sağlanması amacıyla uyguladıkları taktiksel müdahaleler neticesinde hem yakıt tüketimi hem de emisyonun artışı konularında etkiler ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle; ATM sistemi emniyet, kapasite ve ekonomi açısından kullanıcılarının farklı ihtiyaçlarını karşılamak üzere gelişmekte olan teknolojiye paralel olarak her geçen gün iyileştirilirken çevresel etkileri açısından da değerlendirilmektedir.

Avrupa Havacılık Araştırmaları Danışma Konseyi (ACARE-Advisory Council for Aviation Research in Europe) ATM’de yapılacak iyileştirmelerle yakıt tüketiminde ve emisyonda %5-10 oranında azalma olabileceğini vurgulamaktadır [2]. ATM içerisindeki iyileştirmeler, yol safhası ve terminal manevra sahası (TMA-Terminal Manoeuvring Area) olmak üzere iki ayrı kısımda gerçekleştirilmektedir. Yol safhasındaki iyileştirmelerle %2-3 arasında, TMA içerisinde gerçekleşen kalkış ve geliş prosedürlerinin geliştirilmesi ile %5-8 arasında bir ATM verimliliği sağlanabileceği düşünülmektedir [2]. Aynı konsey; hem ATM hem de uçak verimliliğini artırmak amacıyla bir takım çalışmalar yürütmektedir. Bu çalışmaların doğrultusunda 2005’den 2020 yılına kadar %20 ile %25 arasında uçaklardan (ağırlık ve aerodinamik), %15 ile %20 arasında motorlardan ve %10’u ATM’den olmak üzere yakıt tüketiminde toplamda %50’lik bir azalma hedeflemektedir [2].

Hava Trafik Yönetimi’nin verimliliğinin iyileştirilmesi hava trafik tıkanıklarını ve gecikmelerini azaltmanın yanı sıra yakıt maliyetlerini ve çevreye olan etkilerinin de azaltılmasını sağlamaktadır [3]. Bu kapsamda, özellikle artan hava trafik talebi dikkate alındığında uçaklarda yakıt tüketiminin ve emisyonlarının ATM ile ilişkisinin somut verilerle ortaya koyulmasına ve ATM ile ilişkili iyileştirici önlemler alınmasına ihtiyaç vardır.

Bu tezin amacı, ATM’in Türkiye’de gerçekleştirilen ticari havayolu ulaşımına olan etkilerini gerçek verilere dayalı olarak ortaya çıkarmak ve elde edilecek sonuçlara göre ATM uçuş verimliliğinin arttırılmasına yönelik yapılacak

çalışmalara ışık tutmaktır. Bu amaç doğrultusunda, bu tez kapsamında ilk olarak hem havaalanı hem de TMA ve yol safhasındaki yakıt tüketime ve buna bağlı ortaya çıkan emisyonların belirlenmesi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra yurt içi uçuşların yatay ve dikey verimsizlik analizleri yapılmış ve bu analizler neticesinde ATM verimsizliğinin yakıt tüketime etkisinin ölçülebilmesi amacıyla kullanılacak ATM verimsizlik modelinin değişkenleri belirlenmiş ve geliştirilen model sayesinde ATM kaynaklı verimsizliklerin karmaşık hesaplama yöntemleri olmadan kolay bir şekilde ölçülebilmesi amaçlanmıştır.

1.1 Kaynak Özetleri

Havacılık sektörü için yakıt tüketiminin ve emisyonun azaltılması amacıyla teknoloji ve operasyonel gelişime yönelik çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Havacılık emisyonları ile ilgili literatür incelendiğinde uçak motorlarının yakıt tüketiminin azaltılması adına geliştirilmesi, gerçek emisyon değerlerinin belirlenmeye çalışılması ve hava trafik yönetiminin iyileştirilmesi adına yapılan çalışmaların çoğunlukta olduğu görülmektedir. Uçuş esnasında (kalkış, seyir ve alçalma) emisyon ölçümünün yapılmasının zor bir işlem olması nedeniyle literatürdeki çalışmalarda daha çok uçakların yerde çalıştığı, havaalanı içerisindeki taksi hareketi esnasında veya motorların rölantide çalıştığı fazlar üzerinde durulmuştur. Uçak kaynaklı emisyonlar üzerine yapılan çalışmalarda özellikle karbondioksit (CO₂), su buharı (H₂O), azot oksitler (NO_x), çeşitli kükürt oksitler (SO_x), karbon monoksit (CO) ve hidrokarbon (HC) emisyonları üzerinde durulmuştur.

1.1.1 Uçak emisyonlarının belirlenmesi ve çevresel etkileri ile ilgili çalışmalar

Baughum ve ark. [4] tarafından 1996 yılında NASA ile birlikte gerçekleştirilen çalışmada NO_x, CO ve HC emisyonlarıyla ilişkili bir veritabanı geliştirmişlerdir. Bu çalışmada küresel boyutta havacılığın atmosfere olan etkileri, mevsimsel değişimler, irtifa aralıkları, coğrafi bölgeler, meteorolojik koşullar gibi

faktörler göz önüne alınarak tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmanın ardından, 2001 yılında Sutkus ve ark., bu çalışmayı güncellemek adına 1999 yılı havacılık faaliyetlerini incelemiştir. Buna göre 1992 yılı sonuçlarına göre havayolu ulaşımının küresel yakıt tüketiminin %33, NO_x emisyonunun ise %35 oranında arttığı tespit edilmiştir.

Sivil ve askeri havacılık kaynaklı NO_x emisyonunun belirlenmesi ile ilgili bir diğer çalışma 1997'de **Avrupa Birliği** tarafından başlatılan ANCAT/EC başlıklı bir proje ile gerçekleştirilmiştir. Trafik verisi, Hava Trafik Kontrol kayıtlarından sağlanmış ve gövde emisyon performans modeli ile kombine edilmiştir. Bu proje sayesinde 1991-1992 yıllarına ait uluslararası ölçekte bir NO_x veritabanı oluşturulmuştur. Bu veri tabanına göre tahmini NO_x emisyonunun NASA envanterine göre 2 kat daha fazla olduğu görülmüştür [5].

Schafer ve ark. [6] tarafından 2003 yılında gerçekleştirilen çalışmada uzaktan algılama metodu kullanılarak Frankfurt (main), Londra ve Viyana Havaalanları'ndaki rölanti emisyon değerleri tespit edilmiştir. 140 civarı uçuş için yapılan ölçümlere göre NO_x emisyonunun Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatı (ICAO-International Civil Aviation Organisation) veritabanında verilen değerlerden yaklaşık %50 daha fazla olduğu hesaplanmıştır. Aynı şekilde CO emisyonlarının da aynı veritabanındaki değerlere göre daha fazla olduğu bulunmuştur. Çalışmada; uçak kütlesi nedeniyle oluşan rölanti devirlerinin, motorun yaşının ve motor bakım durumunun emisyon değerlerindeki bu farklılığa yol açabileceği ifade edilmiştir.

2004 yılında **Eyers ve ark.** [7] tarafından hazırlanan "AERO2K:Global Aviation Emissions Inventories for 2002 and 2025" başlıklı EU projesinde sivil ve askeri havacılığın 2002 yılı için küresel anlamda NO_x, H₂O, CO₂, CO, HC ve PM emisyon envanteri oluşturulmuştur. 2002 yılı sonuçlarından hareketle 2025 yılı için emisyon tahminlerinde bulunulmuştur. Buna göre 2025 yılında 2002 yılına göre trafik sayısının 2.6 kat artacağı ve bunun da CO₂ ve H₂O emisyonlarını 2 kat, NO_x emisyonunu ise 1.6 kat arttıracığı öngörülmüştür.

2005 yılında **Federal Havacılık İdaresi (FAA-Federal Aviation Administration)** [8] tarafından yürütülen SAGE (System for Assessing Aviation's Global Emissions) projesinde coğrafik bölgeler, havaalanları, uçak tipleri, motor

tipleri gibi faktörlere göre değişiklik gösteren toplam yakıt tüketimleri, uçulan menzil, üretilen emisyon gibi göstergeler ve bunlarla ilişkili modeller geliştirilmiştir. Bu proje ile geliştirilen modeller neticesinde yakıt tüketimi ile CO₂, CO, NO_x, HC gibi emisyon türlerinde sayısal sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen bu sayısal sonuçlar daha önce gerçekleştirilen NASA/Boeing envanteri, ANCAT/EC2, DLR ve AERO-MS envanterleri ile kıyaslanmıştır. Buna göre bu çalışmada yakıt tüketimi ve NO_x emisyonu için yapılan tahminler kıyaslanan bu çalışmalara göre %30 daha fazla çıkmıştır.

Unal A. [9] tarafından 2005 yılında Atlanta havaalanı için gerçekleştirilen çalışmada uçak emisyonlarının bölgesel hava kalitesi üzerindeki etkilerini araştırılmıştır. Bu çalışmada özellikle PM_{2.5} ve ozon emisyonları üzerinde durulmuştur. PM_{2.5} değerleri ozon emisyonlarından fazla olduğu tespit edilmiştir.

Carslaw ve ark. [10] 2006 yılında Heathrow havaalanı için uçak kaynaklı NO_x emisyonunun diğer kaynaklara göre oranını belirlemek üzere yaptıkları çalışmada söz konusu havaalanı sınırları içerisinde yıllık ortalama NO_x emisyonunun %27'sinin uçak kaynaklı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca uçak kaynaklı NO_x emisyonunun havaalanı merkezinden 2.6 km mesafeye kadar etkili olduğu bulunmuştur.

Farias ve Apsimon [11] 2006 yılında Heathrow havaalanı için gerçekleştirdikleri çalışmada, uçaklardan ve havaalanındaki trafiklerden kaynaklanan NO_x emisyonu incelenmiştir. Çalışmada hava dağınım (air dispersion) modeli kullanılmıştır, ayrıca uçakların irtifaları da göz önünde bulundurulmuştur. Bu çalışmada hem kullanılan gözlem istasyonu ve hem de model sonuçları göstermiştir ki toplam emisyona olan katkıları bakımından uçak NO_x emisyonu için genellikle aşırı değerler ortaya çıkmaktadır.

Williams ve Noland [12] 2006 yılında yine Heathrow havaalanında kısa ve uzun mesafeli uçuşlar gerçekleştiren uçakların izafi etkilerini incelemiştir. Bunlar arasında gün ve mevsimlere göre 12 uçak tipi için CO₂, yoğunlaşma izi (Contrail-Condensation Trail) ve uçuş süresi, irtifa emisyon azaltma stratejileri gibi ölçütler bulunmaktadır. Bu çalışmaya göre uzun uçuşlardaki km başına CO₂ emisyonu kısa uçuşlara göre daha az olmaktadır. Bununla birlikte km-yolcu başına

yoğunlaşma izi oluşumu kısa ve orta mesafeli rotalar için km ile artarken, uzun mesafeli rotalar için daha düşük olduğu ifade edilmektedir.

Tsague ve ark. [13] 2006 yılında yaptıkları çalışmada 9 ve 13 km irtifalarda seyreden 19 tip uçak için NO_x emisyon tahminlerinde bulunmuşlardır. Bu çalışmada daha önceki çalışmalarda ölçülen NO_x için verilen standart sapma değerlerinden daha düşük değerler elde edilmiştir.

Graham ve Raper [14] uçakların yol açtığı hava girdaplarının emisyon üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. İngiltere’de üç havaalanında yolcu sayısı yerine iniş-kalkış döngüsü (LTO-Landing and Take-off Cycle) ve km başına emisyon etkileri belirlenmiş ve uçak ve motorlar tarafından oluşan negatif etki açıklanmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında, B737 ve B747 uçaklarına ait NO_x emisyonları kanat vortex'leri de göz önüne alınarak teorik olarak modellenmiş ve uçak yüksekliğinin, kanat açıklığının 0.5 ile 1.5-2.8 kat değerleri için NO_x konsantrasyonuna etkileri belirlenmiştir.

Schurmann ve ark. [15] tarafından 2007 yılında Zürih Havaalanı için gerçekleştirilen çalışmada uzaktan algılama yöntemi ile uçakların rölanti devirlerindeki emisyonları belirlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan verilerin rölanti devirlerinin ICAO'da kabul edilenden daha düşük olması ve bunun sonucunda yakıt tüketiminin daha düşük gerçekleşmesi nedeniyle ICAO veritabanı ile yapılan karşılaştırmada rölanti için CO emisyonlarının ICAO'ya göre daha fazla, NO emisyonlarının ise daha düşük olduğu bulunmuştur.

Diğer bir çalışma ise **Winther ve ark.** [16] tarafından Kopenhag Havaalanı için yapılmıştır. Bu çalışmada da ölçüm yapılan uçakların taksi ve kalkış motor gücünün ürettiği emisyonların ICAO veritabanında verilen değerden daha düşük olduğu vurgulanmaktadır. Diğer taraftan HC emisyonlarının ise daha yüksek çıktığı ifade edilmiştir.

1.1.2. Havaalanı ve çevresindeki yakıt tüketimi ve emisyonların belirlenmesi ile ilgili çalışmalar

Havaalanı ve çevresinde, uçaklardan kaynaklanan emisyon, ICAO motor egzoz emisyon veritabanından ve ICAO LTO esas alınarak hesaplanmaktadır.

ICAO, uçak motor emisyon standartlarının hesaplanmasında kullanılan LTO döngüsündeki safha sürelerini 1970'lerdeki uçuş verilerine dayalı olarak 1980'lerin başında oluşturmuştur. Havaalanındaki emisyonunun hesaplamasında ICAO LTO döngüsündeki safha sürelerinin kullanılması halinde sonuçların gerçek emisyon değerlerini yansıtamayacağı belirtilmektedir [17]. ICAO LTO döngüsünde atmosferik karışım yüksekliği 3000 feet olarak kabul edilmektedir [18].

Ohsfeldt M. ve ark. [19] tarafından hava trafik yönetimi verimsizliği ile yakıt tüketimi ve hava kirletici emisyonları arasındaki ilişkiyi ölçme konusunda yapılan çalışmada atmosferik karışım yüksekliğini ICAO'da olduğu gibi yer seviyesinden 3000 feet yüksekliğe kadar kabul edilmiş ve bu yüksekliğin altında kalan sahada 148 havaalanı için operasyonel uçak yakıt tüketim ve emisyon envanteri oluşturmuştur. Çalışmaya göre operasyonel yakıt tüketim ve emisyon envanteri uçak operasyonlarındaki hava trafik yönetim verimsizliklerinden kaynaklanan gecikmeleri de içermektedir. Bu nedenle ATM verimsizliklerindeki iyileştirmeler operasyonel envanterdeki yakıt tüketim ve emisyon değerlerini azaltıcı yönde fayda sağlayacaktır. Çalışma kapsamındaki havaalanlarında yüksek taksi sürelerinin neden olduğu yer gecikmelerinin azaltılması ile %10 ile %25 arasında yakıt tüketim ve emisyon azalması sağlanabileceği sonucuna varılmıştır. Bu çalışmanın dışında LTO döngüsündeki uçuş safhaları sürelerinin ve bu safhalardaki yakıt tüketimlerinin ve emisyonların belirlenmesi adına birçok çalışma gerçekleştirilmiştir.

2002 yılında **Kesgin** [20] tarafından gerçekleştirilen çalışmada Türkiye'deki 40 havaalanı için LTO emisyonları (HC, CO, NO_x, SO₂) hesaplanmıştır. Emisyon değerleri, uçuş veri kayıtlarına (FDR-Flight Data Recorder), ICAO emisyon veri tabanına ve ICAO LTO döngüsü safha sürelerine göre oluşturulmuştur. Buna göre; bütün meydanlar dâhilinde toplam LTO emisyonları 7600-8400 ton/yıl olarak belirlenmiştir. Hesaplanan bu değer %67'sinin İstanbul Atatürk Havaalanı'nda oluşan LTO emisyonları oluşturmaktadır. Aynı zamanda çalışma kapsamında taksi zamanlarının toplam LTO emisyonlarına etkisi de ölçülmüştür. Buna göre; 2 dakikalık taksi süresi azalması toplam LTO emisyonunda %6'lık bir azalma sağlamaktadır.

2004 yılında **Celikel ve ark.** [21] tarafından yapılan çalışmada Zürih Havaalanı için emisyon envanterinin oluşturulması amacıyla üç farklı model kullanılmıştır. Bu modellerde operasyonel LTO döngüsü safha süreleri kullanılmıştır. Her bir model ile Zürih Havaalanı için HC, CO ve NO_x değerleri belirlenmiştir.

Fleuti ve Polymeris [22] tarafından 2004 yılında gerçekleştirilen “Operasyonel LTO Döngüsünde Uçak NO_x Emisyonu” konulu çalışmada İsviçre Zürih Havaalanı için mevcut uçak operasyonlarını yansıtan LTO döngüsünün oluşturulması ve buna bağlı olarak da operasyonel emisyon faktörlerinin hesaplanması ve ICAO LTO döngüsüne göre kıyaslama yapılması amaçlanmıştır. Çalışmada A-319’dan A340-300’e kadar ve B 757-B767 dahil 9 uçak motorundan elde edilen veriler kullanılmıştır. Çalışmanın neticesinde özellikle kalkış ve tırmanma safhalarında ICAO LTO döngüsüne göre belirgin farklılıklar bulunmuştur. Çizelge 1.1’de de görüldüğü üzere kalkış ve yaklaşma safhalarının süreleri operasyonel LTO döngüsünde daha fazla bulunurken tırmanma ve taksi süreleri daha az bulunmuştur.

Çizelge 1.1. ICAO LTO ile Zürih Havaalanı Operasyonel LTO arasındaki zaman farklılıkları [22]

Safha	ICAO LTO Süresi (dk)	Operasyonel LTO Süresi (dk)	Fark
Kalkış	0.7	1.6	+%130
Tırmanma	2.2	0.5	-%77
Yaklaşma	4.0	4.4	+%10
Taksi	26.0	14.8	-%43

Emisyon hesaplamalarında diğer uçak tiplerinin emisyon değerlerine kıyasla sadece A340 NO_x emisyon değerinin ICAO LTO döngüsüne göre daha yüksek olduğu gözlenmektedir. Bunun nedeni uçakların oldukça yüksek kalkış ağırlığında operasyon kalkış yapmaları ve bu safhanın süresinin ICAO döngüsündeki safha süresine (0.7 dk) kıyasla 2.5 dakika olarak bulunmasıdır.

Elbir [23] tarafından 2004 yılında gerçekleştirilen çalışmada Adnan Menderes Havalimanı için FDR kayıtları kullanılarak LTO emisyonları yıllık olarak HC için 21 ton, CO için 138 ton ve NO_x için 197 ton olarak belirlenmiştir.

Fakat bu değerler Adnan Menderes Havalimanı'nın yıllık trafik kapasitesinin %16'sına göre hesaplanmıştır. Çalışmada ayrıca, taksi süresinin 1 dakika azalması ile HC değerinde %4.2, CO değerinde %4.6 ve NO_x değerinde de %0.4 azalma sağlanacağı belirtilmiştir.

Simic ve Babic [24] 2014 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada havaalanı düzeyinde farklı hava trafik kontrol taktikleri uygulandığında hava trafik karmaşıklığı ve çevresel verimlilik arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Farklı trafik taleplerinde ve hava trafik talimatları neticesinde ortaya çıkan gecikmeler SIMMOD kullanılarak analiz edilmiştir. Ayrıca yakıt tüketimi ve emisyon değerleri de belirlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre farklı stratejik ve taktiksel ATC önlemlerin belirgin bir şekilde havaalanındaki trafik karmaşıklığını azalttığı ve çevresel verimliliği de arttırdığı belirlenmiştir.

Çizelge 1.2'de havaalanları ve çevresindeki uçak kaynaklı emisyon değerlerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen çalışmaların değerlendirmelerine yer verilmiştir.

Çizelge 1.2. LTO ile ilgili yapılan çalışmalar sonucunda ortaya çıkan emisyon değerlerinin kıyaslanması

Çalışma Bölgesi	HC (t/y)	CO (t/y)	NOX (t/y)	Çalışma Yılı	Yazar
İstanbul Atatürk Havaalanı	317.8	2079	1301	2002	Kesgin U.
İzmir Adnan Menderes Havaalanı	21	138	197	2004	Elbir T.
Zürih Havaalanı	147	1204	1114	2004	Celikel ve ark.

1.1.3. TMA ve yol safhasındaki yakıt tüketimlerinin ve emisyonların azaltılmasına yönelik yapılan çalışmalar

Alternatif verimli iniş ve kalkış prosedürleri ve yol tasarımları gibi hava trafik sisteminin etkinliğini artıracak yeni yöntemler ve bu yöntemlerin yakıt tüketimi ve emisyon üzerine etkileri hakkında yapılagelen birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların başında *Devamlı Alçalarak Yaklaşma (CDA-Continuous Descent Approach)* ya da bazı çalışmalarda ifade edildiği gibi *Devamlı*

Alçalma Operasyonları (CDO-Continuous Descent Operations) prosedürleri gelmektedir. CDA prosedürler, ICAO'nun 9931 dokümanında “uygun hava sahası ve prosedürleri ve ATC kleransları sayesinde düşük motor itki ayarları ile birlikte optimum uçuş profilinin sağlanabildiği operasyon tekniği” olarak tanımlanmaktadır [25]. Geleneksel prosedürlerde pilotlar yaklaşma sırasında erken veya kademeli alçalarak uzun süreli alçak irtifada düz uçuş gerçekleştirebilmektedir. Alçak irtifalarda düz uçuş için yüksek itki ayarları kullanılması nedeniyle de yakıt tüketimi artabilmektedir. CDA yaklaşma prosedürlerinde ise alçak irtifalarda herhangi bir düz uçuş periyoduna gerek kalmaksızın pilotlar uygun bir sabit yol açışı ile alçalabilmektedirler. Hava trafik sisteminin etkinliği artıracak bir diğer önemli çalışma Devamlı Tırmanma Operasyonlarıdır (CCO-Continuous Climb Operations). CCO prosedürler, ICAO'nun 9993 nolu dokümanında “kalkış yapan uçağın seyir irtifasına kadar optimum motor itkisi ve tırmanma hızı ile kesintisiz tırmanmasını sağlayan hava sahası tasarımı ve ATC tarafından etkinleştirilmiş operasyon” olarak tanımlanmaktadır [25]. CDA ve CCO prosedürler sayesinde düz uçuş periyotlarının önlenmesi ile emisyon, yakıt tüketimi ve uçuş süresinin azaltılması sağlanmaktadır. CDA ve CCO prosedürleriyle ilgili yapılan bazı çalışmalar şunlardır.

2000 yılında **Wubben ve Busink** [27] tarafından oluşturulan bir grup tarafından Schiphol havaalanı için yapılan bir yaklaşma prosedür çalışmasında CDA prosedürlerinin, geleneksel yaklaşma prosedürleri ile yakıt tüketimi anlamında bir karşılaştırması yapılmıştır. Bu amaçla B747 ve B737 tipindeki uçaklardan alınan veriler incelenmiştir. Sonuç olarak CDA ile yaklaşma sayesinde uçakların geleneksel yaklaşma prosedürlerine göre yaklaşma esnasındaki yakıt tüketimlerinde %25-40 arasında azalma sağlanabileceği görülmüştür.

Louisville Uluslararası Havaalanı'nda gerçekleştirilen diğer bir çalışma **Tong ve ark.** [28] tarafından 2003 yılında yapılmış olup, alçalma esnasında düşük seviyelerdeki düz uçuşlar yerine CDA prosedürlerinin uygulanabilirliği tartışılmıştır. İki haftalık bir periyod için elde edilen B767 uçuşları ile simülasyon verileri kıyaslanmıştır. Buna göre; uygun hız ve seviye kısıtlamaları ve düşük itki ayarları ile CDA operasyonları için uygun yol açısının başarılabileceği tespit edilmiştir.

2004 yılında **Clarke ve ark.** [29] B757 ve B767 uçakları ile yaptıkları çalışmada klasik yaklaşımdan CDA ile yaklaşıma geçişte alçalma esnasındaki yakıt tüketimlerinin 180-225 kg arasında düşürülebileceğini ifade etmişlerdir.

Wilson ve Hafner [30] tarafından 2005 yılında gerçekleştirilen çalışmada Atlanta Havaalanı için toplam uçuş süresi, yakıt tüketimi ve toplam uçuş mesafesindeki CDA'nın etkileri araştırılmıştır. Yapılan simülasyon çalışmalarının neticesinde CDA kullanımını sayesinde ilk yaklaşma fiksinden itibaren gerçekleştirilen her bir uçuş için 1 dakikalık uçuş süresi kazancı ve buna göre de yıllık olarak toplam 30 milyon dolara kadar bir tasarruf sağlandığı bulunmuştur.

2008 yılında gerçekleştirilen başka bir çalışmada Atlanta ve Miami Havaalanları için mevcut Saha Seyrüsefer Standart Geliş Yolları'na (RNAV STAR-Area Navigation Standard Terminal Arrival) dayalı CDA kullanımındaki yararların analizleri yapılmıştır. Buna göre Atlanta Havaalanı'nda gerçekleşen 11 uçuş için ortalama 37 galon, Miami Havaalanı için gerçekleştirilen 10 uçuş için ise ortalama 10 galon yakıt tasarrufu sağlandığı bulunmuştur [31].

Stibor ve Nyberg [32] tarafından 2009 yılında gerçekleştirilen çalışmada ise Ocak 2006 ile Mart 2008 yılları arasında Stockholm Arlanda Havaalanı'na gerçekleşen toplam 1955 RNAV STAR-CDA gelişi incelenmiştir. Bu çalışmada uçuşların seyir irtifasından pist eşiğine kadar olan alçalmaları esas alınmıştır. Buna göre standart gelişlerle karşılaştırıldığında CDA uygulayan her bir uçuşun yaklaşık 56 kg yakıt tasarrufu sağladığı bulunmuştur.

2009 yılında **Alcabin M. ve ark.** [33] tarafından yapılan çalışmada uçuşların dikey verimsizliklerinin belirlenebilmesi amacıyla bir yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yöntem sayesinde dikey verimsizliklerin ortadan kaldırılması için önerilecek yeni prosedürlerin potansiyel faydaların ölçülmesi amaçlanmıştır. Bu yöntemde elde edilen uçuş verilerinde kalkış ve inişte oluşan düz uçuş periyotları ve bu düz uçuşların yakıt tüketimine etkisi belirlenmiştir. Elde edilen verilerin yıllık trafik sayısına uyarlanması sonucunda; 2006 yılı için yurt içi uçuşlarda oluşan dikey verimsizliklerin %3 daha fazla yakıt tüketimine sebep olduğu belirlenmiştir.

2010 yılında **Turgut ve ark.** [34] tarafından gerçekleştirilen çalışmada İstanbul Terminal Hava Sahası'nda B737 tipindeki bir uçak için CDA etkileri

incelenmiştir. İstanbul TMA'da yer alan beş giriş noktası için oluşturulan senaryolara göre bir uçuşun yakıt tüketimi, emisyon ve uçuş süresi üzerinde geleneksel yaklaşıma göre CDA'in avantajları belirlenmiştir. Buna göre; TMA içerisinde CDA sayesinde yakıt tüketiminin %7-9 ve uçuş süresinin %18-19 azaltıldığı bulunmuştur.

Canarslanlar, Turgut ve Usanmaz [35] tarafından 2010 yılında gerçekleştirilen bir diğer çalışmada da gerçek uçuş verilerine dayalı olarak İzmir Adnan Menderes ve İstanbul Sabiha Gökçen havaalanları arasında uçuş gerçekleştiren beş adet B737-800 uçağının alçalma profilleri incelenerek bu uçuşların uçuş süresi, yakıt tüketim ve emisyonlarının karşılaştırması yapılmıştır. İzafe olarak alçalma profillerini yüksek uçuş yol açısı (FPA-Flight Path Angle) ile gerçekleştiren uçakların, daha düşük FPA ile gerçekleştiren uçaklara göre yakıt tüketimlerinin daha düşük olduğu görülmüştür. Sonuç olarak; Sabiha Gökçen Havaalanına 2009 yılı itibariyle iniş gerçekleştiren B737-800 uçak sayısının 14,259 adet olduğu göz önüne alındığında, sadece bu beş farklı alçalma verisinin en düşük ve en yüksek değerlerine dayanarak, yıllık 4,4 milyon kg yakıt tasarruf potansiyeli olduğu bulunmuştur. Emisyon miktarlarında ise yıllık olarak CO₂ ve H₂O emisyonlarında 13,8 ve 5,5 milyon kg, NO_x, CO ve UHC'de ise sırasıyla 47.7 ve 500 kg düşüş potansiyeli olabileceği görülmüştür.

Miller ve ark. [36] tarafından 2011 yılında gerçekleştirilen çalışmada Geliş Yönetimi (AMAN-Arrival Management) ve Multi-Climb operasyonlarının yakıt tüketimi açısından faydaları incelenmiştir. Çalışmada seyir irtifasından 10.000 feete kadar olan alçalmalardaki ve 10.000 feetten seyir irtifasına kadar olan tırmanmalardaki düz uçuş süreleri ve frekansları belirlenmiştir ve 2008-2009 yılları arasında seçilen sekiz gün içerisinde gerçekleşen uçuşların verileri kullanılmıştır. Yakıt tüketiminin düz uçuşun irtifasına ve süresine bağlı olması nedeniyle düz uçuşların hangi irtifada daha sıklıkla olduğu ve bu düz uçuşların ne kadar sürdüğü ile ilgili analizlerde çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda AMAN için yıllık yarar 355 milyon dolar, Multi-Climb için ise yıllık yarar 42 milyon dolar olarak bulunmuştur.

Cao Y. ve ark. [37] 2011 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada 4-D yörünge konseptinin kullanılarak yoğun trafiğin bulunduğu hava sahalarında çakışma

olmadan CDA prosedürlerinin uygulanabileceği gösterilmek istenmiştir. Bu amaç doğrultusunda yapılan simülasyon çalışmalarında kullanılan zamanlama algoritması geliş trafikleri için çakışmaların stratejik olarak önlenebileceğini göstermiştir. Yapılan simülasyon çalışmalarında CDA prosedürler ile geleneksel prosedürlerdeki adım adım yaklaşma usulleri kıyaslanmıştır. Buna göre CDA uygulanması halinde seçilen New York Merkez içerisindeki 4 havaalanı için toplam 125.71 ton yakıt ve 2384 dakika uçuş zamanı tasarrufu sağlandığı hesaplanmıştır.

Knorr D., ve ark. [38] tarafından ATM'in uçuşun alçalma safhasındaki uçuş süresi ve yakıt tüketimine etkilerin belirlenmesi adına yeni bir metodoloji geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında hız kontrol stratejileri ile potansiyel yakıt tasarruflarının tahminleri elde edilmiştir. Çalışmada pozisyon bilgisi için gözetim verileri, uçak performans bilgileri için BADA kullanılmıştır ve uçuşun son 100nm (alçalma) kısmına odaklanılarak potansiyel yararlar yakıt ve zaman olarak açıklanmıştır. Uçuş yörünge bilgilerinin alçalma safhalarında meydana gelen düz uçuş kısımlarının belirlenmesi amacıyla algoritma geliştirilmiştir.

Roach K. ve Robinson J. [39] tarafından 2009 yılında gerçekleştirilen çalışmada Dallas/Forth Worth Uluslararası Havalimanı'ndan (DFW) kalkan uçakların CCO prosedürleri uygulaması halinde gerçekleşen yakıt tüketimleri belirlenmiştir. Çalışmada 3836 kalkış analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarında, tırmanma sırasında gerçekleşen düz uçuşların ortalama 1,7 dakika sürdüğü ve DFW kalkışlarının %20'sinde tırmanma sırasında düz uçuş periyotlarının olduğu belirlenmiştir. Devamlı tırmanmanın uygulanması halinde uçuş başına 31.000 feete kadar tırmanışlarda yaklaşık 7 galon yakıt tasarrufu sağlandığı çalışma sonucunda belirtilmiştir. Devamlı tırmanma sonucunda elde edilen faydaların yol safhasında gerçekleşecek yarım dakikalık bir gecikme ile belirgin bir şekilde etkileneceği belirlenmiştir.

Johnson W. ve ark. [40] tarafından 2010'da yapılan çalışmada Louisville Uluslararası Havaalanı'ndaki (SDF) CDA uygulamalarında pilotların takip mesafesi yönetiminde karşılaştıkları performans ve iş yükü konuları ele alınmıştır. Bu çalışmanın öncelikli amacı farklı seviyelerden pilotların geliştirilen otomasyon sistemini kullanarak CDA uygulamalarında takip mesafesini nasıl sağladıklarını incelemektir. Bu amaç doğrultusunda dört farklı senaryo oluşturulmuştur. Bunlar;

(1) Sistem tarafından hesaplanan ideal hızın elle girilmesi, (2) Hesaplanan hızın otomatik olarak Uçuş Yönetim Sistemi (FMS-Flight Management System)'ne girilmesi, (3) Sistem tarafından hesaplanan hızlara riayet edilmesi, (4) Pilotun kendi inisiyatifinde hızını kontrol etmesidir. Yapılan analizlerde uygulanan senaryolar içerisinde en verimli sonucun otomatik takip mesafesi koruma durumuna ek olarak pilot müdahalesinin yapıldığı durum olduğu görülmüştür.

Thompson T. ve ark. [41] tarafından 2013 yılında gerçekleştirilen çalışmada Tek Avrupa Gökyüzü ATM Araştırmaları (SESAR-Single European Sky ATM Research) ve İleri Nesil Hava Taşımacılığı Sistemi (NextGen-Next Generation Air Transport System) çevresel etkileri değerlendirme ölçütlerini ve modellerini daha iyi anlayabilmek amacıyla Avrupa ve ABD'deki CDA/CDO prosedürlerinin farklılıkları analiz edilmiştir. Bu analiz için benzer bölgesel veri setleri ve aynı analitik metot ve modeller kullanılmıştır. Çalışma kapsamında; (1) Paris (CDG ve ORY) ile New York (JFK, LGA ve EWR) bölgelerinin bir günlük trafikleri analiz edilmiş, (2) bu iki bölgedeki çevresel etkilerin azaltılması (yakıt, CO₂, NO_x ve gürültü) için birbiri ile ilişkili faydalar karşılaştırılmış, (3) yakıt, gürültü ve hava kalitesi etkileri tahmin edilmiştir. Sadece ATM ile ilgili etkilerin analiz edilebilmesi amacıyla tek bir uçak tipi (B757) kullanılmış ve 1110 geliş-1603 kalkış trafiği incelenmiştir. Yakıt tüketimlerinin hesaplanmasında üç farklı model (NIRS, AEM-III ve IFSET) kullanılmıştır. NIRS modeli kullanılarak yapılan analizler neticesinde CDA uygulanması halinde Paris Havaalanları için %38, New York Havaalanları için ise %51 yakıt tasarrufu sağlandığı bulunmuştur. AEM-III ile yapılan analizlerde ise CDA profillerinin kullanımı sonucu Paris havaalanları için %35, New York havaalanları için %49 yakıt tasarrufu görülmüştür. Bölgesel hava kalitesi olarak 40NM'lık bir bölge için yaklaşma bilgileri kullanılmıştır. Buna göre CDA profilleri sayesinde Paris verilerine göre %24, New York verilerine göre %51 NO_x azalımı sağlanacağı belirlenmiştir.

Harada ve ark. [42] 2014 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada dinamik programlama kullanarak Tokyo Uluslararası Havaalanı geliş trafikleri için yörünge optimizasyonu yapmışlardır. Çalışmanın devamında bu yöntem ile belirledikleri optimal yörüngeler ile gerçek uçuş yörüngelerini kıyaslayarak hava trafik verimliliği analizleri gerçekleştirmişlerdir. Analizler için gerekli veriler Mode S-

SSR verileri kullanılarak elde edilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen toplam 256 uçuş için ortalama 362 kg yakıt tasarrufu ve 202 sn uçuş süresi azalması belirlenmiştir.

Alternatif yol tasarımları, verimli iniş ve kalkış prosedürlerinin tasarımı gibi hava trafik sisteminin etkinliğini arttırmaya yönelik literatürdeki çalışmalar Çizelge 1.3’de özetlenmiştir.

1.1.4. Uluslararası havacılık kuruluşlarının yakıt tüketim ve emisyon anlamında gerçekleştirdikleri çalışmalar

Son yıllarda emisyon ve yakıt tüketimi anlamında ve buna bağlı olarak da uçuş verimliliği FAA ve NASA ile ICAO, Avrupa Hava Seyrüsefer Emniyeti Teşkilatı (EUROCONTROL-European Organisation for the Safety of Air Navigation) ve Sivil Hava Seyrüsefer Hizmetleri Teşkilatı (CANSO-Civil Air Navigation Services Organisation) ile Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği (IATA-International Air Transport Association) gibi uluslararası kuruluşlarda bu alandaki belirsizliklerin aydınlatılması ve havacılığın atmosfere olan zararlı etkilerinin azaltılması için ciddi çalışmalar gerçekleştirmektedir. Aynı şekilde bazı ülkelerde emisyon ve yakıt tüketimi ile ilgili olarak kendi hava trafik yönetim sistemleri içerisindeki verimliliği artırabilmek için kendi hava sahası yapılarını ve bu sahalardaki uçuş verimliliklerini geliştirmişlerdir. Bu konu ile ilgili yapılan çalışmalar aşağıda sıralanmıştır.

İlk olarak; **EUROCONTROL Deney Merkezi** tarafından 2002 yılında gerçekleştirilen “ATM uçuş verimliliği ve çevreye etkisi” çalışmasında hem yol hem de terminal sahası yakıt tüketimi, uçuş mesafesi ve uçuş süresi için ayrı ayrı değerlendirilmiş ve yapılan çalışmanın sonucunda uçuş mesafesinde %8.9, uçuş zamanında %13.5 ve yakıt tüketiminde de %9.6’lık bir kazanç elde edilmiştir [3].

Çizelge 1.3. Hava trafik sisteminin etkinliğini arttırmaya yönelik literatürdeki çalışmalar

Çalışmanın Kapsamı	Çalışma Bölgesi	İncelenen uçuş veri sayısı	Bulgular	Çalışma Yılı	Yazarlar
Terminal sahası	Schiphol Havaalanı	Belirtilmemiş	Yakıt tüketiminde %25-40 azalma	2000	Wubben ve Busink
Terminal sahası	Louisville Havaalanı	Belirtilmemiş	Yakıt tüketiminde uçuş başına 180-225 kg azalma	2004	Clarke ve ark.
Terminal sahası	Atlanta Havaalanı	2800	Yıllık 30 milyon dolar tasarruf	2005	Wilson ve Hafner
Terminal sahası	Atlanta Havaalanı	11	Yakıt tüketiminde uçuş başına 100 kg azalma	2008	Sprong ve ark.
Terminal sahası	Miami Havaalanı	10	Yakıt tüketiminde uçuş başına 27 kg azalma	2008	Sprong ve ark.
Terminal sahası	Stockholm Arlanda Havaalanı	1955	Yakıt tüketiminde uçuş başına 56 kg azalma	2009	Stibor ve Nyberg
Terminal sahası	İzmir Adnan Menderes Havaalanı ve Sabiha Gökçen Havaalanı	5	Yıllık 4,4 milyon yakıt tasarrufu	2010	Canarslanlar ve ark.
Terminal sahası	ABD-45 tane havaalanı	Alçalmalar için 176441, tırmanmalar için 176401	Yakıt tüketiminde yıllık 397 milyon tasarruf	2011	Miller ve ark.
Terminal sahası	Newark Havaalanı, LaGuardia Havaalanı, John F. Kenedy Havaalanı, Teterboro Havaalanı	2244	4 Havaalanı için günlük 99.36 ton yakıt azalımı	2011	Cao ve ark.
Terminal sahası	ABD-34 Havaalanı	6.5 milyon		2011	Knorr ve ark.

EUROCONTROL, CANSO ve IATA, 2008 yılında ortak olarak yayınladıkları raporda, yakıt ve emisyon tasarrufuna yönelik Avrupa hava sahasında uçuş verimliliği konusunda bir eylem planı üzerindeki ortak görüşlerine yer vermişlerdir. Bu plan Avrupa hava sahası yol tasarımının geliştirilmesi, yol ağı uyumluluğunun ve hava sahası kullanımlarının iyileştirilmesi, terminal sahaları tasarım ve kullanımlarının verimliliğinin artırılması, havaalanı operasyonlarının optimizasyonu ve performans farkındalığının artırılmasıdır. Bu planın tam olarak uygulanması ile EUROCONTROL yıllık 470.000 ton yakıt, 1.550.000 ton CO₂, ve bunlara ilişkin olarak yıllık 390 milyon Euro tasarruf sağlanabileceğini öngörmektedir [43].

2008 yılında **Avrupa Komisyonu ve FAA** ortaklığında AIRE (Atlantic Interoperability Initiative to Reduce Emissions) projesine başlanmıştır. Proje kapsamında 2009 yılında beş farklı bölgede 18 paydaşın katılımı ile 1153 uçuş denemesi gerçekleştirilmiştir. Reykjavik, İzlanda'da direk rota ve hız ayarlamaları ile uçuş profilleri optimize edilmiş olan 48 uçuş denemesi gerçekleştirilmiştir. Bu denemeler neticesinde CO₂ emisyonunda uçuş başına 190kg ile 1200kg arasında azalma görülmüştür. Madrid, İspanya'da Aena, Iberia ve INECO katılımıyla CDA prosedürlerinin uygulanması gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen 62 uçuş denemesinde uçuş başına 250 kg ile 800 kg arasında CO₂ azalması görülmüştür. Santa-Maria, Portekiz'de dikey ayrımı kapsayan yörünge optimizasyonunun sağlanması ile toplam 48 uçuş denemesi gerçekleştirilmiş ve bunun neticesinde 90-650 kg arasında CO₂ azalma sağlanmıştır. Paris, Fransa'da AIRE projesi kapsamında iki ayrı uygulama yapılmıştır. Birincisi yerdeki hareketlerle ilgili ikincisi ise terminal sahasındaki uçuşlarla ilgilidir. Yerdeki hareketlerle ilgili çalışmada taksi-in ve taksi out sürelerinin azaltılması ve tek motorla taksi-in gerçekleştirilmesi üzerinde durulmuştur. Bu kapsamda 353 deneme uçuşu gerçekleştirilmiş ve uçuş başına 190-1200 kg arasında CO₂ azalması sağlanmıştır. Terminal sahasındaki çalışmada ise Devamlı Tırmanarak Kalkış (CCD-Continuous Climb Departure) ve CDA operasyonlar düzenlenmiş ve CO₂ emisyonunda 100-1250 kg azalma görülmüştür [44].

Avrupa Havaalanları CDM (Collaborative Decision Making), **Eurocontrol Havaalanları Operasyonları Programının** bir parçasıdır ve Eurocontrol, Havaalanları Konseyi ve IATA arasındaki işbirliğini temsil etmektedir. A-CDM'in amacı mümkün olduğunca taksi safhasındaki gecikmelerinin önlenmesiyle yakıt tüketiminin ve emisyonun azaltılmasının sağlanmasıdır. 2011 yılının üçüncü çeyreğinde yirminin üzerinde Avrupa Havaalanı ve başlıca havayolları Avrupa A-CDM projesine katılmış durumdaydılar. Paris Charles de Gaulle Havaalanı (CDG) projeye Kasım 2010 yılında dahil olmuştur. Proje kapsamında bu havaalanında daha iyi slot tahsisini sağlayan ve bu sayede taksi zamanlarının azaltılmasını, apron ve taksi yolu çakışmalarının önüne geçilmesi sağlayan Kalkış Öncesi Sıralama Aracı (C-PDS-Collaborative Pre Departure Sequence Tools) kullanılmaya başlanmıştır. Bu sayede CDG Havaalanı'nda taksi sürelerinin 2 ile 4 dakika arasında azaldığı görülmüştür. Aynı zamanda emisyonda günlük olarak 44 ton azalma sağlanmıştır [45].

İsveç Hava Seyrüsefer Hizmet Sağlayıcı (LFV) ve SAS Havayolları tarafından Stockholm/Arlanda Havaalanı'nda gerçekleştirilen çalışmada CDA ve P-RNAV prosedürlerin birlikte kullanılarak yaklaşma prosedürü geliştirmiştir. Bu yaklaşma prosedürü ile yaklaşma sırasında uçak başına ortalama 100-150 kg yakıt tasarrufu sağlamıştır [46].

İrlanda'nın okyanus üzerindeki hava sahasında direkt rotalardan uçulabilmesi amacıyla Aralık 2009 tarihinde **İrlanda Havacılık Otoritesi ve UK Ulusal Hava Trafik Hizmetleri (NATS)** arasında ENSURE (En-Route Shannon Upper Airspace Redesign) projesine başlanmıştır. Bu proje sayesinde hava trafik hizmet yollarını yeniden tasarlanmış ve daha fazla direkt rotalar oluşturmuştur. Bu sayede, sadece 2010 yılı için 2.2 milyon uçuş mesafesi, 14800 ton yakıt, 46800 ton CO₂ emisyonu ve 195500 dakika uçuş süresi kazançları elde edilmiştir [47].

Avrupa'da, terminal hava sahasındaki trafiklerin sıralanması adına hava trafik kontrolörlerini destekleyici birçok geliş ve kalkış yönetim araçları tasarlanmaktadır. Tasarlanan bu araçlar ile özellikle geliş safhasında önemli yakıt tasarrufları sağlanması amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda; İsviçre Zürih Havaalanı'nda, **Hava Trafik Hizmet Sağlayıcı Skyguide ve yer sistemleri sağlayıcı Barco** tarafından hava trafik kontrolörlerine daha iyi bir trafik akışı

sağlamak adına tavsiyelerde bulunması amacıyla Bilgisayar Destekli Yaklaşma ve İniş Yönetimi (CALM-Computer-assisted Approach and Landing Management) sistemi geliştirilmiştir. CALM; trafik yoğunluğu, uçak tipi, rüzgar, iniş planlaması gibi faktörleri göz önünde bulundurarak en uygun yaklaşma sıralamasını oluşturmaktadır. Bu sistem sayesinde yaklaşma ve yol kontrolörleri arasındaki uçuş seviyesi, hız ve uçuş başı gibi koordinasyon işleri de kolaylaşmaktadır [48].

Amsterdam Schipol Havaalanı, Hava Trafik Hizmet Sağlayıcı, KLM havayolları ve Eurocontrol ortaklığında Schipol Havaalanı için SARA (Speed and Route Adviser) aracı geliştirilmiştir. SARA aracı daha iyi alçalma profili sağlamak için tavsiyelerde bulunmaktadır. SARA sayesinde terminal sahası içerisinde gerçekleşen düz uçuşlarda uçuş mesafesinde uçuş başına ortalama 2.4NM azalma sağlanmıştır [4].

Uluslararası kuruluşlar ve ülkeler bazında havacılığın atmosfere olan zararlı etkilerinin azaltılması ile ilgili olarak hava trafik yönetim sistemleri içerisindeki verimliliği artırabilmek için yapılan çalışmalar ve bu çalışmaların sonuçları Çizelge 1.4’de verilmiştir.

Çizelge 1.4. Hava trafik sisteminin etkinliğini arttırmaya yönelik yapılan uluslararası çalışmalarda elde edilen yakıt tasarrufu ve emisyon kazançları

Çalışma kapsamı	Çalışma bölgesi	İncelenen uçuş veri sayısı	Elde edilen kazançlar
Taksi	Paris, Fransa	353	Uçuş başına 190-1200 kg yakıt tasarrufu
Terminal Sahası	Paris, Fransa	82	Uçuş başına 100-1250kg yakıt tasarrufu
Terminal Sahası	Stockholm, İsveç	11	Uçuş başına 450-950 kg yakıt tasarrufu
Terminal Sahası	Madrid, İspanya	62	Uçuş başına 250-800 kg yakıt tasarrufu
Yol safhası	Santa Maria, Portekiz	48	Uçuş başına 90-650 kg yakıt tasarrufu
Yol safhası	Reykjavik, İzlanda	48	Uçuş başına 250-1050 kg yakıt tasarrufu
			Yıllık 14,800 ton yakıt tasarrufu
Yol Safhası	İrlanda	Belirtilmemiş	46,800 ton CO ₂ emisyon azalımı
			195,500 dakika uçuş süresi azalımı

Yapılan literatür taraması neticesinde uçak emisyonları ile ilgili en çok üzerinde durulan uçak emisyonu türünün NO_x emisyonu olduğu görülmüştür. Havaalanı ve çevresindeki emisyonlarının belirlenmesi amacıyla 2004 yılına kadar yapılan çalışmalarda 1980'li yıllarında başında ICAO tarafından oluşturulan LTO safha süreleri ve veri tabanı kullanılmıştır. 2004 yılından sonra ise bununla ilgili yapılan çalışmalarda ilgili havaalanları için LTO safha süreleri ayrı hesaplanmaya başlanmıştır. TMA içerisindeki yakıt tüketimlerinin azaltılması amacıyla 2000'li yılların başında CDA prosedürler geliştirilmiştir. 2009 yılından itibaren TMA içerisinde CCO gibi kalkış prosedürleri üzerinde de durulmaya başlanmıştır. 2009 yılından günümüze kadar yapılan çalışmalarda ise sadece TMA içerisinde değil ayrıca yol safhasından itibaren yapılacak iyileştirmeleri yakıt tüketimine ve emisyonla olan etkileri üzerinde durulmaktadır.

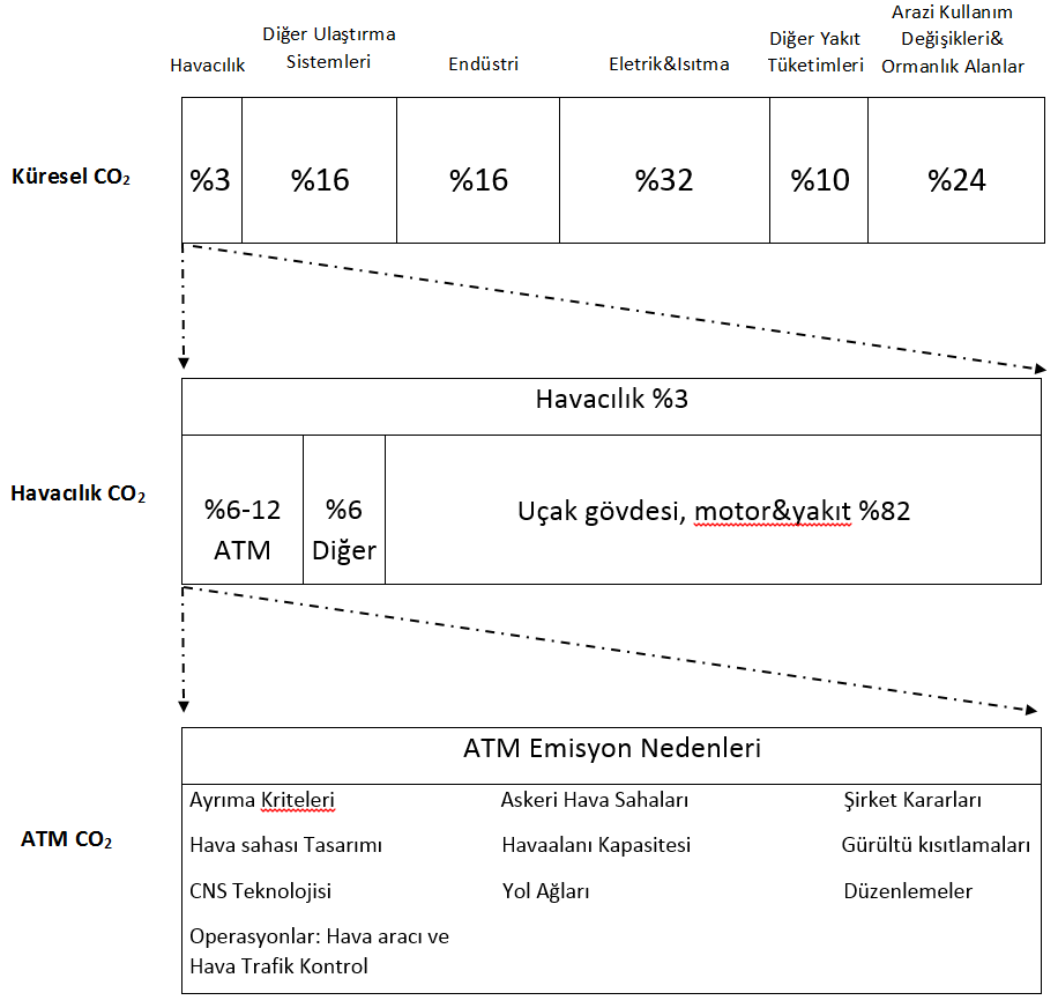
Bir sonraki bölümde Hava Trafik Yönetimi'nin temel amacı ve faaliyetleri ile uçak emisyonları ve bu emisyonların çevreye olan etkileri ele alınacaktır.

2. HAVA TRAFİK YÖNETİMİ VE UÇAK EMİSYONLARI

Mükemmel bir havacılık endüstrisi, ekonomik refahın ana elemanlarından biri, küreselleşmenin ise anahtarı olarak görülmektedir. Havacılığın; iş ve refah, kültürler arası anlayış, dünyanın diğer bölgelerinden gelen ürünlere ulaşmak, geliştirmekte olan ülkelerin büyümesini hızlandırmak gibi sosyo-ekonomik faydaları söz konusudur. Bununla birlikte; hava kalitesinin azalması ve iklim değişimi gibi istenmeyen çevre sorunlarını da ortaya çıkarmaktadır [50].

Petrol kökenli yakıtların yanma reaksiyonunun sebep olduğu çevre sorunları doğal kaynakları ve canlı yaşamını tehdit etmektedir. Bu nedenle her geçen gün artan hava trafiği, havacılığın çevresel etkilerinin de artması anlamına gelmektedir. Bununla birlikte çağdaş ve sanayi odaklı toplumlar havacılık kaynaklı ekonomik refah ile yüksek çevre kalitesi arasında çelişkiye düşmektedirler [51].

Günümüzde dünya üzerinde toplam CO₂ emisyon miktarının %3'lük kısmı havacılık sektöründen kaynaklanmaktadır. Havacılık sektörünün neden olduğu CO₂ emisyon miktarının büyük bir kısmı (yaklaşık %82) uçak motorları ve kullanılan yakıt neticesinde ortaya çıkmaktadır. ATM verimsizliğinden kaynaklanan CO₂ emisyon miktarı ise havacılık kaynaklı emisyonun %6 ile %12'lik kısmını kapsamaktadır [1]. Bu %6-12'lik kısmın azaltılması için bu verimsizliğin uçuşun hangi safhalarında ve ne sebeple oluştuğunun belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 2.1'de ATM içerisinde gerçekleşen fazla CO₂ emisyonunun nedenleri gösterilmiştir. Buna göre; ATM verimsizliğinin başlıca nedenleri hava sahası tasarımları, yol ağları, hava trafik kontrolörünün talimatları, askeri hava sahası yapıları, havaalanı kapasitesi ve havayolu şirketlerinin kararları olarak sıralanabilir. Ayrıca uçaklar arasında uygulanması gerekli dikey ve yatay ayırma kriterleri ve havaalanlarında uygulanan gürültü önleme prosedürleri gerçekleşen fazla emisyonların ATM kaynaklı nedenlerindedir.

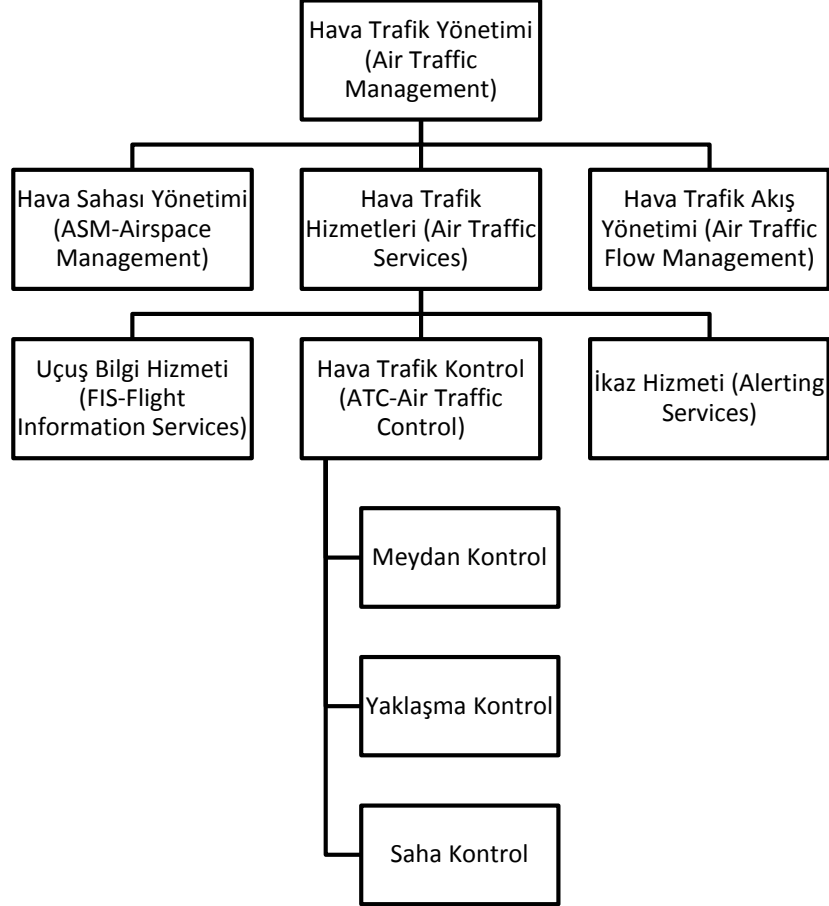


Şekil 2.1. Havacılıkta ATM'e bağlı CO₂ seviyesi ve nedenleri [1]

2.1 Hava Trafik Yönetimi

Hava Trafik Yönetimi'nin temel amacı, uçuşların bütün safhalarında yer temelli ve havayla bağlantılı sistemlere dayalı olarak hava trafik akışının emniyetli, hızlı, düzenli ve ekonomik bir şekilde gerçekleştirilmesidir. Bir başka tanıma göre; hava trafik yönetimi, sorumluluk alanları içindeki hava trafik akışları ve hava sahasının en etkin kullanımını planlama ve organize etmekle yetkili otoritelerin işbirliği içindeki çalışmalarını açıklamak üzere kullanılan bir terimdir [52]. ATM aynı zamanda hava sahasının en etkin şekilde işletilmesi anlamında da kullanılmaktadır.

ATM sistemi, Şekil 2.2’de gösterildiği üzere Hava Trafik Hizmetleri (ATS- Air Traffic Services), Hava Trafik Akış Yönetimi (ATFM- Air Traffic Flow Management) ve Hava Sahası Yönetimi (ASM- Airspace Management) faaliyetlerinden oluşmaktadır. Bu birimlerin birbirleri ile sürekli bir etkileşimi söz konusudur [53].



Şekil 2.2. Hava Trafik Yönetimi Faaliyetleri

Hava Sahası Yönetimi'nin amacı, ilgili hava sahası yapısına uygun olarak, çeşitli kategorilerdeki kullanıcılar arasında kısa süreli gereksinimler hakkında dinamik zaman paylaşımıyla hava sahasının kullanımını sağlamaktır. Optimum hava sahası, uçakların seyahatleri sırasında minimum yakıt sarfiyatını gerçekleştirebileceği yolu ve uçuş irtifasını kullandığı, mevcut ve uzun vadeli trafik talebine yeterli olan, havadaki beklemelerin minimum olduğu ve diğer uçaklarla çarpışma tehlikesinin en az olduğu hava sahasıdır. ASM hava sahası yol yapısının

tasarlanması ve sektörisasyon işlemini içermektedir. Ticari hava taşımacılığı, askeri operasyon hava trafiği ve genel havacılık faaliyetlerini sürdürenler ise kullanıcılarıdır.

Hava Trafik Akış Yönetimi (ATFM: Air Traffic Flow Management) hizmetinin amacı, hava trafik kontrol sisteminin kapasitesine göre, bir sahaya ya da sahalar arasındaki zamanla talebin artması ya da artmasının beklendiği durumlarda hava trafiği akışının en uygun şekilde sağlanmasıdır. ATM sistemi içerisinde hava sahası kullanıcıları için verimli bir hizmet sunumu için talep kapasite dengesinin sağlanması gerekmektedir. ATFM, hava trafik akışının belirli bir bölgedeki kapasitesi ele alınarak emniyetli, düzenli ve hızlı bir şekilde işletilmesi ya da organizasyonudur. Hava trafiği kapasitesinin tepe noktaya ulaştığı durumlarda ATFM hava trafik akışını düzenleyerek hava trafik kontrolüne destek olmaktadır.

Hava Trafik Hizmetleri, uçaklar arasındaki çarpışmaları önlemek ve düzenli bir trafik akışını sürdürmek, hızlandırmak amacıyla verilen bir hizmettir [54,55]. Hava trafik hizmeti, kontrollü hava sahalarındaki uçuşlara ve bütün kontrollü meydanlardaki trafiklere sağlanmaktadır. Uçakların kontrolü ile ilgili prosedürler otoritelerce daha önceden belirlenmiştir.

Hava trafik hizmetleri, ICAO tarafından belirlenmiş amaçları gerçekleştirmek için verilmektedir. Bu amaçlar, ICAO'nun Annex 11 dokümanında şu şekilde sıralanmıştır;

- Uçakların birbirleri ile çarpışmasını önlemek,
- Manevra sahasındaki uçakların birbirleri ve o sahadaki engellerle çarpışmasını önlemek,
- Düzenli bir trafik akışını sürdürmek ve hızlandırmak,
- Uçuşların emniyetli ve verimli bir biçimde yürütülmesi için faydalı bilgiler ve tavsiyeler sağlamak,
- Arama-kurtarma gereken uçaklar için gerekli kuruluş veya birimlere haber vermek ve gerektiğinde yardımcı olmak.

Hava trafik hizmetlerinin sağlanması ihtiyacı, hava trafiği kapsayan uçak tipleri, hava trafik yoğunluğu, meteorolojik şartlar ve ilgili olabilecek diğer faktörler göz önünde bulundurularak belirlenmektedir. Yukarıda belirtilen amaçların

gerçekleştirilmesi için hava trafik yönetimi kendi içerisinde hava trafik kontrol hizmeti, uçuş bilgi hizmeti ve ikaz hizmeti olmak üzere üçe ayrılmaktadır.

Uçuş bilgi hizmeti, ölçüleri belirli hava sahası olan uçuş bilgi bölgesi (FIR-Flight Information Region) içerisinde verilmektedir ve uçuşların emniyetli, verimli bir şekilde yapılması için yararlı güncel bilgiler verilmesi ve önerilerde bulunulması amacı ile sunulan bir hizmettir. Uçuş bilgi hizmeti; seyrüsefer yardımcılarının çalışma durumları, hava raporu, volkanik aktivite, atmosferdeki zehirli kimyasal ve radyoaktif maddeler gibi uçuş emniyetini etkileyecek birçok bilgiyi içerir. Bu bilgilerde herhangi bir değişiklik olduğu zaman, uçuş bilgi hizmeti yayınları en kısa sürede yenilenmelidir.

İkaz hizmeti, arama ve kurtarma hizmetine ihtiyaç duyan uçaklar için ilgili kuruluşlara bilgi vermek ve bu kuruluşlardan gelen talebin olması durumunda yardım etmek üzere FIR içerisinde verilen bir hizmettir. İkaz hizmeti, hava trafik kontrol hizmeti sağlanan tüm uçaklara, mümkün olduğunca uçuş planı doldurulmuş uçaklara, yasa dışı bir girişime uğradığı bilinen ya da böyle bir duruma uğradığından kuşku edilen uçaklara verilmektedir.

Hava trafik kontrol hizmeti, Şekil 2.2’de de gösterildiği üzere kendi içerisinde Meydan kontrol (TWR-Aerodrome control), Yaklaşma kontrol (APP-Approach control) ve Saha kontrol (ACC-Area control) olarak üç farklı bölüme ayrılmaktadır. Bir uçak; kalkış yapılan havaalanına ait meydan kontrol biriminin kontrolünde kalkış yapar. Meydan kontrol ünitesinin sorumluluk alanı olan kontrol bölgesinden çıkışından sonra uçağın kontrolü artık yaklaşma kontrol ünitesine devredilir. Uçak, yaklaşma kontrol ünitesinin sorumluluğunda belirli bir seviyeye tırmandırıldıktan sonra ya da belirli bir noktada uçağın sorumluluğu saha kontrol ünitesine geçer. Uçak saha kontrol ünitesinin sorumluluk alanı olan hava yollarındaki seyahati süresince bu üniteden hizmet alır. Yaklaşma ve yol kontrol biriminde çalışan kontrolörler belirli ayırma kriterleri esas alınarak uçaklar arasında yatay ya da dikey ayırma sağlamaktadırlar [56]. Uçakların varış meydanına yaklaşması ile birlikte bu aşamalar tersine işlemeye başlar.

Meydan kontrol hizmeti, bir meydanın çevresindeki meydan turunda olan ve manevra sahası üzerinde hareket eden tüm uçaklara, kısacası meydan trafiğine verilen hava trafik kontrol hizmetidir. Meydan kontrol hizmeti, meydan kontrol

kulelerinde çalışan hava trafik kontrolörleri tarafından sağlanmaktadır. Bu birimde çalışan hava trafik kontrolörleri sorumluluk sahalarına göre üç farklı grupta toplanmaktadırlar. Bunlar; pist üzerindeki çalışmalar ile sorumluluk sahalarındaki uçuşlardan sorumlu olan meydan kontrolörleri, pistler dışında manevra sahasındaki trafiklerden sorumlu olan yer kontrolörleri ve motor çalıştırma ve ATC iznini aktarmaktan sorumlu olan ATC izni dağıtım kontrolörleridir. Trafik yoğunluğunun az olduğu durumlarda bu üç görev tek bir kontrolöre verilebilmektedir [57]. Bu birimdeki kontrolörler, meydan trafiğini net bir şekilde izlemelerine olanak veren meydan kontrol kulelerinde çalışmaktadırlar. Meydan kontrolörleri, meydanadaki ve manevra sahasındaki tüm uçuş operasyonlarını, araçlarını ve personeli sürekli izlemek ve kontrol etmek ve gerekli birimlerle koordinasyon sağlamaktan sorumludurlar. Meydan kontrol hizmeti sırasında uçaklar arasında zaman, mesafe ve uçak ağırlık kategorisine dayalı kalkış ve geliş ayırmaları uygulanmaktadır. Uçaklara gerekli talimatları iletirken çift yönlü radyo frekansını kullanmaktadırlar.

Yaklaşma kontrol hizmeti, uçakların birbirleriyle çarpışmasını önlemek ve düzenli bir trafik akışı sağlamak ve hızlandırmak amacıyla kontrollü uçuşların iniş ve kalkışla ilgili kısımlarında verilen hava trafik kontrol hizmetidir [58]. Yaklaşma kontrol hizmeti, yaklaşma kontrol birimleri tarafından verilmektedir. Yaklaşma kontrol hizmetinin ve meydan kontrol hizmetinin ya da saha kontrol hizmetinin fonksiyonlarını tek bir ünitenin sorumluluğu altına toplamanın gerekli ya da istenebilir olduğu durumlarda; bu hizmet bir meydan kontrol kulesi tarafından ya da saha kontrol merkezi tarafından gerçekleştirilebilir [59]. Yaklaşma kontrol ünitesi tek bir hava alanı için oluşturulabileceği gibi birden fazla hava alanına hizmet için de oluşturulabilir. Yaklaşma kontrol hizmeti, kalkış ve geliş olmak üzere iki farklı kısımda verilmektedir. Kalkış kontrol kısmında çalışan kontrolörler, uçakların kontrollerini kalkıştan hemen sonra meydan kontrol biriminden devralarak, uçakları uçuş planlarında belirtilen uçuş yönüne yönlendirirler ve seyir seviyelerine ulaşmaları için tırmandırırlar. Daha sonrasında, sorumluluk sahalarından uzaklaşan ya da belirli bir seviyeye tırmanan uçakları saha kontrol birimine devrederler. Geliş kontrol kısmında ise uçaklar belli uçuş seviyesinin altına indiklerinde ve belli bir bölgede saha kontrol biriminden devralınırlar. Bu uçakların, kullanılan piste göre havaalanına yaklaşmalarını sağlar. Uçaklar

meydan kontrol kulesinin sorumluluk sahasındaki bölgeye geldiğinde ve yeterli seviyeye alçaldığında meyan kontrol birimine devredilir. Aynı kontrolör tarafından geliş ve kalkış kontrol hizmeti verilebilmesinin yanı sıra trafik yoğunluğunun fazla olduğu durumlarda ayrı sektörler olarak da ve sağlanabilmektedir. Geliş ve kalkış uçaklarını en az gecikme oluşacak şekilde sıralayarak meyan ve saha kontrol birimlerine devretmek yaklaşma kontrol biriminin en önemli görevidir. Yaklaşma kontrolörü sıralama yaparken uçaklar arasında uzunlamasına, yanlamasına ve dikey ayırmalarda minimumların altına düşmeden sıralamasını tamamlamak zorundadır. Yaklaşma kontrol hizmeti, bir ya da daha fazla meyanı kapsayan, hava trafik hizmet yollarıyla tanımlı bir saha olan TMA içerisinde verilmektedir. TMA içerisindeki trafik yoğunluğuna göre yaklaşma kontrolörlerinin iş yükü değişiklik göstermektedir. Yoğun sahalarda yaklaşma kontrolörlerinin üstün performans göstermeleri gerekmektedir.

Geleneksel prosedürler ile belirlenmiş olan geliş ve yaklaşmalarda, uçakların iniş gerçekleştirecekleri pist yönünde erken ve kademeli olarak alçalmalarına imkân tanıyor olması nedeni ile iniş yapacağı havaalanına yaklaşmakta olan uçak son yaklaşma safhasındaki *glideslope* açısını yakalamadan önce sabit hızda genellikle alçak uçuş irtifasını muhafaza edebilmektedir. Ancak uçaklar sabit hız ve alçak irtifayı muhafaza etmek için yüksek motor itkisine ihtiyaç duymaktadır. Bu da hem yaklaşma safhası sırasındaki yakıt tüketimini hem de buna bağlı oluşan uçak emisyonunu arttırmaktadır. Kalkış safhası yine aynı şekilde toplam harcanan uçuş yakıtının büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Kalkış sırasında oluşacak düz uçuş periyotları ilave yakıt tüketimi anlamına gelmektedir.

Kalkış ve geliş safhalarında meyan gelen fazla yakıt tüketimlerini önlemek amacıyla günümüzde Devamlı Alçalarak Yaklaşma (CDA-Continuous Descent Approach) ve Devamlı Tırmanarak Kalkış (CCD-Continuous Climb Departures) prosedürleri geliştirilmiştir. CDA prosedürler geleneksel yaklaşmalara nazaran uçağın yaklaşma sırasında erken veya kademeli alçalarak uzun süreli alçak irtifada düz uçuşuna imkân tanımamaktadır. Bu sayede yakıt tüketimi ve emisyonun azaltılmasını sağlamaktadır. CCD operasyonlar da uygun hava sahası ve prosedür tasarımları ve ATC prosedürleri ile uçağın performansına göre en uygun uçuş

profilinin oluşturulmasını olarak tanımaktadır. Bu sayede yakıt tüketimi ve emisyonunda önemli kazançlar sağlanmaktadır.

Saha kontrol hizmeti, uçaklar arasındaki çarpışmayı önlemek, düzenli bir trafik akışı sağlamak ve hızlandırmak amacıyla kontrollü uçuşların meydan ve yaklaşma kontrol dışında kalan bölümünde sağlanan hava trafik kontrol hizmetidir [54]. Başka bir deyişle saha kontrol hizmeti seyir seviyelerinde uçan uçaklara sağlanmaktadır. Saha kontrol hizmeti bir saha kontrol merkezi (ACC); ya da herhangi bir ACC'nin olmaması durumunda, belli bir boyuta sahip olan kontrol bölgesi esas olarak yaklaşma kontrol hizmetinin sağlanmasından sorumlu olan yaklaşma kontrol ünitesi tarafından sağlanabilmektedir. Saha kontrol merkezi diğer hizmetlerin üstünde daha geniş kapsamda gerçekleştirilmekte ve sorumluluk sahası daha geniş olduğu için diğer birimlerin üstünde yer almaktadır. Uçaklar arasında çarpışmayı önlemek amacıyla uzunlamasına, yanlamasına ve dikey ayırma esasları uygulanır. Türk hava sahası içerisinde İstanbul ve Ankara olmak üzere iki saha kontrol merkezi bulunmaktadır.

İklimsel değişim perspektifinden en önemli parametre, sera gazları emisyonlarındaki ve atmosferin radyoaktif özelliklerini etkileyen diğer emisyonlardaki artışlardır. İnsan sağlığını ve çevreyi etkileyen birçok havacılık kaynaklı gaz ve partikül emisyonu bulunmaktadır. Uzun dönem etkiler açısından, uçak kaynaklı en önemli sera gazı direkt olarak havacılık yakıt tüketimi ile orantılı olan karbondioksit (CO₂) emisyonudur [51]. CO₂, yerelden ziyade küresel anlamda daha önemli olan bir emisyon türüdür. Özellikle havacılık için göz önünde bulundurulması gerekli tek emisyon CO₂ emisyonu değildir. Uçaklar ayrıca, iklimsel değişikliklere neden olan azot oksitler (NO_x), duman ve su buharı da üretmektedirler [51]. Bununla birlikte bazı emisyon türleri, emisyon envanterinin oluşturulması için gereklidir. Hangi emisyon türlerinin envanter için gerekli olduğu ülke gerekliliklerine göre belirlenebilir. Emisyon envanteri için öncelikli emisyon türleri şunlardır [17,60];

- a) Azot oksitler (NO_x-Nitrogen Oxides)
- b) Uçucu organik bileşikler (VOC-Volatile Organic Compounds), metan olmayan hidrokarbonlar (NMHC-Non-methane hydrocarbons) dahilinde
- c) Karbon monoksit (CO-Carbon monoxide)

- d) Partikül madde (PM-Particulate Matter)
- e) Kükürt oksit (SO_x - Sulphur Oxides)

Havacılıkla ilgili çevresel konuların hava trafik hizmet sağlayıcıları tarafından iyi bir şekilde anlaşılması gerekmektedir. Bu bölümde havacılık emisyonları ve etkileri anlatılacaktır.

2.2 Uçak Emisyonları

Günümüzde uçakların uçuşu için fosil yakıt kullanımı için bir alternatif olmaması nedeniyle mevcut nesil uçaklar önümüzdeki en az 30 yıl için kullanılmaya devam edecektir. Bu yüzden, alternatif bir teknoloji şu andan itibaren 10 yıl sonrası için kullanılabilir hale gelse bile biz hala başka bir 40 yıl için CO_2 üretme ihtimali ile karşı karşıya kalırız. İmalat ve karayolu ulaşımı benzeri birçok diğer endüstrinin fosil yakıt kullanma alternatifleri bulunması nedeniyle, hava taşımacılığının CO_2 üretiminde payı muhtemelen artacaktır [61].

Uçak motorlarında yakıtın yanması sonucu başta karbondioksit (CO_2) ve su buharı (H_2O) olmak üzere, azot oksitler (NO_x) ve diğer bazı gazlar ortaya çıkar [62,63]. Uçak emisyonlarının yaklaşık %70'ini CO_2 , %30'undan biraz azını H_2O ve geri kalan %1'den az kısmını ise NO_x , CO, SO_x , VOC emisyonları oluşturmaktadır [64]. Uçak emisyonları, ortaya çıktıkları yüksekliğe (yere yakın ya da yüksek irtifada) bağlı olarak yerel hava kalitesi kirleticisi ve/veya sera gazı olarak kabul edilmektedirler. Çalışmanın bundan sonraki bölümünde emisyon türleri sırasıyla açıklanacaktır.

2.2.1 Karbondioksit (CO_2)

Sera gazları içerisinde karbondioksit, küresel ısınmada %50 paya sahiptir. Bunun nedeni, hem miktarının çok hem de karbondioksit moleküllerinin yüzeyinde gelen giden radyasyon dengesini değiştirir ve atmosferin ısınmasına katkıda bulunur [61]. 350 litrelik yakıttan yaklaşık 1 ton CO_2 oluşmaktadır. Havacılık kaynaklı karbondioksit emisyonu iklim üzerinde elektrik santralleri, sanayi ve

ulaşım gibi karasal emisyonlarla aynı etkiye sahiptir. Küresel ısınmaya karşı alınacak önlemlerin başında karbondioksit salınımının azaltılması gelmektedir.

2.2.2 Su buharı (H₂O)

Su buharı küresel ısınmada sera etkisi bakımından en başta gelen gazlardandır. Bol miktarda bulunduğu atmosfer katmanı genellikle bulutların olduğu yseklerdeki atmosfer tabakalarındadır. O nedenle daha çok güneşten gelen ışınları tutmada ve yseklerle yansıtma etkilidir. Havacılık kaynaklı su buharı emisyonunun direkt ısıtma etkisi vardır. Su buharının atmosferde kısa bir ömrü vardır ve hidrolojik döngü ile kontrol edilmektedir. Ysek irtifalardaki su buharı, uçakların arkasında yeryüzünden bulut benzeri olarak görünen yoğunlaşma izlerini (contrail) oluşturmaktadır. Yoğunlaşma, genel olarak sıcak bir yüzeyin soğuk bir ortamdan geçmesiyle meydana gelmektedir. Başka bir ifadeyle uçaklardan çıkan sıcak egzoz gazı, çevresindeki düşük buhar basıncılı ve daha soğuk ortamla karıştığında arkasında yoğunlaşma izi meydana gelir [65]. Yoğunlaşma izlerinin ısıtma etkilerinin karbondioksite eşit olduğuna inanılmaktadır. Yoğunlaşma izleri alçak seviyelerde oluşmamaktadır, bu yüzden alçaktan uçularak önlenebilmektedir. Fakat bu durum, uçaklar alçak irtifalarda daha fazla yakıt harcadıkları için pratikte gerçekleştirilemez [66].

2.2.3 Azot oksitler (NO_x)

Azot oksitlerin ana kaynakları egzoz gazları ve fosil yakıtlarıdır. Azot oksit, azot ve oksijenin birleşimiyle oluşur. Azot oksit emisyonu, atmosferde kimyasal reaksiyon serisi başlatır. Azot oksit, ışık varlığında ozon (O₃) oluşturur [62]. Subsonic uçaklardan kaynaklı azot oksit emisyonu uçağın uçtuğu daha düşük irtifalarda ozonun yerel üretimini hızlandırır. Azot oksitlerin küresel ısınmada payı %5'dir. Yakılan 1 kg yakıttan yaklaşık olarak 11-18 gr NO_x meydana gelmektedir.

Azot oksitler akciğerdeki nemle birleşerek nitrik asit oluştururlar ve solunum yolu hastalıkları bulunan kişiler için tehlike teşkil ederler.

2.2.4 Uçucu organik bileşikler (VOC)

VOC'ler önemli dış ortam hava kirleticileridir. Bu alanda kendi aralarında metanlar (CH₄) ve metan olmayanlar olarak farklı kategorilere ayrılırlar. Metan, artan küresel ısınmaya katkıda bulunan, son derece etkili bir sera gazıdır. Diğer hidrokarbon VOC'ler, ozon oluşturmak suretiyle metanın atmosferdeki ömrünü uzatan rollerinden ötürü önemli sera gazlarıdır; ancak bu etki yerel hava kalitesine bağlıdır [51,67].

2.2.5 Karbon monoksit (CO)

Karbon monoksit renksiz, kokusuz ve tatsız bir gaz olup karbon içeren yakıtların eksik yanması ile ortaya çıkar. Birincil bir hava kirletici olan karbon monoksit, oksijen eksikliği, tutuşma sıcaklığı, yüksek sıcaklıkta gazın kalıcılık zamanı ve yanma odası türbülansı gibi etkenlerden birinin eksikliğinde tam olmayan bir yanma sonucunda CO₂ yerine meydana gelmektedir [68]. Şehir havasında bulunan karbon monoksit insan sağlığına son derece önemli etkilerde bulunmaktadır. Bu etkilerden en önemlisi de karbon monoksitin kandaki vücut hücrelerinin oksijen taşıma kabiliyetini azaltmasıdır. Sonuç olarak bu durum vücudun oksijen miktarını ciddi bir şekilde azaltarak ölümlere yol açabilmektedir.

2.2.6 Partikül Madde (PM)

Partikül madde terimi, havada bulunan katı partiküller ifade eder. Bu partiküllerin tek tip bir kimyasal bileşimi yoktur. Katı partiküller insan faaliyetleri sonucu ve doğal kaynaklardan, doğrudan atmosfere karışır. Atmosferde diğer kirleticiler ile reaksiyona girerek PM'yi oluşturur ve atmosfere verilirler.

2.2.7 Kükürt dioksit (SO₂)

SO₂ emisyonları doğrudan motor ile ilgili olmayıp yakıt içindeki kükürt bileşenlerine bağlıdır. Bu emisyonlar asit yağmurları ile tekrar toprağa

karışmaktadır. SO₂'yi yakıttan tamamen bertaraf etmek mümkün olsa da motor yağlama işlemi nedeniyle bazı organik asitlerin yakıtta ilâve edilmesi gerekmektedir

2.2.8 Ozon (O₃)

Ozon, yoğunluğu oldukça yüksek olan güçlü bir sera gazıdır. Ozon yoğunluğundaki artış genellikle uçak kaynaklı azot oksit miktarı ile orantılı olmaktadır. Ozon gazının küresel ısınmadaki sera etkisi %7 kadardır. Ozonun oluşması için en önemli öncü bileşimler NO_x ve VOC'dır. Ayrıca, ozon atmosferik metanın (CH₄) yok edilmesinden sorumludur. Metan atmosferik ömrü 14 yıl olan güçlü bir sera gazıdır. Bu nedenle metanın yok edilmesi havacılık emisyonlarının sebebiyle oluşan ısınmanın büyüklüğünü azaltacaktır [51].

2.3 Uçak Emisyonlarının Çevresel Etkisi

Uçak emisyonlarının, küresel ısınma ya da ışınımsal zorlama (radiative forcing) gibi küresel iklim olaylarını ortaya çıkartan önemli bir etken olduğu bilinmektedir. Küresel ısınma, atmosfere salınan gazların neden olduğu düşünülen sera etkisinin sonucunda, Dünya üzerinde yıl boyunca kara, deniz ve havada ölçülen ortalama sıcaklıklarda görülen artışa verilen isimdir [69].

Işınımsal zorlama ise, yerküre/atmosfer sisteminin enerji dengesindeki herhangi bir değişiklik olarak ifade edilmektedir [70]. Ortalama koşullarda, Yerküre/atmosfer sistemine giren kısa dalgalı güneş enerjisi ile geri salınan uzun dalgalı yer ışınımı dengededir. Güneş ışınımı ile yer ışınımı arasındaki bu dengeyi ya da enerjinin atmosferdeki ve atmosfer ile kara ve okyanus arasındaki dağılışını değiştiren herhangi bir etmen, iklimi de etkileyebilmektedir. Havacılık emisyonları ile ilgili ışınımsal zorlama modelleri, havacılığın toplam ışınımsal zorlama üzerinde %3.5 oranında bir katkısı olduğunu ve 2050 yılına kadar bu oranın %3-7 arasında artabileceği göstermektedir [51].

İklim ve hava etkileri açısından sonuçları tahmin edilebilir ya da anlaşılır değildir. En son Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC-

Intergovernmental Panel on Climate Change) raporlarında en iyi ihtimalle sıcaklık artışının 0.6 ile 4°C arasında olacağı belirtilmiştir. Fakat son zamanlardaki araştırmalarda Çin ve Hindistan'daki enerji tüketimin hızlı bir şekilde arttığı ve buna bağlı olarak CO₂ emisyonundaki artışında IPCC tahminlerindeki en yüksek oranda olduğunu göstermektedir [66]. Buna göre; dünya ortalama yüzey sıcaklığının 2100 yılına kadar 1.8 ile 5.8°C arasında artacağı tahmin edilmektedir. Gelecekte bu sıcaklık artışları, daha yüksek yerel sıcaklıklar, daha az soğuk günler, daha fazla sağanak yağmur, deniz seviyesinin artması gibi birçok iklimsel etkiye neden olacaktır [66]. Çizelge 2.1'de havacılık emisyonlarının rolleri ve dünya yüzeyine olan etkileri gösterilmektedir.

Çizelge 2.1. Havacılık emisyonları ve küresel etkileri [51].

<i>Emisyon</i>	<i>Rolü</i>	<i>Dünya yüzeyindeki etkisi</i>
Karbondiyoksit	Sera gazı etkisi	Isınma
Su buharı	Sera gazı etkisi	Isınma
	Duman izi üretimi	Isınma
Azot oksit	Ozon oluşumu (sera etkisi gazı)	Isınma
	Metan tüketimi (sera gazı etkisi)	Soğuma
Kükürt oksit ve sülfürik asit	Güneş ışınlarının yansıtılması	Soğuma
	Duman izi üretimi	Isınma
	Cirrus bulutlarının artması	Isınma
Duman	Güneş ışınlarının yansıtılması	Isınma
	Duman izi üretimi	Isınma
	Cirrus bulutlarının artması	Isınma

Havacılık, hem havaalanı seviyesinde hem de bölgesel ve küresel seviyede oldukça önemli çevresel etkilere sahiptir. Yerel atmosferik konular, yerel hava kalitesi ve yakın bölgelerde yaşayan halkın sağlığına etki eden havaalanı ve çevresindeki emisyon ile ilgilidir. Küresel seviyede atmosferik etkiler, iklimi etkileyen havacılık emisyonları olarak ifade edilmektedir [71].

Uçak operasyonlarından gelen hava kalitesi etkilerinin başlıca kaynakları, ana motorlar, frenler, APU sistemi ve yardımcı apron ekipmanlarıdır. 3000 feetin altındaki, başka bir deyişle havaalanındaki ve çevresindeki uçak operasyonları hava kalitesi için önemlidir. Kötü hava kalitesinin solunum yolları tahrişi ya da kanser gibi insan sağlığını bozan bir dizi etkileri olabilmektedir.

Hava kirliliği ile ilgili uçak operasyonları iki temel yolla hava kalitesini etkileyebilmektedir [61];

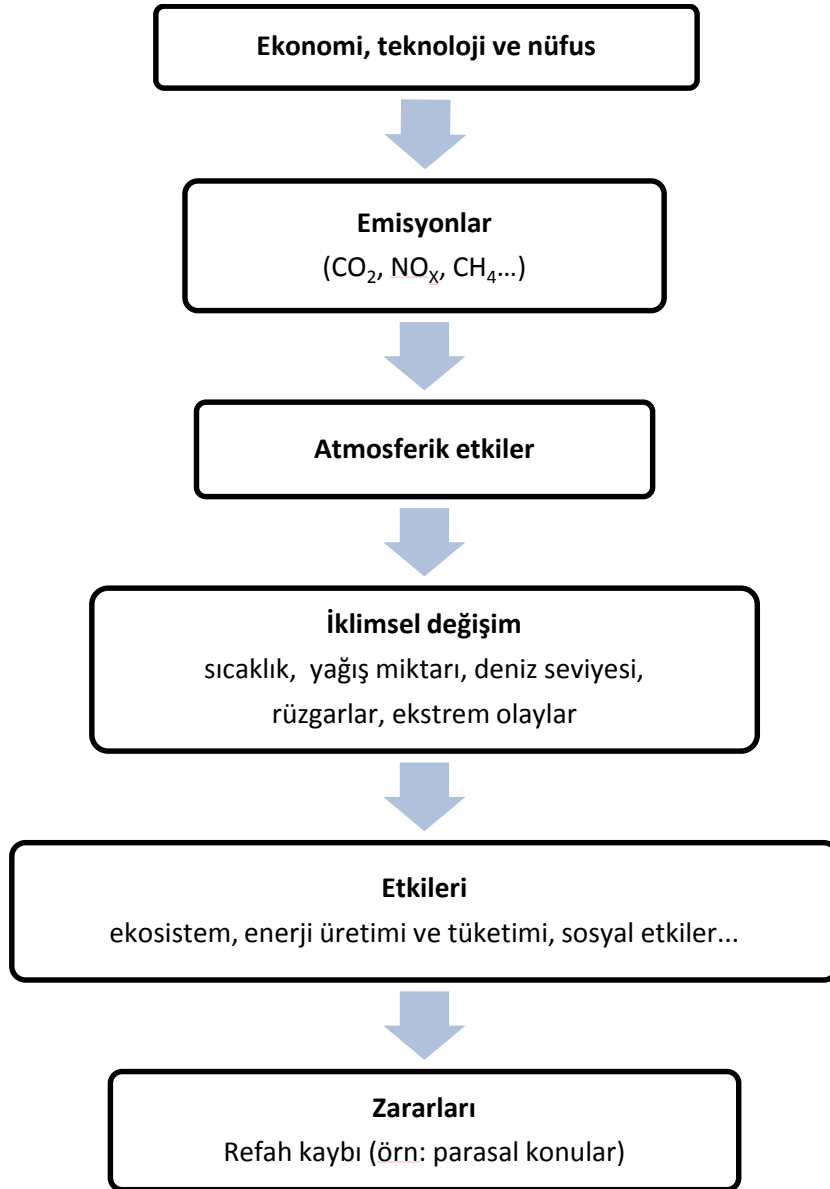
- Gaz yağı, keskin lastik veya yanan ürünlerin neden olduğu kokular sıkıntıya neden olur.
- NO_x ve organik partiküller gibi zararlı emisyonların uzun dönemde insan sağlığı üzerinde daha fazla etkileri söz konusudur.

Hava kalitesi ile ilgili iki temel egzoz gaz bileşeni NO_x ve partikül maddedir (PM_{particulate matter}). Belirli limitler aşılsa her iki bileşenin de insan sağlığı üzerinde direkt bir etkisi olabilmektedir. Genel anlamda, modern yakıt verimli motorlar daha yüksek sıcaklıkta çalışırlar ve daha fazla NO_x üretme eğilimi gösterirler. Bu nedenle bütün motorlar daha yüksek itki ayarlarına gerek duyulan kalkış safhasında daha büyük miktarlarda NO_x üretirler.

Partikül madde iki ayrı kaynaktan gelmektedir. İlki motorlardaki yanma sürecinin bir parçası olarak ikincisi de uçağın mekanik frenlerinin aşınmasından kaynaklanmaktadır.

Havacılık emisyonlarının, iklim değişimi üzerinde yer seviyesinde meydana gelen olumsuz etkilerinden daha büyük bir etkisi söz konusudur. Bunun nedeni, yüksek irtifalardaki emisyonların iklimsel değişim sonuçlarına neden olan pek çok kimyasal ve fiziksel süreçleri körükleyebilmesidir. İklim değişimi açısından en önemli sera gazı CO₂ emisyonudur. CO₂'nin atmosfer içerisinde uzun dönemler yaşayabildiği için nerede ya da hangi seviyede ortaya çıktığının önemi yoktur. CO₂ emisyonu küresel ve uzun dönem bir kümülatif etkiye sahiptir. Daha yüksek atmosferde NO_x, ozon ve su buharına dönüşebilmektedir ve bu parçacıklar yoğunlaşma izinin gelişimine yol açabilmektedir. Uçaklardan çıkan atmosferde kalan bu yoğunlaşma izleri, güneşten gelen bir kısım ışınımı geri uzay boşluğuna yansıtırlar, atmosferin soğumasına da yol açarlar. Ayrıca, yeryüzünden atmosfere yansıyan ışınımı da yeryüzüne doğru yansıtarak atmosferin ısınmasına yol açarlar ve sera etkisine katkıda bulunurlar. Havanın uçak üzerine etkidiği sürüklenme etkisini azaltmak amacıyla uçuşlar mümkün olduğunca üst irtifalarda gerçekleştirilir ve bu sayede yakıt tasarrufu sağlanır. Sağlanan bu yakıt tasarrufu ile çevresel faktörlere olumlu katkı sağlanır, fakat aynı zamanda oluşan yoğunlaşma izleri ile de atmosfer ısınmasında istenmeyen duruma yol açılır.

İşınımsal zorlama iklimsel değişiklikteki ana güçtür, fakat atmosferin kompleks bir sistem olması nedeniyle işınımsal zorlamanın iklim üzerine etkileri doğrusal değildir. Bu yüzden; iklimsel değişimin ölçülmesi için sıcaklık, yağmur miktarı, ortalama rüzgar hızı ve deniz seviyesi gibi bir çok kriter bulunmaktadır. İklimdeki bu değişimlerin; tarım, arazi kullanımı, enerji tüketimi dahil olmak üzere toplum üzerinde etkileri olacaktır (Şekil 2.3). Sonuçta; bu toplumsal değişimler finansal etkileri değiştirebilmektedir [61].



Şekil 2.3. Havacılığın çevre üzerine etki zinciri [61].

Havacılığın çevresel etkileri ölçmek için şekilde verilen etki zincirindeki herhangi bir parametre kullanılabilir. IPCC, iklimsel değişimin ölçülmesi amacıyla ışınimsal zorlama ve küresel ısınma potansiyeli olmak üzere iki farklı ölçü kullanmaktadır. Işınimsal zorlama, genellikle iki farklı zaman arasında yapılan ölçümle belirlenmektedir [66].

Sera gazları neticesinde yeryüzünde gerçekleşen ısınmanın sadece çevre anlamında değil operasyonlar anlamında da etkileri olacaktır. Operasyonel anlamda gerçekleşen bu etkiler dolaylı olarak yine çevreyi etkilemesi söz konusu olabilecektir. Ortalama sıcaklık arttıkça hava daha az yoğun olacaktır. Sonuç olarak; jet motorlarının maksimum itkisi sınırlı olacak ve bir takım sonuçları ortaya çıkacaktır [61];

- V_R (uçanın burnunu kaldırması için gerekli hız) hızına ulaşmak için gerekli olan pist uzunluğu artacaktır.
- Tırmanma performansı daha az itki nedeniyle olumsuz yönde etkilenecektir.
- Yakıt verimliliği azalacaktır ve uçuş başına yakıt miktarı artacaktır.

2.4 Uçak Emisyonlarının Çevresel Etkilerinin Hesaplanması

Yakıt yandığı zaman karbondioksit ve su buharına dönüşür. Uçakların karbondioksit emisyonları, uçuş boyunca harcanan yakıt miktarına göre hesaplanabilmektedir. Bir kilogram yakıtın yanması ile 3.15 kilogram karbondioksit gazı ortaya çıkar [61].

Karayolu ulaşımının aksine, uçağı seyir irtifasına çıkarmak için gerekli ilave yakıt tüketimi ve uzun menzilli uçuşlar için taşınan büyük miktardaki yakıt nedeni ile harcanan yakıt uçulan mesafe ile doğrusal olarak ölçeklendirilmez. Farklı uçuşlar için karbondioksit emisyonunu birçok farklı faktöre bağlıdır. Bunlar; uçulan mesafe, hava durumu (kuyruk ya da ön rüzgar), kargo yükü, yolcu yükü, ve uçulan irtifadır. Bu şartların hepsinin bilinmemesi nedeniyle emisyonun belirlenmesi için ortalama veriler kullanılmaktadır.

En basit metodoloji, yakıt tüketiminin toplam rakamının ortalama emisyon faktörü ile çarpılmasına dayanmaktadır. Emisyon faktörleri, yakıtın yüzde 10'u uçuşun LTO safhasında kullanılması varsayımına dayanarak bütün uçuş safhaları için ortalama değer olarak alınmıştır [72].

Varsayılan emisyon faktörleri şunlardır [72];

CO₂ : 19.5 tonne C/PJ;

CH₄ : 0.5 kg/PJ,

N₂O : 2 kg/PJ

Toplam emisyon faktörleri ayrıca; NO_x, CO, SO₂ ve metan olmayan VOC için de verilmektedir.

Hava kalitesinin modellenmesindeki en belirsiz yön olarak emisyon envanterleri olarak gösterilmektedir. Bu belirsizlik etkin bir hava kalite yönetimini ve atmosferdeki oluşumu etkileyen mekanizmaların detaylı bir şekilde anlaşılmasını engellemektedir [9].

Hava alanı çevresindeki uçak emisyonları, iniş ve kalkış trafiğinin sayısına göre belirlenmektedir. Uçak motorları uçuşun farklı safhalarında (taksi, kalkış, tırmanma, seyir, yaklaşma) farklı oranlarda kirletici madde ortaya çıkarmaktadırlar. FAA tarafından geliştirilen uçakların PM_{2.5} emisyonlarını yakıt akışı (FF) ve Smoke Number (SN) a göre hesaplama metodu şu şekildedir [9];

$$EI = 0,6 * SN^{1.8} * FF \quad (2.1)$$

EI: Saniyede oluşan PM miligramdır.

FF: Yakıt akışı (kg/s)

ICAO tarafından doküman 9889'da belirtildiği üzere uçak kaynaklı emisyonların hesaplanmasında temel olarak safha zamanı (TIM-Time-in-mode), ana motor emisyon indeksi ve ana motor yakıt akışı parametreleri ele alınmaktadır.

Safha zamanı parametresi, operasyonel uçuş döngüsündeki her bir safha (kalkış, tırmanma, yaklaşma, taksi) için belirlenmiş itki ayarlarında geçirdikleri zaman periyodudur. Havaalanına hizmet veren filodaki toplam emisyonun bulunması amacıyla filo büyüklüğü/tipi ve operasyon sayısı parametreleri de diğer parametrelere ilave edilmektedir. Uçak motoru emisyon indeksi parametresi 1 kilogram yakıt başına ortaya çıkan 1 gram kirletici (g/kg) olarak gösterilirken yakıt akışı parametresi ise 1 saniyedeki 1 kilogramlık yakıt akışı oranı (kg/s) olarak gösterilmektedir. Bu aşamada bu parametreler kullanılarak istenilen doğruluğa göre ICAO tarafından belirlenen üç metodolojiden (basit, ileri ve karmaşık yaklaşım)

biri seçilerek emisyon hesaplamaları gerçekleştirilir. Bu üç metodolojinin her birinin uçak emisyonunun belirlenmesinin doğruluk derecesi bulunmaktadır. Her bir metodoloji, verilerin uygunluğuna bağlı olarak belirli parametrelere ve katkıda bulunan faktörlere göre çeşitli seçenekler içerebilmektedir.

2.4.1 Basit yaklaşım

2.4.1.1 Seçenek A

Basit yaklaşım en az karmaşık olan emisyon hesaplama yaklaşımıdır. Bu metodoloji için gerekli olan veriler uçak hareketlerinin sayısı (belirli bir periyot boyunca, örn; 1 yıl) ve her bir uçağın tipi ya da uçak motorları hakkında bazı ilave temel bilgilerdir. Bu metodoloji ile hesaplanan uçak emisyon miktarlarının normalinde daha fazla bulunması nedeniyle ICAO tarafından basit yaklaşım metodolojisinin sadece, havaalanındaki uçak motorları emisyonunun ilk değerlendirmesinin yapılmasında kullanılması gerektiği belirtilmektedir.

Bu yaklaşımda; her bir uçak tipi için, uçağın LTO döngüsü sayısı Çizelge 2.2’de verilen emisyon türüne ait emisyon faktörü ile çarpılır ve daha sonra o uçak tipine ait her bir kirletici için toplam emisyon miktarını elde etmek amacıyla hesaplanan değerler toplanır.

$$X \text{ emisyonu(kg)} = \sum (Y \text{ uçağı LTO sayısı}) * (X \text{ emisyonu emisyon faktörü}) \quad (2.2)$$

Çalışma şartları aynı ya da benzer olarak kabul edilmesi nedeniyle bu denklem, her bir motor tipi ya da operasyonel safha için kullanılmaktadır. Gerekli görülmesi halinde benzer bir yöntem, Çizelge 2.2’de verilen yakıt tüketimleri kullanılarak incelenecek periyottaki yakıt tüketiminin hesaplanmasında da uygulanabilir. LTO sırasındaki yakıt tüketimi aşağıda verilen denklem ile hesaplanabilmektedir.

$$\text{Toplam Yakıt tüketimi (kg)} = \sum (Y \text{ uçağı LTO sayısı}) \times (\text{yakıt tüketimi}) \quad (2.3)$$

Çizelge 2.2 Uçak tiplerine göre emisyon faktörleri [17]

Uçak		LTO emisyon faktörleri (kg/LTO/uçak)					Yakıt tüketimi (kg/LTO/uçak)
		CO ₂	HC	NO _x	CO	SO ₂	
Büyük ticari uçaklar	A300	5450	1.25	25.86	14.81	1.72	1720
	A310	4760	6.31	19.46	28.3	1.51	1510
	A319	2310	0.59	8.73	6.35	0.73	730
	A320	2440	0.57	9.01	6.19	0.77	770
	A321	3020	1.42	16.72	7.55	0.96	960
	A330-200/300	7050	1.28	35.57	16.20	2.23	2230
	A340-200	5890	4.21	28.31	26.19	1.86	1860
	A340-300	6380	3.90	34.81	25.23	2.02	2020
	A340-500/600	10660	0.14	64.45	15.31	3.37	3370
	707	5890	97.45	10.96	92.37	1.86	1860
	717	2140	0.05	6.68	6.78	0.68	680
	727-100	3970	6.94	9.23	24.44	1.26	1260
	727-200	4610	8.14	11.97	27.16	1.46	1460
	737-100/200	2740	4.51	6.74	16.04	0.87	870
	737-300/400/500	2480	0.84	7.19	13.03	0.78	780
	737-600	2280	1.01	7.66	8.65	0.72	720
	737-700	2460	0.86	9.12	8	0.78	780
	737-800/900	2780	0.72	12.3	7.07	0.88	880
	747-100	10140	48.43	49.17	114.59	3.21	3210
	747-200	11370	18.24	49.52	79.78	3.6	3600
	747-300	11080	2.73	65	17.84	3.51	3510
	747-400	10240	2.25	42.88	26.72	3.24	3240
	757-200	4320	0.22	23.43	8.08	1.37	1370
	757-300	4630	0.11	17.85	11.62	1.46	1460
	767-200	4620	3.32	23.76	14.8	1.46	1460
	767-300	5610	1.19	28.19	14.47	1.77	1780
	767-400	5520	0.98	24.8	12.37	1.75	1750
	777-200/300	8100	0.66	52.81	12.76	2.56	2560
	DC-10	7290	2.37	35.65	20.59	2.31	2310
	DC-8-50/60/70	5360	1.51	15.62	26.31	1.70	1700
	DC-9	2650	4.63	6.16	16.29	0.84	840
	L-1011	7300	73.96	31.64	103.33	2.31	2310

Çizelge 2.2. (Devam) Uçak tiplerine göre emisyon faktörleri [17]

Uçak		LTO emisyon faktörleri (kg/LTO/uçak)					Yakıt tüketimi (kg/LTO/uçak)
		CO ₂	HC	NO _x	CO	SO ₂	
Büyük ticari uçaklar	MD-11	7290	2.37	35.65	20.59	2.31	2310
	MD-80	3180	1.87	11.97	6.46	1.01	1010
	MD-90	2760	0.06	10.76	5.53	0.87	870
	TU-134	5860	35.97	17.35	55.96	1.86	1860
	TU-154-M	7040	17.56	16	110.51	2.51	2510
	TU-154-B	9370	158.71	19.11	190.74	2.97	2970
Bölgesel Jetler/ İş Jetleri >26.7kN İtki	RJ-RJ85	950	0.67	2.17	5.61	0.30	300
	BAE 146	900	0.70	2.03	5.59	0.29	290
	CRJ-100ER	1060	0.63	2.27	6.7	0.33	330
	ERJ-145	990	0.56	2.69	6.18	0.31	310
	Fokker 100/70/28	2390	1.43	5.75	13.84	0.76	760
	BAC111	2520	1.52	7.4	13.07	0.80	800
	Dornier 328 Jet	870	0.57	2.99	5.35	0.27	280
	Gulfstream IV	2160	1.37	5.63	8.88	0.68	680
	Gulfstream IV	1890	0.31	5.58	8.42	0.6	600
	Yak-42M	1920	1.68	7.11	6.81	0.61	610
Düşük itki < 26.7 kN	Cessna 525/560	1060	3.35	0.74	34.07	0.34	340
Turboprop	Beech King Air	230	0.64	0.3	2.97	0.07	70
	DHC8-100	640	0	1.51	2.24	0.20	200
	ATR72-500	620	0.29	1.82	2.33	0.20	200

2.4.1.2 Seçenek B

ICAO tarafından verilen bu yöntemde sadece NO_x, CO ve HC emisyonları hesaplanmaktadır. Bu hesaplama yönteminde önemli olan uçak motor sayısının bilinmesidir. Tek bir uçağa ait NO_x, CO ve HC emisyonlarını hesaplamak için aşağıda verilen formül kullanılmaktadır;

$$E_j = \sum (TIM_{jk} * 60) * (FF_{jk}) * (EI_{ijk}) * (Ne_j) \quad (2.4)$$

Bu denklemde;

E_j : Tek bir LTO döngüsü için j uçak tipi tarafından üretilen gram cinsinden toplam emisyon (NO_x , CO ya da HC)

E_{ijk} : j uçak tipinde kullanılan her bir motor için k modundaki (örn; kalkış, tırmanma, yaklaşma) i emisyonu için gram cinsinden emisyon indeksi (g/kg)

FF_{jk} : j uçak tipinde kullanılan her bir motor için k modundaki saniye başına kilogram yakıt akışı (kg/s)

TIM_{jk} : j uçak tipi için k modunda (örn; kalkış, tırmanma, yaklaşma) dakika cinsinden geçen süre

Ne_j : j uçak tipindeki motor sayısı

ICAO'nun SO_x emisyonu için sertifikasyon standartları bulunmamaktadır. Bununla birlikte, yakıttaki sülfür miktarı SO_x emisyonunun bir fonksiyonudur. Amerika Çevreyi Koruma Ajansı (EPA-Environmental Protection Agency) tarafından ticari havacılık jet yakıtlarındaki sülfür miktarı bulma için yapılan bir araştırmada harcanan her 1 kilogramlık yakıtta ortalama 1 gram sülfür ortaya çıktığı bulunmuştur. Elde edilen bu ortalama değer ile SO_x emisyonu şu şekilde hesaplanabilmektedir;

$$E_k = \sum (TIM_k \times 60) \times (ER_k) \times (Ne_j) \quad (2.5)$$

Bu denklemde;

E_k : Tek bir LTO döngüsü için k uçak tipi tarafından üretilen gram cinsinden toplam emisyon

Ne_k : k uçak tipindeki motor sayısı

ER_k : $1 \cdot (FF_k)$; k uçağı için her bir operasyonel modda saniye başına ortaya çıkan toplam SO_x emisyon oranı

FF_k : k uçak tipinde kullanılan her bir motor için k modundaki saniye başına kilogram yakıt akışı (kg/s)

PM emisyonları için ICAO'nun emisyon sertifikasyon standartları bulunmamaktadır. Bununla birlikte, CAEP uçakların PM emisyonlarını hesaplamak amacıyla bir metot geliştirmiştir.

2.4.2 İleri Yaklaşım

İleri yaklaşım emisyon hesaplama metodunda, çevre durumunu ve belirli bir uçağın operasyonel bilgilerini içeren performans modelleri kullanılmaktadır. Bu bilgiler şunlardır; uçak bilgisi (kalkış ağırlığı, motor), havaalanı bilgisi (meydan rakımı, kullanılan pist uzunluğu), çevre durumu (rüzgar hızı ve yönü, türbülans, basınç, sıcaklık, yoğunluk) ve operasyonel bilgiler (varış meydanı, pist, kullanılan rota, yaklaşma rotası, APU kullanımı).

ICAO LTO döngüsünde her bir safha için belirli itki ayarları önerilmesine rağmen operasyonel yani gerçek uçuşlarda farklı itki ayarları kullanılabilir. Özellikle kalkıştaki itki ayarı, performans ve maliyet-fayda sebepleri yüzünden %100 olamamaktadır. Bu nedenle emisyon hesaplamalarında diğer bir model olan ileri yaklaşım modeli ICAO tarafından geliştirilmiştir. Bu modelde de iki seçenek mevcuttur.

Seçenek A için öncelikli olarak kalkış safhası için ortalama bir itki ayarı seviyesi kullanılmaktadır. Havaalanlarının taksi yolları yapılarının farklı olması nedeniyle taksi süreleri de farklılık gösterebilmektedir. Bu nedenle ileri yaklaşımın A seçeneğinde havaalanlarının kendilerine özgü taksi sürelerinin olması gerekir.

Çalışılacak havaalanı için taksi sürelerinin ölçülmesi ile LTO döngüsünün taksi safhasına ait emisyon değerleri daha doğru değerlendirilebilir. A seçeneğinde yakıt akışının bulunabilmesi amacıyla ICAO Uçak Egzoz Emisyonları Veritabanından (EEDB-Engine Emissions Databank) elde edilen yakıt akışı ve itki verisini kullanan bir ilişki geliştirilmiştir. Bu metodoloji sayesinde kalkış sırasındaki azaltılmış itki ayarlarında gerçekleşen yakıt tüketimleri daha doğru şekilde hesaplanabilmektedir. Bu şekilde hesaplanan yakıt tüketimlerindeki emisyon faktörleri BFFM2 metodu kullanılarak hesaplanmaktadır. Belirli bir itki ayarındaki yakıt akışını bulabilmek için aşağıda verilen ikinci dereceden denklem kullanılmaktadır;

$$Y=AX^2+BX+C \quad (2.6)$$

Bu denklemde;

X= O andaki itki/maksimum itki (X1, X2, X3)

Y= O andaki yakıt akışı/maksimum itkideki yakıt akışını (Y1, Y2, Y3) ifade etmektedir.

%60 ile %80 itki ayarı arasındaki yakıt akışının hesaplanabilmesi için %7, %30 ve %85 itki ayarları ve bu ayarlardaki ilgili yakıt akış noktaları alınır.

%85 ile %100 itki ayarı arasındaki yakıt akışının hesaplanabilmesi için %30, %85 ve %100 itki ayarları ve bu ayarlardaki ilgili yakıt akış noktaları alınır.

Rolls-Royce Trent 553-61 motoru için örnek hesaplama;

1) %85 ile %100 itki ayarı arasındaki denklem eğiminin belirlenmesi

$$X1=0.30$$

$$X2=0.85$$

$$X3=1.00$$

ICAO EDDB yakıt akış verisi:

$$Y1=0.2844$$

$$Y2=0.8199$$

$$Y3=1.0000$$

$$\rightarrow A=0.3242$$

$$\rightarrow B=0.6009$$

$$\rightarrow C=0.07491$$

$$\rightarrow Y=0.3242X^2+0.6009X+0.0749$$

2) Seçili itki ayarındaki yakıt akışı;

%90 itki ayarı için (X=0.9): Y=0.8783 → ICAO EDDB maksimum itkideki yakıt akışı ile çarpıldığında → yakıt akışı 1.853 kg/s

İleri yaklaşımın B seçeneğinde ise modele özgü yerel parametreleri içeren operasyonel itki seviyesini veren uçak performans modeli kullanılmalıdır.

Çalışılacak havaalanı için LTO döngüsünün her bir safhasının süreleri belirlenebilmektedir. Ayrıca bu safha süreleri uçak tiplerine göre de ayrı ayrı hesaplanmalıdır. Bu yaklaşımda kullanılacak operasyonel yakıt akışının hesaplanması amacıyla çeşitli ilave veriler kullanılmaktadır (örneğin; gerçek kalkış ağırlığı gibi).

2.4.3 Karmaşık Yaklaşım

Karmaşık yaklaşımda, analizlerde ihtiyaç duyulan gerçek ve düzeltilmiş veriler gerçek zamanlı ölçümlerle, performans bilgileriyle ve/veya karmaşık bilgisayar modelleme çıktılarıyla elde edilir.

Karmaşık yaklaşım kullanılarak yapılacak uçak emisyon hesaplamaları için gerekli olan bilgiler şunlardır;

- Farklı ağırlığa, rotaya ve meteorolojik şartlara sahip farklı uçak/motor tipleri için ölçülmüş safha süreleri
- Farklı meteorolojik şartlardaki farklı uçak/motor tipleri için ters itki ölçümleri
- Motor testi tipi ve sıklığı
- Operasyonel uçak çekme sıklığı
- Havaalanı yapısı ve kısıtlamaları (örn; pist uzunluğu)

Ayrıca, işletici tarafından ölçülmüş bazı ilave bilgilere ihtiyaç duyulabilmektedir;

- Ters itki operasyonları sırasında kullanılan tipik ya da gerçek gaz ayarları
- Gerçek uçak/motor konfigürasyon verisi
- Gerçek yakıt akış verisi
- Gerçek uçak tipi rölanti hızı
- Yaklaşma, kalkış ve tırmanma için tipik ya da gerçek gaz ayarları
- Yaklaşma ve tırmanma profilleri
- Taksi sırasında bütün motorlarını kullanmayan uçakların sayısı

Karmaşık yaklaşımda, LTO emisyon hesaplamaları gerçek motor emisyon faktörü, TIM ve yakıt akışı bilindiği takdirde ileri yaklaşımda kullanılan aynı denklem kullanılarak yapılmaktadır bununla birlikte bazı iyileştirilmiş bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır. Karmaşık yaklaşım eşitliği aşağıda verilmiştir;

$$E_{ij} = \sum (TIM_{jk} \times 60) \times f(FF_{jk}, E_{ijk} \text{ ya da } İtki_{jk}, Cond_j, Ne_j) \quad (2.7)$$

E_{ij} : Tek bir LTO döngüsü için j uçak tipi tarafından üretilen gram cinsinden toplam emisyon (NO_x, CO yada HC)

E_{ijk} : j uçak tipinde kullanılan her bir motor için k modundaki (örn; kalkış, tırmanma, yaklaşma) i emisyonu için gram cinsinden emisyon indeksi (g/kg)

FF_{jk} : j uçak tipinde kullanılan her bir motor için k modundaki yakıt akışı, saniyedeki kilogram olarak (kg/s)

$İtki_{jk}$: j uçak tipi için k modundaki itki seviyesi

TIM_{jk} : j uçak tipi için k modunda (örn; kalkış, tırmanma, yaklaşma) dakika cinsinden geçen süre

Ne_j : j uçak tipindeki motor sayısı

$Cond_j$: Ortam koşulları (irtifa, hız, sıcaklık, basınç)

Çizelge 2.3'de emisyon hesaplamaları için kullanılan Basit, İleri ve Sofistike Yaklaşımlar için hangi parametrelere ihtiyaç duyulduğu özetlenmiştir.

2.5 Uçak Emisyonlarının Azaltılması İçin Önlemler

Yakıt tüketimin ve emisyonun iyileştirilmesi amacıyla havacılık sektörü için günümüzdeki ve gelecekteki teknolojik ve operasyonel imkânlar şunlardır [51];

- Uçak motorları teknolojisi ve uçak gövdesi tasarımı
- Düşük-karbon yakıtlar
- Operasyonlar
 - Hava Trafik Yönetimi
 - Yükleme faktörü ve koltuk sıklığı

Çizelge 2.3. Emisyon hesaplama yaklaşımları için gerekli verilerin gösterimi [17]

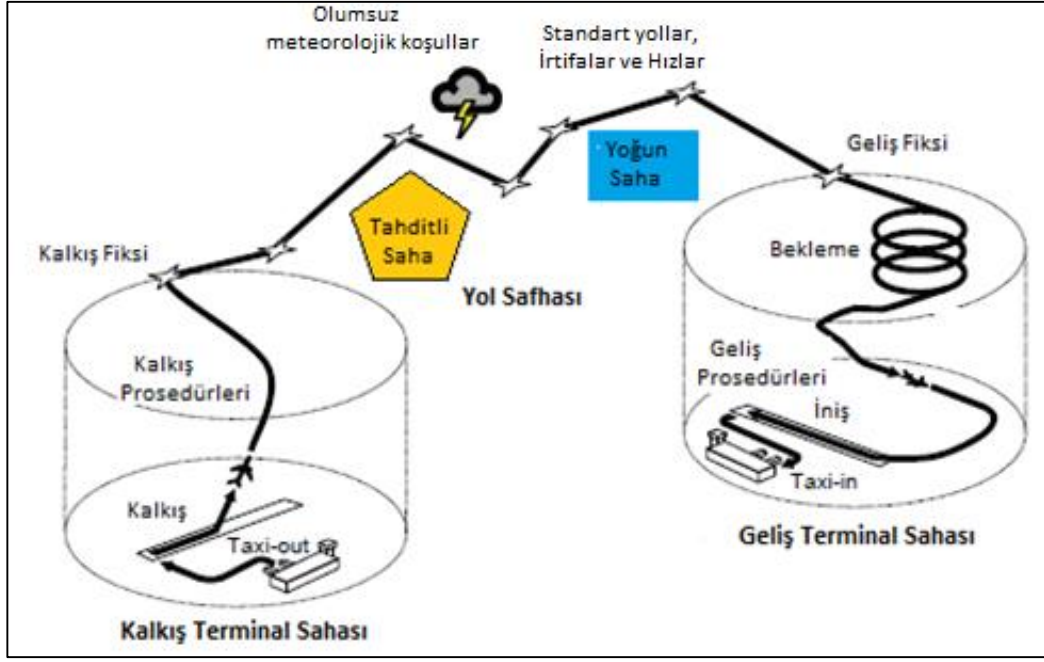
Ana Parametre	Basit Yaklaşım		İleri Yaklaşım		Karmaşık Yaklaşım
Filo (Uçak tipi/motor kombinasyonu)	Uçak tipinin tanımlanması (örneğin; hepsi B737 ya da hepsi A320)		Uçak tipi ve temsili motor tipinin tanımlanması (örneğin; A320 tipi %50 V2525 motor tipi ve %50 CFM56-5B5P)		Gerçek uçak tipi ve motor kombinasyonu
Uçak Hareketleri	Uçak tipine göre trafik sayısı		Filo kısmında tanımlanan uçak-motor kombinasyonundaki trafikleri sayısı		Uçak kuyruk numarasında göre trafik sayısı
Emisyon Hesaplamaları	Seçenek A	Seçenek B	Hız, irtifa, hava durumu gibi ilave parametreler ile performans dayalı hesaplamalar		Gerçek motor verileri ve hava durumu şartları ile performans dayalı
İtki seviyesi	Seçenek A	Seçenek B	Seçenek A Havaalanına ait ortalama itki oranları	Seçenek B Performans modeli	Havayolu tarafından sağlanan gerçek itki değerleri
Safha süreleri		Seçenek B ICAO LTO	Değiştirilmiş safha süreleri (havaalanına göre 1 ya da birkaç safha için ortalama ya da gerçek değerler)	Seçenek B Performans modeli	Bütün safhalar için gerçek değerler
Yakıt akışı		Seçenek B ICAO veri bankası değerleri	Seçenek A yakıt akış dönüşüm modeli ile ICAO EEDB'den elde edilen	Seçenek B Performans modeli ile ICAO EEDB'den elde edilen	Havayolundan elde edilen gerçek performans ve operasyonel veriler kullanılarak iyileştirilmiş değerler
Emisyon faktörü	Seçenek A uçak tipine göre emisyon	Seçenek B ICAO veri bankası değerleri	Seçenek A ICAO EEDB'den ya da BFFM2 metoduna göre itki seviyelerinden elde edilen	Seçenek B BFFM2 metoduna göre ile ICAO EEDB'den elde edilen	Havayolundan elde edilen gerçek performans ve operasyonel veriler kullanılarak iyileştirilmiş değerler

Hava Trafik Yöntemi, havacılık sektöründeki yakıt tüketimi ve emisyonun azaltılmasına yönelik operasyonel faaliyetlerin başında yer almaktadır. Hava Trafik Yönetimi'nden kaynaklanan uçuş verimsizliği, uçağın optimum dört-boyutlu yörüngesinden farklı bir yörüngede uçmasına neden olan herhangi bir durum ve bunun neticesinde de ortaya çıkan fazla yakıt tüketimi olarak tanımlanmaktadır [73]. Hava sahası yol yapılarında sivil/askeri hava sahalarındaki kısıtlamalar ve çevresel şartlar nedeni ile direkt yolların kullanımına her zaman imkan tanımaması ATM'de uçuş verimsizliğini ortaya çıkarmaktadır. Örneğin; terminal sahaları içerisinde geleneksel prosedürler ile belirlenmiş olan geliş ve yaklaşmalarda pilotlar iniş gerçekleştirecekleri pist yönünde erken ve kademeli olarak alçalabilmektedirler ve böylelikle alçalma sırasında düşük irtifada daha fazla düz uçuş gerçekleştirdikleri için yakıt tüketimi de daha fazla olmaktadır.

Aşağıda verilen Şekil 2.4'de gösterildiği üzere uçuşun farklı safhalarında uçuş verimsizliğine neden olan farklı faktörler söz konusudur. Hava Trafik Yönetimi sistemin verimliliğinin iyileştirilmesi, hava trafiği tıkanıklıklarını ve gecikmeleri azaltmanın yanı sıra yakıt tüketimini ve buna bağlı ortaya çıkan emisyonları da azaltacaktır.

Uçağın kalktığı andan indiği ana kadar olan uçuşun tüm safhalarında uçuş verimsizliğine neden olan ATM kaynaklı faktörler şu şekilde sıralanabilir;

- Kalkış prosedürleri (örn; uygulanan SID'ler)
- Standart yollar
- Meteorolojik şartlar neticesinden uygulanan kaçındırma yöntemleri
- Kesişen ya da karşılıklı trafikler arasında uygulanan kaçındırma yöntemleri
- Tahsis edilen uçuş seviyeleri
- Uygulanan hız tahditleri
- Tahditli, yasaklı sahalar
- Yoğun sahalar
- Geliş prosedürleri



Şekil 2.4. Uçuş verimsizliğine neden olan faktörler [73]

Kalkıştan sonra uçaklar terminal sahasını yol ağına bağlanan belirli bir fiks üzerinde terk etmek zorundadırlar. Bu durum uçakların kalkıştan sonra istenilen güzergâhta uçmalarını engellemektedir. Uçuşun asıl yönüyle ilgili olan kalkış pistinin oryantasyonunda diğer bir önemli etkidir. Standart kalkış prosedürleri de uçakların daha fazla yakıt tüketimine ve emisyonu neden olan optimal olmayan tırmanma profillerinde ve hızlarında uçmalarına neden olabilmektedir.

Uçaklar genellikle geliş terminal hava sahasına belirli bir irtifa ve hızdaki geliş fiksinden giriş yapmaktadırlar. Bu durum alçalmaya başlama (TOD-Top of Descent) noktasından geliş fiksine kadar optimal olmayan alçalma irtifasına ve/veya hızına sebep olabilmektedir. Eğer geliş terminal sahası içerisinde tıkanıklık söz konusu ise uçağın beklemeye alınması ya da vektör edilmesi ihtiyacı ortaya çıkabilmektedir. Geliş prosedürlerinin dikey ve yatay elemanları iniş trafiklerinin sıralanması, ayırılması ihtiyacı nedeniyle kısıtlanabilmektedir.

Yol safhasındaki ATM uçuş verimliliği için hava sahaları yapıları, uçağın uçuş seviyesi, çakışma durumunda kaçındırma için verilen komutlar gibi kriterler düşünülebilir.

ATM’de uçuş verimliliği üzerine yapılan çalışmalarda verimliliğin uçuş süresi, uçuş mesafesi, yakıt tüketimi ve emisyonlara ait kazançlara bağlı olduğu belirtilmektedir. Bu kazançların elde edilmesi için şu adımlar atılmalıdır [74];

- Yol hava sahası tasarımı geliştirilmeli (daha kısa rotalarla),
- Hava sahası kullanımı ve yol ağları düzeltilmeli,
- Terminal sahası (TMA-Terminal Area) tasarımı ve kullanım etkinliği sağlanmalı

Özellikle hava trafiğinin artışıyla kaynaklanan tıkanıklığın büyümesi ile ATM verimliliği düşebilmektedir, bu nedenle yeni prosedürlerin kullanılmasına veya bütünleştirilmesine ihtiyaç bulunmaktadır. ATM uçuş verimliliği konusunda hava trafik kontrol talimatları, hava durumu, ayırma kriterleri ve çevresel kısıtlamalar dikkate alınarak verimsizliğin olduğu uçuş safhaları belirlenmeli ve emniyet, ATC sistem kapasitesi konuları dikkate alınarak yeni çalışmalar yapılmalıdır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Türk hava sahası yol ağına ilişkin analizler uçuş gerçekleştirilen meydan çiftlerine ait uçuş verilerine göre yapılmaktadır. Tezin bu bölümünde, çalışmada kullanılan materyaller ve izlenen yöntemle ilişkin bilgiler verilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, çalışma alanının belirlenmesi aşamasından sonra öncelikli olarak konu ile ilişkili literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Daha sonrasında gerçek uçuş verilerine dayalı gerçekleştirilecek bu çalışma için yurt içi uçuşlarda en sık kullanılan uçak tipi belirlenmiştir.

Uçak tipinin belirlenmesinden sonra THY tarafından 2011 yılında İstanbul Atatürk Havaalanı'ndan gerçekleştirilen yurt içi uçuşların ilgili havaalanları belirlenmiştir. Bu aşamadan sonra yapılacak uçuş analizleri için gerekli parametreler seçilmiş ve uçuş verilerinin toplanması aşaması geçilmiştir.

Hatalı verilerin veri setinden çıkartılmasından sonra analizler kapsamında ilk olarak uçuşların yatay uçuş analizleri yapılmıştır. Yatay uçuş analizleri, ilgili rotalardaki uçuşların gerçek uçuş mesafeleri ile iniş ve kalkış havaalanları arasındaki büyük daire mesafesi arasındaki farka dayanmaktadır. Yatay uçuş verimsizlikleri analizleri kapsamında ilgili rotaların gerçekleşmiş ortalama uçuş mesafeleri, gerçekleşmiş ortalama yakıt tüketimleri gibi hesaplamalar yapılmıştır.

Yatay uçuş analizlerinin yapılmasından sonra ilgili rotaların dikey verimsizlik analizleri yapılmıştır. Bu kapsam doğrultusunda ilgili rotaların seyir irtifası dışında alçalma ya da tırmanma sırasında sıklıkla oluşan düz uçuş periyotları belirlenmiştir.

Dikey uçuş analizlerinin gerçekleştirilmesinden sonra ATM uçuş verimsizlik modelinin oluşturulması aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada ilk olarak modelin oluşturulmasında kullanılacak verilerin seçilmesi, ayıklanması ve bu verilerin normal dağılım kontrolleri gerçekleştirilmiştir. Uygun veri setinin oluşturulmasından sonra SPSS programı kullanılarak regresyon analizleri yapılmış ve model oluşturulmuştur.

ATM uçuş verimsizlik modelinin oluşturulmasından sonra bu model kullanılarak, seçilen rotaların ATM uçuş verimsizlik puanları hesaplanmıştır. Ayrıca, bu aşamada yatay ve dikey verimsizliklerin iyileştirilmesi anlamında

yapılacak iyileştirilmelerin ATM uçuş verimsizlik puanına olan etkisi de belirlenmiştir.

Şekil 3.1’de çalışmada izlenen yönetime ait iş akış şeması verilmiştir.



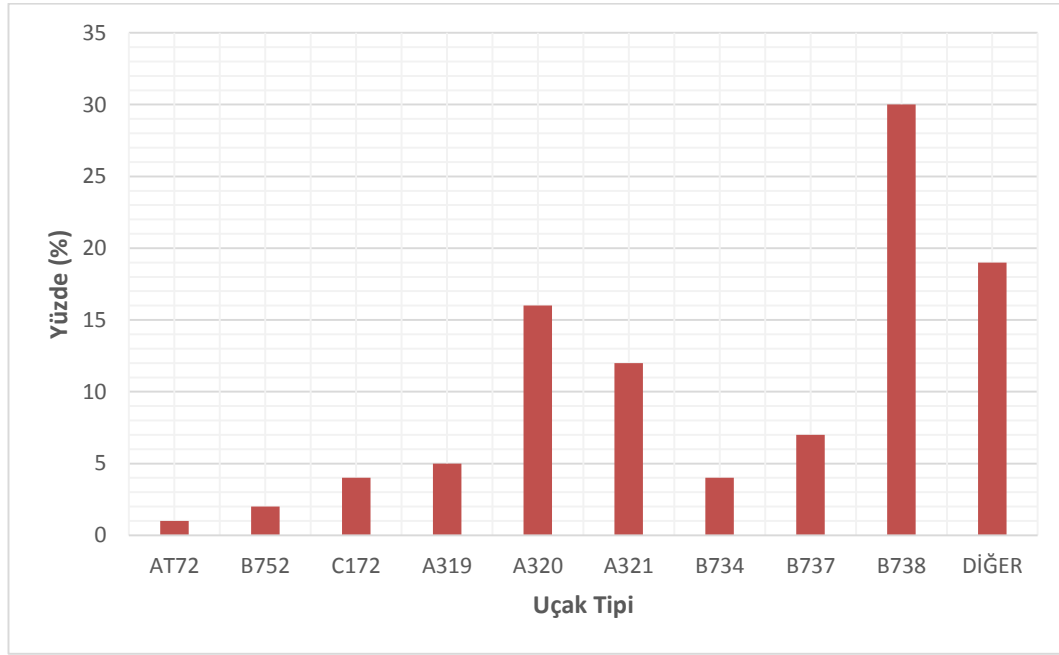
Şekil 3.1. Yönteme ait iş akış şeması

3.1. Materyal

Bu çalışmanın temel araştırma materyali uçuş verileridir. Uçuşların analizlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla gerekli olan uçuş verileri Türk Hava

Yolları (THY) Genel Müdürlüğü bünyesindeki Uçuş Emniyet Müdürlüğü'nden elde edilmiştir. THY'nin 2011 yılında İstanbul merkez olmak üzere yurt içinde gerçekleştirdiği her bir uçuşun, Uçuş Veri Kaydedici'sine (FDR-Flight Data Recorder) ait kayıtları kullanılarak analizler yapılmıştır.

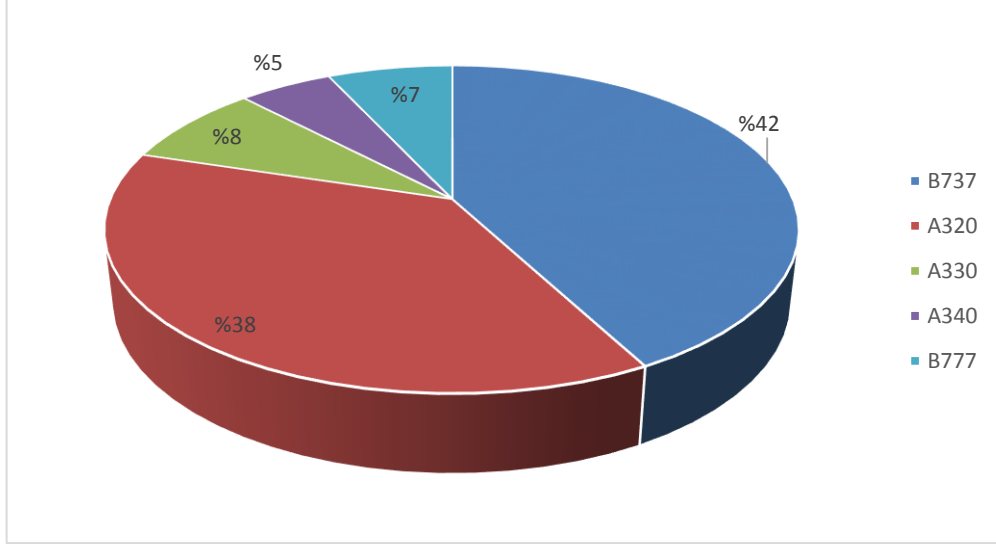
FDR kayıtlarındaki parametreler uçak tipine göre farklılık göstermektedir. Bu nedenle ilgili uçak tipinin belirlenmesi önemlidir. Bu amaç doğrultusunda öncelikli olarak Türk hava sahasındaki 2011 yılı uçak trafiğinin uçak tiplerine göre dağılımına bakılmıştır. Aşağıda verilen Şekil 3.2'de görüleceği üzere 2011 yılı için Türk hava sahası içinde gerçekleşen tüm uçuşlar dahilinde uçuşların %37'lik kısmı B737-738 uçak tipi ve %33'lük bir kısmı da A319-320-321 uçak tipi ile gerçekleştirilmiştir [75].



Şekil 3.2. Türk hava sahası içerisinde 2011 yılına ait tüm uçuşların uçak tipine göre dağılımı [70]

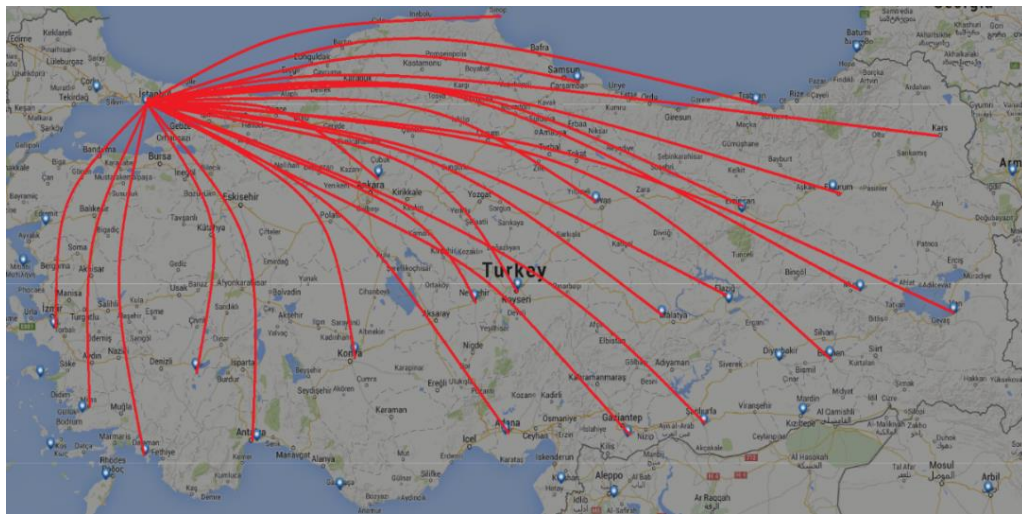
2011 yılı için iç hat ticari uçak trafiğinin şirketlere göre dağılımına bakıldığında yurt içinde gerçekleşen 386,691 uçuşun 224,458 adetinin THY tarafından gerçekleştirildiği görülmüştür [76]. THY'nin 2011 yılı sonu itibarıyla filosunda toplam 173 adet yolcu uçağının %42'lik kısmını B737 ve %38'lik kısmını da A320 uçak tipi oluşturmaktadır (Şekil 3.3). Türk hava sahasında gerçekleşen uçuşların büyük bir çoğunluğunda B737/738 ve A319/320/321 uçak tiplerinin

kullanılmasının yanı sıra THY'nın da yurt içi uçuşlarının tamamında bu uçak tiplerini kullanması nedeniyle FDR kayıtlarının temininde bu uçak tipleri seçilmiştir.



Şekil 3.3. 2011 yılına ait THY'nın filosundaki uçak tiplerini yüzde olarak dağılımı [77]

Çalışma kapsamında kullanılacak FDR verileri için uçak tipinin seçilmesinden sonra THY'nın 2011 yılında İstanbul merkez olmak üzere yurt içi uçuşlarını gerçekleştirdiği havaalanları belirlenmiştir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. THY'nin 2011 yılında İstanbul Atatürk Havaalanı'ndan gerçekleştirdiği yurt içi uçuşların gösterimi

Çizelge 3.1’de çalışma kapsamındaki havaalanlarına ait ICAO ve IATA kodları, enlem-boylam ve rakım bilgileri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Havaalanlarına ait bilgiler

No	Havaalanı	ICAO Kodu	IATA Kodu	Enlem (N)	Boylam (E)	Meydan Rakımı (ft)
1	Adana	LTAF	ADA	36°58’56’’	035°16’49’’	65
2	İzmir Adnan Menderes	LTBJ	ADB	38°17’21’’	027°09’18’’	410
3	Adıyaman	LTCP	ADF	37°43’51’’	038°28’08’’	2216
4	Ağrı	LTGO	AJI	39°38’51’’	043°01’43’’	5461
5	Kayseri	LTAU	ASR	38°46’13’’	035°29’43’’	3506
6	Antalya	LTAI	AYT	36°54’01’’	030°47’34’’	177
7	Batman	LTCJ	BAL	37°55’56’’	041°06’59’’	1818
8	Bodrum Milas	LTFE	BJV	37°14’50’’	027°40’53’’	21
9	Diyarbakır	LTCC	DIY	37°53’33’’	040°12’04’’	2251
10	Dalaman	LTBS	DLM	36°42’45’’	028°47’29’’	20
11	Denizli	LTAY	DNZ	37°47’16’’	029°42’18’’	2795
12	Erzincan	LTCD	ERC	39°42’47’’	039°31’14’’	3791
13	Erzurum	LTCE	ERZ	39°57’21’’	041°10’14’’	5765
14	Ankara Esenboğa	LTAC	ESB	40°07’41’’	032°59’42’’	3125
15	Elazığ	LTCA	EZS	38°35’52’’	039°16’53’’	2927
16	Şanlıurfa	LTCH	GNV	37°27’24’’	038°54’29’’	2708
17	Gaziantep	LTAJ	GZT	36°56’52’’	037°28’44’’	2315
18	Hatay	LTDA	HTY	36°22’20’’	036°17’55’’	267
19	İstanbul Atatürk	LTBA	IST	40°58’34’’	028°48’51’’	163
20	Kahramanmaraş	LTCN	KCM	37°32’19’’	036°57’12’’	1723
21	Kars	LTCF	KSY	40°33’31’’	043°05’56’’	5889
22	Konya	LTAN	KYA	37°58’50’’	032°33’45’’	3392
23	Malatya	LTAT	MLX	38°25’56’’	038°04’59’’	2828
24	Muş	LTCK	MSR	38°44’41’’	041°39’14’’	4157
25	Amasya	LTAP	MZH	40°49’46’’	035°31’20’’	1758
26	Nevşehir	LTAZ	NAV	38°46’31’’	034°31’36’’	3087
27	Sinop	LTCM	SIC	42°00’57’’	035°03’59’’	24
28	Samsun	LTFH	SZF	41°15’56’’	036°32’55’’	18
29	Trabzon	LTCG	TZX	40°59’45’’	039°47’07’’	104
30	Van	LTCI	VAN	38°28’07’’	043°19’51’’	5474
31	Sivas	LTAR	VAS	39°48’51’’	036°54’09’’	5236

Uçuş rotalarının belirlenmesinden sonra çalışma kapsamında kullanılacak uçak tiplerine (B738, B737, A319, A320, A321) ait FDR parametrelerinin belirlenmesine geçilmiştir. FDR, uçağın motor çalıştırıldığı andan inişini gerçekleştirdiği ana kadar olan tüm verilerini, gösterge ve sensörlerden temin ederek anlık olarak kaydedilmesi sağlayan bir cihazdır. Bu cihaz, uçağın pilotunun ve otopilotun yaptığı tüm değişiklikleri de kaydetmektedir.

Uçağın uçuşu sırasında izlediği yörüngenin, hızın, motor gücünün ve harcadığı yakıtın belirlenmesi için FDR kayıtlarındaki aşağıdaki parametrelere ihtiyaç duyulmaktadır[4];

- Basınç irtifası
- Uçağın gösterge hızı ve kalibre edilmiş hızı
- Hava-yer durumu
- Toplam ya da dış sıcaklık
- Uçuş başı
- Normal hızlanma
- Yanlamasına hızlanma
- Uzunlamasına hızlanma
- Zaman
- Seyrüsefer verileri; rüzgar yönü ve hızı, enlem/boylam
- Yere göre hız
- Radyo irtifası
- Motor gücü; gaz kolu pozisyonu vb.
- Motor gaz kolu kumandası
- İlave motor parametreler; egzoz gaz sıcaklığı, yakıt akışı, motor devri vb.

A320 ve B737'nin uçuşlarının analizlerinin gerçekleştirilmesi için gerekli olan FDR parametreleri Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'de gösterildiği gibi belirlenmiştir.

Çizelge 3.2. A320 FDR Parametre Listesi

TIME	Zaman
GWC	Uçağın toplam kalkış kütlesi (ton)
GS	Uçağın yer hızı (ground speed) (knot)
FLT_PATH	Uçuş yörünge açısı (°)
TLA1	1 no'lu motorun gaz kolu açısı
TLA1R	1 no'lu motorun gaz kolu açısı(Sağ)
TLA1C	1 no'lu motorun gaz kolu açısı(Merkez)
FF1C	1 no'lu motorun anlık yakıt tüketimi (kg/s)
TLA2	2 no'lu motorun gaz kolu açısı
TLA2R	2 no'lu motorun gaz kolu açısı(Sağ)
TLA2C	2 no'lu motorun gaz kolu açısı(Merkez)
FF2C	2 no'lu motorun anlık yakıt tüketimi (kg/s)
TAS	Uçağın hava hızı (true air speed) (knot)
MACH	Mach sayısı
LDGL	Uçağın yerde veya havada olduğunu gösteren devre
WIN_SPDR	Rüzgar hızı (knot)
HEAD	Baş açısı (°)
LATPC	Enlem (°)
LONPC	Boylam (°)
FQTY_TO	Kalkış anında uçakta bulunan yakıt miktarı (ton)
FQTY_LD	İniş anında uçakta bulunan yakıt miktarı (ton)
FBURN	Toplam yakılan yakıt miktarı (kg)
FQTY_TON	Uçakta bulunan anlık yakıt miktarı (ton)
FQTY11	X no'lu depoda bulunan anlık yakıt miktarı (kg)
FQTY12	X no'lu depoda bulunan anlık yakıt miktarı (kg)
FQTY21	X no'lu depoda bulunan anlık yakıt miktarı (kg)
FQTY22	X no'lu depoda bulunan anlık yakıt miktarı (kg)
FQTY31	X no'lu depoda bulunan anlık yakıt miktarı (kg)
DATE_R	Tarih (gg/aa/yy)
TAIL_1	Uçak ülke kuyruk kodu
TAIL_2	Şirket kuyruk numarası
ORIGIN	Kalkış Meydanı
RUNWAY_TO	Kalkış yapılan pist başı
DESTINATION	İniş Meydanı
RUNWAY_LD	İniş yapılan pist başı
HEIGHT	Yükseklik (ft)
ALT_QNH	QNH İrtifa (ft)
IASC	Uçağın gösterge hızı (indicated air speed) (knot)

Çizelge 3.3. B737 FDR Parametre Listesi

TIME	Zaman
GWC	Uçağın toplam kalkış kütlesi (ton)
GS	Uçağın yer hızı (ground speed) (knot)
FLT_PATH	Uçuş yörünge açısı (°)
TLA1	1 no'lu motorun gaz kolu açısı
TLA1R	1 no'lu motorun gaz kolu açısı(Sağ)
TLA1C	1 no'lu motorun gaz kolu açısı(Merkez)
FF1C	1 no'lu motorun anlık yakıt tüketimi (kg/s)
TLA2	2 no'lu motorun gaz kolu açısı
TLA2R	2 no'lu motorun gaz kolu açısı(Sağ)
TLA2C	2 no'lu motorun gaz kolu açısı(Merkez)
FF2C	2 no'lu motorun anlık yakıt tüketimi (kg/s)
TAS	Uçağın hava hızı (true air speed) (knot)
MACH	Mach sayısı
LDGL	Uçağın yerde veya havada olduğunu gösteren devre
FLAPC	Flap açısı (°)
WIN_SPDR	Rüzgar hızı (knot)
WIN_DIR	Rüzgar yönü (°)
HEAD	Baş açısı (°)
LATPC	Enlem (°)
LONPC	Boylam (°)
FQTY_TO	Kalkış anında uçakta bulunan yakıt miktarı (ton)
FQTY_LD	İniş anında uçakta bulunan yakıt miktarı (ton)
FBURN	Toplam yakılan yakıt miktarı (kg)
FQTY_TON	Uçakta bulunan anlık yakıt miktarı (ton)
FQTY1	X no'lu depoda bulunan anlık yakıt miktarı (kg)
FQTY2	X no'lu depoda bulunan anlık yakıt miktarı (kg)
FQTY3	X no'lu depoda bulunan anlık yakıt miktarı (kg)
DATE_R	Tarih (gg/aa/yy)
TAIL_1	Uçak ülke kuyruk kodu
TAIL_2	Şirket kuyruk numarası
ORIGIN	Kalkış Meydanı
RUNWAY_TO	Kalkış yapılan pist başı
DESTINATION	İniş Meydanı
RUNWAY_LD	İniş yapılan pist başı
HEIGHT	Yükseklik (ft)
ALT_QNH	QNH İrtifa (ft)
IASC	Uçağın gösterge hızı (indicated air speed) (knot)

THY'nin 2011 yılında yurt içinde İstanbul Atatürk Havalimanı merkez olmak üzere 30 meydana gerçekleştirdiği toplam 9884 uçuşun (B737 ve A320'e ait) FDR verisinin ait olduğu ay ve meydan çiftine ait veriler Çizelge 3.4'de verilmiştir. Çizelgede de görüleceği üzere ilgili rotanın karşılıklı uçuşlarına ait veriler ayrı ayrı elde edilmiştir. Örneğin, B737 uçak tipine ait Ankara Esenboğa Havalimanı'ndan kalkıp İstanbul Atatürk Havalimanı'na iniş gerçekleştiren toplam 380 uçuşa ait FDR verisi mevcut iken İstanbul Atatürk Havalimanı'ndan kalkıp Ankara Esenboğa Havalimanı'na iniş gerçekleştiren toplam 384 uçuşun verisi elde edilmiştir. Uçuşlara ait FDR verilerinin hem yaz hem de kış sezonu kapsamı amacıyla Ocak ve Ağustos aylarına ait veriler elde edilmiştir. Bu aylar için ilgili rotalarda yeterli sayıda veri bulunmadığı durumlarda diğer aylara ait veriler sağlanmıştır. Örneğin; IST-ERZ rotası için Ocak ve Ağustos aylarının yanı sıra Mart ve Ekim aylarına ait uçuş verileri de alınmıştır.

FDR verileri hem havaalanı çevresindeki ATM verimsizliğinin hem de terminal ve yol safhasındaki ATM verimsizliğinin belirlenmesinde kullanılan ana materyaldir. Çizelge 3.2 ve 3.3'de verilen FDR parametreleri kullanılarak havaalanlarının LTO safha süreleri, terminal ve yol safhasındaki uçuş profilleri ve yakıt tüketimleri belirlenmiştir. Mevcut Türk hava sahası yol ağı analizlerinin yapılabilmesi amacıyla Türk Havacılık Bilgi Yayını (AIP-Aeronautical Information Publication) içerisinde bulunan havaalanlarına ait yaklaşma planları kullanılmıştır. Emisyon hesaplamalarında ise ICAO Uçak Emisyon Veritabanı kullanılmıştır. LTO analizlerinde MySQL veri tabanı ve MSAccess programı, terminal-yol safhasındaki ATM verimsizliği modeli için ise SPSS programı kullanılmıştır.

Çizelge 3.4. Verilerin rota, uçak tipi ve aylara göre dağılımı

Meydan Çifti (Kalkış-İniş)	Uçak Tipi	Verinin ait olduğu ay						Toplam
		Ocak	Mart	Mayıs	Ağustos	Ekim	Aralık	
ESB-IST	B737	196	-	-	184	-	-	380
	A320	218	-	-	213	-	-	431
IST-ESB	B737	198	-	-	186	-	-	384
	A320	219	-	-	210	-	-	429
IST-AYT	B737	80	-	-	160	-	-	240
	A320	80	-	-	129	-	-	209
AYT-IST	B737	80	-	-	155	-	-	235
	A320	80	-	-	134	-	-	214
IST-ADB	B737	132	-	-	189	-	-	321
	A320	132	-	-	187	-	-	319
ADB-IST	B737	141	-	-	189	-	-	330
	A320	132	-	-	188	-	-	320
IST-ADA	B737	93	-	-	81	-	-	174
	A320	91	-	-	95	-	-	186
ADA-IST	B737	90	-	-	81	-	-	171
	A320	92	-	-	96	-	-	188
IST-ASR	B737	26	-	-	49	-	-	75
	A320	57	-	-	98	-	-	155
ASR-IST	B737	28	-	-	51	-	-	79
	A320	57	-	-	97	-	-	154
IST-GZT	B737	31	-	-	41	-	-	72
	A320	48	-	-	65	-	-	113
GZT-IST	B737	30	-	-	39	-	-	69
	A320	43	-	-	64	-	-	107
IST-SZF	B737	14	-	-	25	-	-	39
	A320	54	-	-	48	-	-	102
SZF-IST	B737	14	-	-	25	-	-	39
	A320	54	-	-	46	-	-	100
IST-TZX	B737	52	-	-	32	-	-	84
	A320	27	-	-	84	-	-	111
TZX-IST	B737	52	-	-	32	-	-	84
	A320	27	-	-	85	-	-	112
IST-BJV	B737	21	-	-	104	-	-	125
	A320	8	-	-	137	-	-	145
BJV-IST	B737	23	-	-	104	-	-	127
	A320	8	-	-	137	-	-	145
IST-DLM	B737	13	-	-	83	-	-	96
	A320	19	-	-	86	-	-	105
DLM-IST	B737	14	-	-	83	-	-	97
	A320	18	-	-	86	-	-	104
IST-KYA	B737	27	-	-	28	-	-	55
	A320	28	-	-	42	-	-	70
KYA-IST	B737	27	-	-	28	-	-	55
	A320	27	-	-	40	-	-	67

Çizelge 3.4. (Devam) Verilerin rota, uçak tipi ve aylara göre dağılımı

Meydan Çifti (Kalkış-İniş)	Uçak Tipi	Verinin ait olduğu ay						Toplam
		Ocak	Mart	Mayıs	Ağustos	Ekim	Aralık	
IST-DIY	B737	14	-	-	35	-	-	49
	A320	16	22		37	-	-	75
DIY-IST	B737	14	-	-	36	-	-	50
	A320	17	-	-	34	-	-	51
IST-GNY	B737	23	25	-	12	-	-	60
	A320	13	-	-	12	-	-	25
GNY-IST	B737	24	26	-	12	-	-	62
	A320	14	-	-	11	-	-	25
IST-DNZ	B737	26	-	-	19	-	-	45
	A320	27	-	-	37	-	-	64
DNZ-IST	B737	26	-	-	19	-	-	45
	A320	27	-	-	37	-	-	64
IST-MLX	B737	11	-	-	30	-	-	41
	A320	27	35	-	16	-	-	78
MLX-IST	B737	11	-	-	30	-	-	41
	A320	26	-	-	15	-	-	41
IST-EZS	B737	16	-	-	23	-	-	39
	A320	26	24	-	20	-	-	70
EZS-IST	B737	14	-	-	24	-	-	38
	A320	25	-	-	21	-	-	46
IST-ERZ	B737	13	24	-	15	14	-	66
	A320	17	-	-	6	-	-	23
ERZ-IST	B737	16	22	-	15	-	-	53
	A320	15	-	-	6	-	-	21
IST-VAN	B737	8	-	-	13	-	-	21
	A320	22	32	-	22	-	-	76
VAN-IST	B737	9	-	-	12	-	-	21
	A320	21	-	-	22	-	-	43
IST-HTY	B737	45	-	-	37	-	-	82
	A320	21	-	-	34	-	-	55
HTY-IST	B737	44	-	-	40	-	-	84
	A320	20	-	-	32	-	-	52
IST-SIC	B737	0	-	-	0	-	-	0
	A320	18	-	-	22	-	-	40
SIC-IST	B737	0	-	-	0	-	-	0
	A320	19	21	-	23	22	-	85
IST-NAV	B737	12	16	-	10	19	-	57
	A320	10	-	-	37	-	-	47
NAV-IST	B737	12	16	-	10	19	12	69
	A320	10	-	-	38			48
IST-KCM	B737	15	17	12	10	14	-	68
	A320	11	-	-	13		-	24

Çizelge 3.4. (Devam) Verilerin rota, uçak tipi ve aylara göre dağılımı

Meydan Çifti (Kalkış-İniş)	Uçak Tipi	Verinin ait olduğu ay						Toplam
		Ocak	Mart	Mayıs	Ağustos	Ekim	Aralık	
IST-ADF	B737	2	-	-	0	-	-	2
	A320	7	-	-	0	-	-	7
ADF-IST	B737	2	-	-	0	-	-	2
	A320	7	-	-	0	-	-	7
IST-ERC	B737	19	21	-	13	14	-	67
	A320	0	-	-	12	-	-	12
ERC-IST	B737	19	21	-	13	-	-	53
	A320	0	-	-	11	-	-	11
IST-VAS	B737	14	-	-	9	-	-	23
	A320	7	-	-	-	-	-	7
VAS-IST	B737	14	-	-	9	-	-	23
	A320	7	-	-	-	-	-	7
IST-BAL	B737	3	-	-	8	-	-	11
	A320	6	-	-	6	-	-	12
BAL-IST	B737	3	-	-	8	-	-	11
	A320	6	-	-	6	-	-	12
IST-MSR	B737	4	-	-	15	-	-	19
	A320	23	16	-	13	9	-	61
MSR-IST	B737	4	-	-	15	-	-	19
	A320	24	15	-	11	9	-	59
IST-AJI	B737	0	-	-	10	-	-	10
	A320	5	-	-	12	-	-	17
AJI-IST	B737	0	-	-	10	-	-	10
	A320	5	-	-	11	-	-	16
IST-KSY	B737	9	-	-	-	-	-	9
	A320	12	-	-	-	-	-	12
KSY-IST	B737	7	-	-	-	-	-	7
	A320	13	-	-	-	-	-	13
IST-MZH	B737	10	-	-	-	-	-	10
	A320	4	-	-	-	-	-	4
MZH-IST	B737	10	-	-	-	-	-	10
	A320	3	-	-	-	-	-	3
TOPLAM		3929	370	12	5427	134	12	9884

3.2. Yöntem

ATM'in çevresel performansı için uçuş verimsizlik göstergelerinin geliştirilmesi konusunda Reynolds (2009) tarafından yapılan çalışmada, hava trafik yönetiminden kaynaklanan uçuş verimsizliği uçağın optimum dört-boyutlu

yörüngesinden farklı bir yörüngede uçmasına neden olan herhangi bir durum ve bunun neticesinde ortaya çıkan fazla yakıt tüketimi olarak tanımlanmaktadır [73].

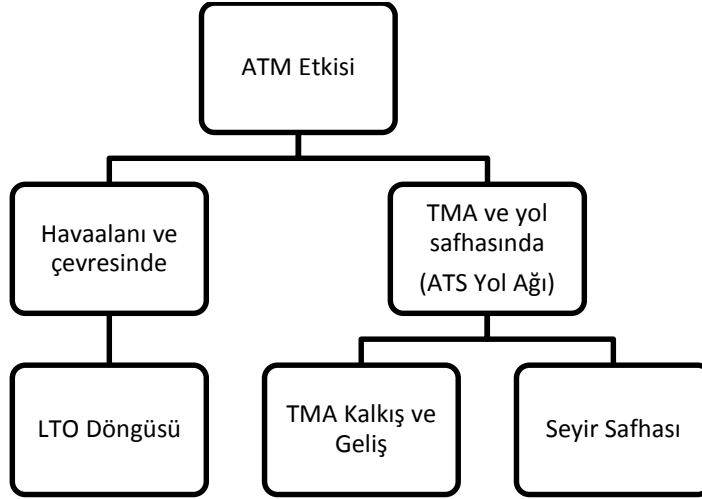
ATM uçuş verimsizliğini, bu tez kapsamında uçuş safhalarına göre iki bölüme ayırmıştır. İlk bölüm havaalanı ve çevresinde harcanan yakıt ve buna bağlı oluşan emisyonlardan kaynaklanan verimsizliktir. İkinci bölüm ise uçakların kalkış manevraları ile iniş için alçalma ve yaklaşma manevralarını yaptıkları TMA ve uçuşun yol (enroute) safhasında gerçekleşen ATM verimsizliğidir.

Bu çalışmada; ilk olarak havaalanı ve çevresindeki ATM verimsizliğinin ölçülebilmesi amacıyla ICAO LTO Döngüsü referans alınmıştır. Daha sonra, yakıt tüketimine dayalı terminal ve yol safhasındaki ATM kaynaklı yatay ve dikey uçuş verimsizliğinin hesaplanması amacıyla regresyon analizleri kullanılarak bir model oluşturulması amaçlanmıştır.

Geliştirilen bu modelle basit ve hızlı bir şekilde her bir uçuşun ATM kaynaklı uçuş verimsizliğinin ölçülmesi mümkün olacaktır. Ayrıca bu model sayesinde hava trafik kontrol kaynaklı davranışların her bir uçuş safhasına göre tespit edilmesi daha kolay olacaktır. Böylelikle, Türk hava sahası için uygun hava sahası tasarımı ya da uçuş prosedürleri gibi önerilerin test edilmesi kolaylaşacak ve uçuş profillerinin ve buna bağlı yakıt-emisyon değerlerinin iyileştirilmesi mümkün olacaktır. Bu model, Türk hava sahasındaki her bir uçuşun uçuş verimsizliğinin ölçülmesiyle çevresel anlamda mümkün olduğunca optimuma en yakın uçuşun gerçekleştirilebilmesi amacıyla hava trafik kontrole yardımcı olacaktır.

ATM verimliliği için oluşturulan etki diyagramı Şekil 3.5’de verilmiştir. Bu çalışmada LTO döngüsünü kapsayan, havaalanı çevresinde 3000ft altında gerçekleşen operasyonlardaki ATM etkisi bir başlık olarak incelenecek; terminal sahası ve yol safhasındaki ATM etkisi ise beraber ayrı bir başlık altında incelenecektir. Bu iki başlık altında ATM etkisinden kaynaklanan verimsizlikler sonucu oluşan rotaların uzaması, yakıt tüketiminin artması ve paralelinde oluşan emisyonlara ilişkin analizler yapılacaktır.

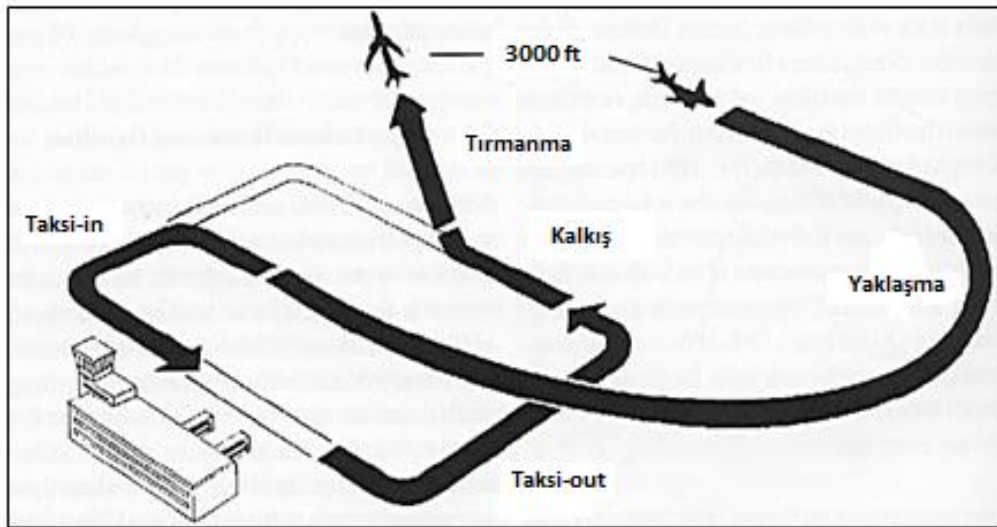
Bundan sonraki kısımda havaalanı çevresindeki ve TMA-yol safhasındaki ATM uçuş verimsizliğinin hesaplanmasında kullanılan göstergeler ve kullanılan hesaplama yöntemleri tanımlanmıştır.



Şekil 3.5. ATM uçuş verimliliği için etki diyagramı

3.2.1 Havaalanı ve çevresinde ATM etkisi

Havaalanı ve çevresinde, uçaklardan kaynaklanan emisyon, ICAO motor egzoz emisyon veritabanından ve ICAO LTO döngüsü esas alınarak hesaplanmaktadır. ICAO LTO döngüsü uçakların meydan ve meydan civarındaki yerden 3000ft irtifaya kadar olan hareketlerini kapsamaktadır. LTO döngüsü ICAO tarafından taksi, tırmanma, son yaklaşma ve kalkış olmak üzere 4 safha olarak belirlenmiştir. Şekil 3.6’da ICAO LTO döngüsü gösterilmektedir.



Şekil 3.6. ICAO Referans LTO Döngüsü [48]

ICAO LTO döngüsündeki safha sürelerinin belirlenmesi için başlangıç ve bitiş noktaları şu şekilde tanımlanmıştır [17];

- **Kalkış Safhası:** Kalkış için frenlerin serbest bırakıldığı andan ana motor güç kolunun arkaya çekildiği ana kadar olan ortalama gaz kolu ayarlarının mevcut olduğu süreyi kapsamaktadır.
- **Tırmanma Safhası:** Güç kolunun arkaya çekildiği noktadan karışım yüksekliğine (genellikle 3000 feet) kadar olan gaz kolu ayarlarının mevcut olduğu süreyi kapsamaktadır.
- **Yaklaşma Safhası:** Karışım yüksekliğinden pist üzerinde inişini gerçekleştirdiği ana kadar olan ortalama gaz kolu ayarların mevcut olduğu süreyi kapsamaktadır.
- **Taksi Safhası:** Taksi-out safhası motor çalıştırma anından kalkış için frenlerin bırakıldığı ana kadar olan gaz kolu ayarlarının mevcut olduğu süreyi kapsamaktadır. Taksi-in safhası ise uçağın inişini tamamladığı andan park pozisyonuna gidip ana motorlarını kapattığı ana kadar olan gaz kolu ayarlarının mevcut olduğu süreyi kapsamaktadır.

ICAO, uçak motor emisyon standartlarının hesaplanmasında kullanılan LTO döngüsündeki safha sürelerini 1970’lerdeki uçuş verilerine dayalı olarak 1980’lerin başında oluşturmuştur. Safha süreleri ve itki ayarları Çizelge 3.5’de verilmiştir [17].

Çizelge 3.5. ICAO LTO döngüsü safha süreleri ve itki ayarları [48]

Safha	Zaman(dk)	İtki Ayarı
Taksi-in	7.0	7%
Taksi-out	19.0	7%
Yaklaşma (Approach)	4.0	30%
Kalkış (Take-off)	0.7	100%
Tırmanma (Climb)	2.2	85%

LTO döngüsünün oluşturulmasında kullanılan uçuş verileri o dönemki “peak” trafik operasyonlarını kapsamaktadır. Daha sonrasında farklı havaalanları arasında gerçek operasyonlarda yukarıda Çizelge 3.5’de verilen safha sürelerinde ve itki ayarlarında büyük sapmalar olduğu fark edilmiştir. Bununla birlikte sabit

LTO döngüsü kullanımı, motor emisyon performanslarındaki farklılıkların karşılaştırılabilmesinde tutarlı bir referans sağlamıştır. Bu nedenle ICAO LTO döngüsü ve buna bağlı emisyon hesaplamaları motor performanslarının tutarlı ve uzun dönem sertifikasyonları için yararlıyken, operasyon sırasındaki uçak emisyonlarının hesaplanmasında doğruyu yansıtmamaktadır.

Safha süreleri ve itki ayarları operasyonlar sırasında uçak ağırlığı, sıcaklık, rüzgar, pist şartları gibi faktörlere bağlı olarak farklılık göstermektedir [24]. Havaalanındaki emisyonunun hesaplamasında ICAO LTO döngüsündeki safha sürelerinin kullanılması halinde sonuçların gerçek emisyon değerlerini yansıtamayacağı ve gerçek emisyon değerlerinin üzerinde emisyon değerleri hesaplanacağı ICAO tarafından belirtilmektedir. Bu nedenle ICAO, operasyon sırasında elde edilen daha kesin veriler mevcutsa bu verilerin kendi verilerinin yerine hesaplamalarda kullanılmasını tavsiye etmektedir [17].

Türkiye'deki havaalanları için LTO döngüsü belirlenirken THY Uçuş Emniyet Müdürlüğü'nden elde edilen veriler kullanılmıştır. Bu veriler ışığında uçağın gaz kolu ayarlamalarına göre B738 ve A320 uçak tipleri için kalkış, tırmanma, yaklaşma ve taksi safhalarının süreleri ve bu safhalarda harcanan yakıt miktarları MS Access ve MySQL veri tabanı yönetim sistemi kullanılarak ayrı ayrı hesaplanmış ve 30 havaalanına ait LTO döngüsünün süreleri belirlenmiştir.

Bu aşamada, MySQL veri tabanının kullanılmasındaki amaç MS Access'in maksimum veri depolama kapasitesinin iki milyon veri olması ve bu kapasitenin de çalışma kapsamındaki ihtiyacı karşılayamıyor olmasıdır. Sorguların MS Access'de yapılıyor olma gerekçesi ise MS Access sorgularının pratik ve hızlı şekilde oluşturulmasının yanı sıra sorgular üzerinde modifikasyona, düzenlemelere olanak sunuyor olmasıdır. Bu kapsamda MySQL veri tabanı üzerindeki analizler MS Access sorguları aracılığı ile yapılmaktadır.

MySQL veri tabanı oluşturulurken FDR parametrelerindeki farklılıklar nedeniyle A320 uçuşları veri320, B738 uçuşları ise veri738 Çizelgesinde olmak üzere iki ayrı Çizelgede tutulmuştur. İki uçağa ait FDR verilerindeki farklılıklar aşağıda listelenmiştir:

- Uçakların yakıt depolarının farklılıkları nedeni ile B738'in 1, 2 ve 3 numaralı yakıt depolarındaki anlık yakıt miktarları FQTY1, FQTY2 ve

FQTY3 ile gösterilirken A320'nin yakıt depolarında bulunan yakıt miktarları FQTY11, FQTY12, FQTY21, FQTY22 ve FQTY31 olarak gösterilmektedir.

- Kuyruk numaralarının ilk ve ikinci grup karakterleri B738'de AC_TAIL1 ve AC_TAIL2 olarak gösterilirken A320'de TAIL1 ve TAIL2 olarak gösterilmiştir.
- ALT_STD B738'de mevcutken A320'de yoktur.
- Uçuş yörünge açısı B738'de FLT-PATH_ANGL olarak gösterilirken A320'de FLT-PATH olarak gösterilmektedir.
- B738'de uçağın gösterge hızı IAS, A320'de ise uçağın düzeltilmiş gösterge hızı IASC bulunmaktadır.

MySQL'e veri yükleme işi Access'de hazırlanan bir ara yüz aracılığı ile gerçekleştirilmektedir. Microsoft (MS) Access 2010 ile MySQL veri tabanı arasındaki bağlantı MySQL ODBC 5.1 Driver ile sağlanmıştır. MS Access'de oluşturulan kod ile .csv uzantılı uçuş dosyaları MS Access çizelgesine dönüştürülmüştür. Bu dönüştürme sırasında ayrı bir kod ile her uçuşa ait özel uçuş kimlik bilgisi (kuyruk kodu-uçuş kodu-kalkış tarihi: S_NO) ve uçak tipi (UCAK_TIPI) ilave sütunlar olarak veri çizelgelerine eklenmektedir. Ardından ayrı bir kod ile MS Access çizelgesi içindeki veriler MySQL veri tabanına transfer edilmektedir.

MySQL veri tabanı veri320 çizelgesinde yer alan A320 uçuşlarına ait veriler on altı milyondan fazla satır içermektedir. Çizelgelerde A320 için 61 farklı parametre sütunu yer aldığı dikkate alındığında veri320 kayıtları (16,487,239 x 61)'lik bir matris formundadır.

MySQL veri tabanı veri738 çizelgesinde yer alan B738 uçuşlarına ait yaklaşık on beş milyon satır içermektedir. Çizelgelerde B738 için 63 farklı parametre sütunu yer aldığı dikkate alındığında veri738 kayıtları (14,939,238 x 63)'lük bir matris formundadır.

Havaalanlarının Taksi-in sürelerinin belirlenmesi amacıyla yapılacak olan Taksi-in sorgusu uçağın varış meydanına inişi esnasında piste teker koyması ile başlamakta ve park edeceği aprona ulaşarak FDR kayıtlarındaki son veri satırı ile sonlanmaktadır. FDR kayıtlarındaki LDGL parametresi hava/yer mantığını ifade

etmektedir ve “0” hava (AIR), “1” yer (GROUND) mantığında kurulmuştur. Sorgu başlangıcı ilk yer (ilk_ground) sorgusu ile LDGL’in son “0” olma koşulu ile uçağın piste teker koyduğu andaki satırı (idVERI) belirlemekte, sonraki aşamada FDR verisindeki son satıra (son_idVERI) sorgusu ile ulaşıp (taxi_in) sorgusu ile (ilk_ground) ve (son_idVERI) arasındaki satırları sayarak; her satırın 1 saniye sürüyor olma mantığı ile Taksi-in süresini belirlemektedir. FDR verilerindeki FF1C ilk motorun, FF2C ise ikinci motorun anlık yakıt akışlarını ifade etmektedir. Bu kapsamda (taxi_in) sorgusu, Taksi-in süresince birinci ve ikinci motorların kg/saat olarak kayıt edilen anlık yakıt tüketimlerini toplayarak 3600’e bölmekte ve kg biriminde Taksi-in süresince gerçekleşen yakıt tüketimini belirlemektedir.

Taksi-out safhası uçağın kalkış yapacağı meydanda, park konumunda motor çalıştırması ile başlayıp, pist başında kalkışa başlaması ile son bulmaktadır. FDR kayıtlarının ilk veri satırı (ILK_IdVERI) Taksi-out safhasının başlangıcını belirler. TLA1C parametresi 1 no’lu motorun gaz kolu açısını ifade etmektedir. Bu parametrenin aldığı değerler 1 (FL REVERS), 2 (IDLE), 3 (CLIMB), 4 (FLX-MCT) ve 5 (TOCA) şeklindedir. Bu değerlerden FLX-MCT (Flexible Maximum Continuous Thrust) gaz kolunun tamamen açılarak maksimum itkinin oluşturulması ile kalkış safhasına başlandığını göstermektedir. Bu nedenle TLA1C’nin ilk 4 olduğu satır (FLX_MCT_ILK) Taksi-out safhasının bittiğini belirleyen satırdır. Bu kapsamda Taksi_out sorgusu ilk veri satırı (ILK_IdVERI) ile TLA1C’nin ilk 4 olduğu satır (FLX_MCT_ILK) arasındaki satırları sayarak; her satırın 1 saniye sürüyor olma mantığı ile Taksi-out süresini belirlemektedir. FDR verilerindeki FF1C ilk motorun, FF2C ise ikinci motorun anlık yakıt akışlarını ifade etmektedir. Bu kapsamda (taksi_out) sorgusu, Taksi-out süresince birinci ve ikinci motorların kg/saat olarak kayıt edilen anlık yakıt tüketimlerini toplayarak 3600’e bölmekte ve kg biriminde Taksi-out süresince yakıt tüketimini belirlemektedir.

Kalkış (Take_off), Taksi-out safhasının sonu ile başlayıp uçağın pist üzerinde teker keserek tırmanmaya geçmesi ile son bulmaktadır. Bu kapsamda TLA1C’nin ilk 4 olduğu satır (FLX_MCT_ILK) kalkış safhasının başlangıcı, hava/yer mantığını ifade eden LDGL parametresinin ilk 0 (AIR) olduğu (AIR_ILK) ise bitişidir. Bu iki satır arasındaki satırlar toplamı ise her bir satırın bir saniyeye karşılık gelme mantığı ile kalkış safhasının süresini vermektedir. Anlık yakıt

akışlarını ifade eden FF1C ve FF2C parametrelerinden yararlanarak Kalkış safhası süresince yakıt tüketimi de belirlenmektedir.

Tırmanma safhası uçağın pist üzerinde teker keserek havalanması ile başlayıp karışım yüksekliğine (3000 feet) ulaşması ile son bulur. Bu kapsamda LDGL parametresinin ilk 0 (AIR) olduğu (AIR_ILK) satır ile yüksekliği ifade eden HEIGHT parametresinin ilk 3000 olduğu (3000_ILK) satır aralığını grupluyor (ILK_AIR_3000_Grup) ve bu grubun satır sayıları her satırın 1 saniye sürüyor olma mantığı ile Tırmanma süresini belirlemektedir. Bu süredeki birinci ve ikinci motorların kg/saat olarak kayıt edilen anlık yakıt tüketimlerini toplayarak 3600'e bölmekte ve kg biriminde Tırmanma süresince yakıt tüketimini belirlemektedir. Tırmanma safhası Süre ve Yakıt Tüketimleri sorgusu LTO_TIRMANMA_738 ve LTO_TIRMANMA_320 olmak üzere iki ayrı uçak tipi için iki ayrı sorgu olarak gerçekleştirilmektedir.

Yaklaşma safhası, karışım yüksekliğinden (3000ft) pist üzerinde inişini gerçekleştirdiği ana kadar olan ortalama gaz kolu ayarların mevcut olduğu süreyi kapsamaktadır. Yüksekliği ifade eden HEIGHT parametresinin son 3000 olduğu (SON_APP_3000) satırı ile LDGL parametresinin son 0 olduğu (TEKER_KOY_APP) satır aralığını sayarak Yaklaşma safhasının süresini belirlemektedir. Bu süre boyunca birinci ve ikinci motorların kg/saat olarak kayıt edilen anlık yakıt tüketimlerini toplayarak 3600'e bölmekte ve kg biriminde Yaklaşma safhası süresince yakıt tüketimini belirlemektedir. Yaklaşma safhasının Süre ve Yakıt Tüketimleri sorgusu LTO_APP_738 ve LTO_APP_320 olmak üzere iki ayrı uçak tipi için iki ayrı sorgu olarak gerçekleştirilmektedir.

Burada dikkat edilmesi gereken konu yapılan hesaplamalarda sadece "medium" kategorisine ait uçak tiplerinin esas alınmış olmasıdır. Ayrıca, yapılan kontroller neticesinde her bir LTO safha süresinin belirlenmesi aşamasında o veri setine ait olmadığı düşünülen aşırı uç değerler veri setinden çıkartılmıştır. Bu nedenle her bir safha için kullanılan veri sayısı değişiklik göstermektedir.

Havaalanı bazında safha sürelerinin belirlenmesinden sonra havaalanlarına ait emisyon hesaplamaları yapılmıştır. Bölüm 2.4'de belirtildiği üzere ICAO tarafından havaalanı çevresindeki emisyonların hesaplanması için basit, ileri ve karmaşık yöntem olmak üzere üç farklı metodoloji geliştirilmiştir. Basit yaklaşım

seçenek B hesaplamalarında gerekli parametreler yakıt akışı, motor sayısı, safha süresi ve emisyon faktörüdür. Bu değerler ICAO tarafında belirlenen standart değerlerdir. İleri yaklaşımda ise operasyonel yani gerçek uçuşlardaki itki ayarlarının farklı olması nedeniyle bu itki ayarlarındaki gerçek yakıt akışları belirlenmektedir. Başka bir deyişle ileri yaklaşım hesaplamalarında gerçek yakıt akış verileri kullanılmaktadır. Karmaşık yaklaşımda ise emisyon hesaplamalarında ihtiyaç duyulan gerçek ve düzeltilmiş veriler gerçek zamanlı ölçümlerle, performans bilgileriyle ve/veya karmaşık bilgisayar modelleme çıktılarıyla elde edilmektedir.

Çalışma kapsamında LTO safhasında ortaya çıkan emisyonların hesaplanmasında ICAO tarafından belirlenen bu metodolojiler esas alınmıştır. Fakat çalışmadaki emisyon hesaplamalar tek bir yaklaşıma dayalı gerçekleştirilmemiştir. Yapılan emisyon hesaplamalarında Denklem (2.4) kullanılmıştır. Bu denklemde gerekli olan safha süresi değerleri gerçek verilere dayalı olarak hesaplanmıştır. Yakıt akışı ve emisyon faktörleri değerleri için ise ICAO tarafından belirlenen standart değerler kullanılmıştır. Fakat, bütün hesaplamalarda tek bir motor tipi için belirlenen değerlerin kullanılması yerine her bir havaalanına iniş-kalkış yapan B737 ve A320 uçak tiplerine ait motor tipleri ayrı ayrı belirlenerek (Çizelge 3.6-3.7) eldeki verilerin her bir motor tipine ait yakıt akışı ve emisyon faktörü değerleri kullanılmıştır. Örneğin Adana Havaalanı için elde edilen toplam 360 adet Ocak ve Ağustos verilerinden 37 tanesi V2524-A5, 81 tanesi V2527-A5, 147 tanesi CFM56-7B26 motor tipine aittir. LTO döngüsünün taksi-out, kalkış ve tırmanma safhalarındaki emisyonlarının belirlenebilmesi için kalkış meydanındaki veriler esas alınmıştır. Başka bir ifadeyle Çizelge 3.6'da verilen motor tipleri kalkış meydanlarına aittir. Taksi-in ve alçalma safhaları için ise iniş meydanlarındaki veriler kullanılmıştır (Çizelge 3.7).

Çalışma kapsamında yapılan hesaplamalar ICAO'nun emisyon hesaplama yaklaşım modelleri referans alınarak bu çalışmaya özgün bir yaklaşım olarak yapılmıştır.

Çizelge 3.6. Kalkış havaalanlarına ait motor tipi verileri

Havaalanı	Motor Tipi							
	V2524-A5	V2527-A5	V2530-A5	V2533-A5	CFM56-5B4/3	CFM56-7B22	CFM56-7B24	CFM56-7B26
ADA	37	81	18	24	26		27	147
ADB	46	131	34	91	37		30	291
ADF	7						2	
ASR	30	42	13	19	6		13	62
AJI	17						9	
AYT	20	68	20	80	21		7	234
BAL	10	2					11	
BJV	12	37	5	91			5	120
DIY	21	39	6	3	6		14	35
DLM	9	42	3	44	7		12	86
DNZ	14	39	5	1	5		12	33
ERZ	8	6	1	7	1		14	23
ESB	33	182	57	143	14		4	14
EZS	11	46	5	2	6		10	29
GNY	10	9		1	5	1	22	37
GZT	18	60	4	18	13	1	9	62
HTY	14	34		4	3	1	22	37
IST	211	543	403	320	115	488	272	440
KCM	19	4			1		45	23
KSY		9	2	1				9
KYA	10	46	1	7	6		12	43
MLX	14	53	5	4	2	1	26	14
MSR	9	39	6	3	4		1	18
MZH	2	2				1	3	6
NAV	16	24		1	6		9	48
SIC	22							
SZF	25	55	4	8	10		12	27
TZX	24	56	4	17	10		7	77
VAN	9	55	3	6	3		3	18
VAS	1	4	1		1		8	15

Çizelge 3.7. İniş havaalanlarına ait motor tipi verileri

Havaalanı	Motor Tipi							
	V2524-A5	V2527-A5	V2530-A5	V2533-A5	CFM56-5B4/3	CFM56-7B22	CFM56-7B24	CFM56-7B26
ADA	36	78	18	24	26		26	147
ADB	46	131	34	91	37		30	291
ADF	11						2	
ASR	30	42	13	19	6		13	60
AJI	17						9	
AYT	22	69	20	80	21		7	234
BAL	10	2					11	
BJV	12	39	5	91			5	118
DIY	21	40	6	3	6		14	35
DLM	9	42	5	44	7		12	86
DNZ	14	39	5	2	5		12	33
ERZ	8	6	1	7	1		14	23
ESB	33	181	55	144	14		4	14
EZS	11	46	5	2	6		10	29
GNY	10	9		1	5	1	22	37
GZT	16	60	4	18	13	1	9	62
HTY	14	34		4	3	1	22	37
IST	209	535	413	325	115	487	272	440
KCM	18	4			1		45	23
KSY		9	2	1				9
KYA	10	38	1	7	3		12	43
MLX	14	53	6	4	2	1	26	14
MSR	9	39	6	5	4		1	18
MZH	2	2				1	3	6
NAV	16	24		1	6		9	48
SIC	22							
SZF	26	57	4	8	10		12	27
TZX	25	53	4	19	10		7	77
VAN	9	50	3	6	3		3	18
VAS	1	4	1		1		8	15

İniş ve kalkış meydanlarına ait eldeki verilerin motor tiplerinin belirlenmesinden sonra her bir motor tipine ait yakıt akışı ve emisyon faktörü

değerleri belirlenmiştir. Aşağıdaki Çizelge 3.8’de hesaplamalarda kullanılan her bir motor tipi için yakıt akışı ve emisyon faktörleri değerleri verilmiştir. Örneğin; V2524-A5 motor tipine ait kalkış safhası için yakıt akışı 1.042 kg/sn, emisyon faktörleri HC için 0.042g/kg, CO için 0.54g/kg ve NOx için de 26.2g/kg olarak verilmiştir.

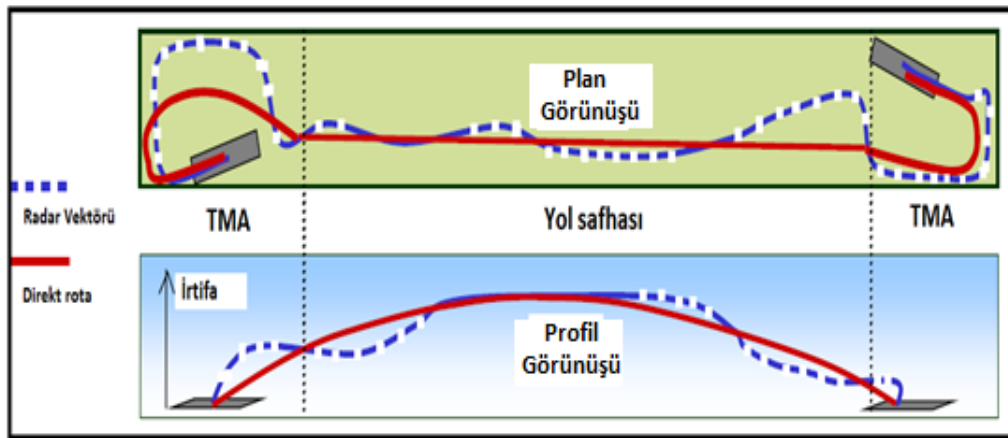
Çizelge 3.8. Uçak motor tiplerine ait ICAO yakıt akışı ve emisyon faktörü değerleri

Motor Tipi	Safha	Yakıt akışı (FF)	Emisyon Faktörü		
			HC	CO	NOx
V2524-A5	Kalkış	1.042	0.042	0.54	26.2
	Tırmanma	0.868	0.042	0.63	22
	Yaklaşma	0.328	0.061	2.37	9
	Taksi	0.123	0.1	12.64	4.7
V2527-A5	Kalkış	1.053	0.041	0.53	26.5
	Tırmanma	0.880	0.041	0.62	22.3
	Yaklaşma	0.319	0.061	2.44	8.9
	Taksi	0.128	0.105	12.43	4.7
V2530-A5	Kalkış	1.331	0.045	0.45	33.8
	Tırmanma	1.077	0.041	0.52	27.1
	Yaklaşma	0.377	0.056	1.81	10.1
	Taksi	0.138	0.1	10.95	5
V2533-A5	Kalkış	1.426	0.047	0.463	36.48
	Tırmanma	1.145	0.043	0.515	28.67
	Yaklaşma	0.390	0.052	1.65	10.83
	Taksi	0.136	0.1	9.317	5.24
CFM56-5B4/3	Kalkış	1.142	0.02	0.25	21.57
	Tırmanma	0.939	0.02	0.16	17.23
	Yaklaşma	0.316	0.05	3.24	8.85
	Taksi	0.102	1.92	32.07	4.22
CFM56-7B22	Kalkış	1.021	0.1	0.5	23.1
	Tırmanma	0.844	0.1	0.6	19
	Yaklaşma	0.298	0.1	2.5	10
	Taksi	0.105	2.5	22.8	4.5
CFM56-7B24	Kalkış	1.103	0.1	0.4	25.3
	Tırmanma	0.910	0.1	0.6	20.5
	Yaklaşma	0.316	0.1	2.2	10.1
	Taksi	0.109	2.4	22	4.4
CFM56-7B26	Kalkış	1.221	0.1	0.2	28.8
	Tırmanma	0.999	0.1	0.6	22.5
	Yaklaşma	0.338	0.1	1.6	10.8
	Taksi	0.113	1.9	18.8	4.7

Hesaplanan emisyon değerleri eldeki veri sayısı ile ilişkilidir. Bu nedenle bu emisyon değerleri havaalanı bazında THY'nin 2011 yılındaki Ocak ve Ağustos ayındaki yurt içi uçuşlarının emisyon değerlerini yansıtmaktadır.

3.2.2 Terminal ve Yol Safhasındaki ATM Etkisi

Hava sahası yol yapılarında sivil/askeri hava sahalarındaki kısıtlamalar, yere dayalı seyrüsefer yardımcılara göre uçuş yollarının belirlenmesi ve çevresel şartlar nedeni ile direkt yolların kullanımına her zaman imkan tanınmaması ve trafik yoğunluğuna bağlı hava trafik kontrolörlerinin taktiksel uygulamaları terminal sahası ve yol safhasındaki ATM uçuş verimsizliğini ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca, terminal sahaları içerisinde geleneksel prosedürler ile belirlenmiş olan geliş ve yaklaşımların uçakları iniş gerçekleştirecekleri pist yönünde erken ve kademeli olarak alçaltması nedeni ile uçaklar düşük irtifada daha fazla düz uçuş gerçekleştirdikleri için yakıt tüketimi de daha fazla olmaktadır. Dolayısıyla havaalanı ve havaalanına yakın yerleşim bölgelerinde oluşan emisyon miktarı da daha fazla olmaktadır. Aynı durum kalkış prosedürleri için de geçerlidir. Bu durum geleneksel prosedürlerin kullanımı yanı sıra uçak sıralama tekniklerinde vektör tekniğinin kullanımından da kaynaklanmaktadır. Şekil 3.7'de uçağın kalkışından inişine kadar olan radar vektörü ile gerçekleştirdiği uçuş profiliyle direkt rota ve devamlı alçalarak yaklaşma yaptığı uçuş profilleri arasındaki farklılıklar gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Radar vektörü ve direkt rota farkı[3]

ATM uçuş verimsizliği konusunda hava trafik kontrol talimatları, ayırma kriterleri ve çevresel kısıtlamalar dikkate alınarak verimsizliğin olduğu uçuş safhaları belirlenmelidir [3]. Bu safhalar belirlenirken emniyet ve ATC sistem kapasitesi konuları da dikkate alınmalıdır.

Bu çalışmada terminal ve yol safhasındaki ATM uçuş verimsizliğinin belirlenmesinde uçuşlar yatay ve dikey verimsizlik olmak üzere iki boyutta incelenecek ve verilerin doğrultusunda yurt içi ATM uçuş verimsizlik modeli oluşturulacaktır.

Hammond ve ark tarafından 2012 yılında gerçekleştirilen “Hava Trafik Kontrol, düzenlemeler ve CO₂ emisyonu“ isimli çalışmada karmaşık verilere ve hesaplamalara ihtiyaç duyulmadan Hava Trafik Kontrol kaynaklı yakıt verimsizliğinin ölçülebilmesi amacıyla bir model geliştirilmiştir. Bu çalışmada dikey verimsizlik, düz uçuşta harcanan uçuş zamanı oranının talep edilen seviyeden sapmasına oranı olarak tanımlanmıştır [78]. Dikey verimsizlik uçuşun her safhasında (tırmanma, yol ve alçalma) oluşabilmektedir. Tırmanma safhası enerjinin en yoğun olduğu uçuş safhasıdır. Bu zaman boyunca yakıt formundaki potansiyel enerji, kinetik enerjiye (uçağı havada tutmak için) ve yerçekimi potansiyeline (irtifa) dönüştürülür. Alçalma boyunca ise, yerçekimi potansiyelinin kinetik enerjiye dönüştürülebilmesi nedeniyle uçağı havada tutabilmek için daha az yakıtı ihtiyaç duyulur. Hammond ve ark. tarafından dikey verimsizlik denklem 3.1 kullanılarak ilk önce tırmanma, seyir ve alçalma olmak üzere uçuşun safhaları olarak ayrı ayrı değerlendirilmiş ve en sonunda denklem 3.2 kullanılarak hepsinin toplamıyla modelde kullanılacak toplam dikey verimsizlik hesaplanmıştır [78].

$$V_i = \frac{t_i(L - l_i)}{TL} \quad (3.1)$$

V_i : dikey verimsizlik

t_i : düz uçuş süresi

T : uçuşun toplam süresi

l : düz uçuş boyunca uçuş seviyesi (FL)

L : uçuş için referans uçuş seviyesi (FL)

$$\begin{aligned}
v_{CL} &= \sum v_i \\
v_{CR} &= \sum v_i \\
v_D &= \sum v_i \\
V &= v_{CL} + v_{CR} + v_D
\end{aligned}
\tag{3.2}$$

Hammond ve ark. tarafından ATM kaynaklı yatay verimsizlik ise uçuşun gerçek uçuş mesafesi ile ve büyük daire mesafesi arasındaki fark olarak özetlenmiş ve yatay verimsizliğin belirlenmesi amacıyla denklem 3.3 kullanılmıştır.

$$\tau = \frac{M_{GER} - M_{OPT}}{M_{OPT}}
\tag{3.3}$$

Formülde;

τ : Oransal mesafe fazlalığı,

M_{GER} : Gerçek toplam uçuş mesafesi,

M_{OPT} : Optimal mesafeyi ifade etmektedir.

Bu tez kapsamında dikey ve yatay verimsizliklerinin hesaplanabilmesi amacıyla Hammond ve ark. tarafından kullanılan 3.1, 3.2, 3.3 denklemleri kullanılmıştır. Fakat seyir irtifası belirlenirken optimum uçuş seviyesi yerine uçuşun gerçekleşmiş seyir irtifası referans alınmıştır. Başka bir ifadeyle; dikey verimsizlik hesaplamalarında sadece tırmanma ve alçalma sırasında gerçekleşen verimsizliklerin toplamı modele katılmıştır. Bu nedenle; tez kapsamında ATM kaynaklı dikey verimsizlik, hava sahası yapısı ya da hava trafik kontrolörü tarafından uygulanan taktiksel müdahaleler sonucunda uçuşun kalkışından seyir irtifasına kadar olan tırmanışı ve seyir irtifasından iniş yapacağı pist eşiğine kadar olan alçalışı sırasında oluşan düz uçuş periyodu olarak tanımlanmıştır.

ATM verimsizlik modelinde yakıt verimsizliğinin ortaya konulabilmesi için uçuşların gerçekleşmiş yakıt tüketimleri ile kıyaslanabilecek referans bir yakıt tüketimi olmalıdır. Buradaki referans yakıt tüketimi, uçağın talep edilen seyir irtifasına kesintisiz bir şekilde tırmanması, aynı şekilde seyir irtifasından itibaren

kesintisiz bir şekilde alçalması ve en kısa uçuş mesafesi (büyük daire mesafesi) ile uçulması halinde gerçekleşen yakıt tüketimini ifade etmektedir.

Hammond ve ark. tarafından gerçekleştirilen çalışmada referans yörüngelerin ve bu yörüngelere göre gerçekleşen referans yakıt tüketimlerinin bulunabilmesi amacıyla BADA 3.7.2 uçak performans verileri kullanılmıştır. Bu referans yörüngesi oluşturulurken ISA şartları, nominal kalkış ağırlığı ve durgun rüzgâr şartları kullanılmıştır. Gerçek uçuş verilerindeki meteorolojik şartların ve kalkış ağırlığının BADA verilerine göre farklı olması nedeniyle referans yörünge ile gerçek yörünge arasında bazı farklılıklar olmaktadır. Bu farklılıkları en aza indirmek amacıyla referans yörüngedeki uçak performansları ve atmosferik varsayımlar kullanılarak elde edilen gerçek uçuş yörüngeleri simüle edilmiştir. Daha sonra referans yakıt tüketiminin bulunabilmesi için ise NATS tarafından oluşturulan yakıt modeli KERMIT kullanılmıştır. KERMIT modeli ile elde edilen referans yakıt tüketimine göre yakıt verimsizliğinin belirlenmesi amacıyla aşağıdaki formül kullanılmıştır;

$$x = \frac{(F_{GER} - F_{REF})}{F_{REF}} \quad (3.4)$$

x : Oransal yakıt fazlalığı

F_{GER} : Gerçek toplam yakıt tüketimi

F_{REF} : Referans yakıt tüketimi

Bu tez kapsamında ATM verimsizlik modelinde kullanılacak referans yakıt tüketiminin bulunması amacıyla Hammond ve ark. tarafından kullanılan yöntemle kıyasla farklı iki yöntem belirlenmiştir. İlk yöntem; meydan çifti arasındaki rota için elde edilen verilerden gerçekleşmiş en düşük yakıt tüketimi bulunarak dikey ve yatay verimsizlikler oluşmaması halinde meydana gelecek yakıt tüketiminin belirlenmesidir. Bu yöntemde o rota için gerçekleşmiş bütün uçuşların yakıt tüketimi kıyaslamasının bu belirlenen referans yakıt tüketimi ile yapılması düşünülmüştür. Bu amaç doğrultusunda ilk olarak her bir rota için elde edilen bütün uçuşların yakıt tüketimleri hesaplanmıştır. Uçağın harcadığı yakıtı bulabilmek için FDR verilerindeki FF1 ve FF2 parametreleri kullanılmıştır. FF1 ve FF2

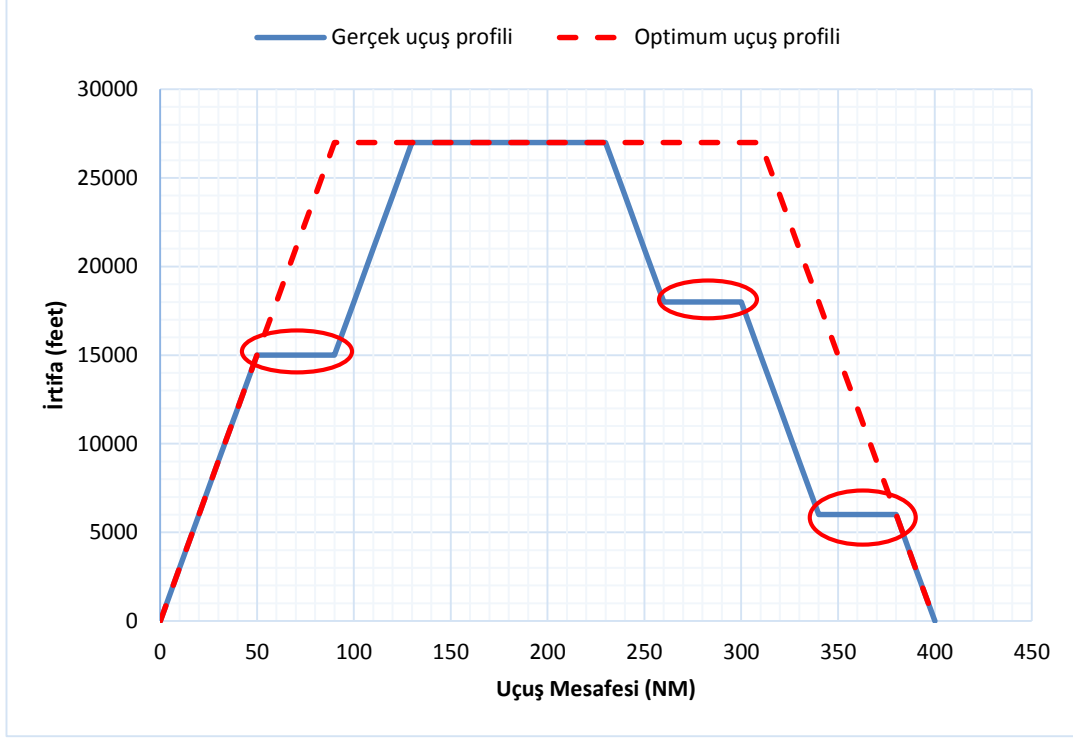
parametreleri uçağın o andaki birim zamandaki yakıt tüketimini kg cinsinden vermektedir. FF1 ve FF2 parametrelerinin toplanması ile uçağın herhangi bir uçuş safhasındaki yakıt tüketimi hesaplanabilmektedir. Daha sonra elde edilen yakıt tüketimleri arasından en az yakıt tüketimine sahip uçuş belirlenmiştir (Şekil 3.8).

1	Uçuş no	Rota	Ucak_Tipi	Toplam Yakıt Tüketimi (kg)
2	TC-JKJ87055420110303.xls	IST-GNY	B737	2825
3	TC-JKJ97545920110806.xls	IST-GNY	B737	2854
4	TC-JLM98455820110813.xls	IST-GNY	A320	2898
5	TC-JPR85064120110125.xls	IST-GNY	A320	2962
6	TC-JLK83963920110112.xls	IST-GNY	A320	2969
7	TC-JPH98935020110816.xls	IST-GNY	A320	3003
8	TC-JKO88565620110331.xls	IST-GNY	B737	3005
9	TC-JKK97945620110807.xls	IST-GNY	B737	3018

Şekil 3.8. Rotalara ait en düşük yakıt tüketimlerinin belirlenmesi (örnek)

En az yakıt tüketimine sahip uçuşun belirlenmesinden sonra bu uçuştaki dikey ve yatay verimsizliklerin tespit edilmesi aşamasına geçilmiştir. Uçuştaki dikey verimsizliklerinin tespit edilebilmesi için uçuşun tırmanma ve alçalma sırasındaki düz uçuş periyotlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda uçuşun profili çıkartılmıştır.

Uçuşların profillerinin çıkartılması işleminde önemli olan parametreler uçulan mesafe ve irtifadır. FDR kayıtlarında irtifa verisi (ALT_QNH) mevcutken uçulan mesafe verisi bulunmamaktadır. Bu nedenle uçulan mesafenin bulunabilmesi için yer hızı (GS-Ground Speed) parametresi kullanılmıştır. FDR kayıtlarında yer hızı verisi saniyelik olarak knot cinsinden bulunmaktadır. Uçağın o andaki yer hızının 3600'e bölünmesi ile o anda kat ettiği mesafe bulunabilmektedir. Saniyelik olarak kat ettiği mesafelerin toplanması ile de uçağın uçuş süresi boyunca kat ettiği mesafe hesaplanabilmektedir. İrtifa ve hesaplanan uçuş mesafesi kullanılarak uçuşun profili çıkartılmıştır. Uçuş profillerinde uçağın seyir irtifasına kadar olan tırmanması sırasında ve seyir irtifasından itibaren olan alçalması sırasında gerçekleşen düz uçuş periyotları ile dikey verimsizlik belirlenmiştir (Şekil 3.9).



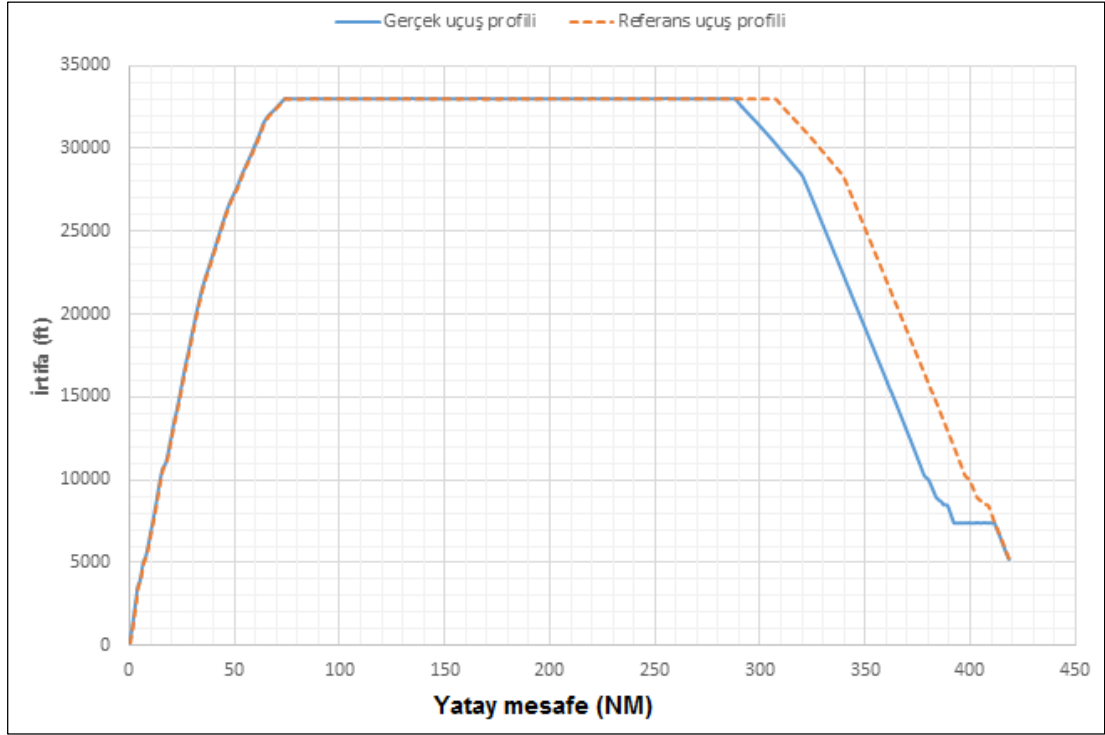
Şekil 3.9. Optimum ve gerçek uçuş profilleri

Tırmanma ve alçalma sırasında oluşan düz uçuş periyotlarının belirlenmesinden sonra bu dikey verimsizliklerinin yakıt tüketimine olan etkisi belirlenmelidir. Bu amaç doğrultusunda geliştirilen yöntem örnekle aşağıda anlatılmıştır.

Örnek olarak alınan uçuşun gerçek uçuş profili ile dikey verimsizliğin ortadan kaldırılması halinde oluşan referans uçuş profili Şekil 3.10’da verilmiştir. Uçuş toplamda 419NM olarak gerçekleşmiştir. Buna göre harcanan toplam yakıt 2631kg olarak hesaplanmıştır. Uçuşun kalkış anından seyir irtifasına kadar olan tırmanma safhasında herhangi bir düz uçuş periyodu bulunmamaktadır. Uçuşun seyir irtifasındaki düz uçuşu 213NM sürmüştür ve bu safhada toplamda 974 kg yakıt harcanmıştır. Uçuşun alçalma kısmında sadece 7500 ft irtifada bir düz uçuş gerçekleşmiştir. Alçalma sırasında gerçekleşen düz uçuş periyotları çıkartıldığında ortaya çıkan profil Şekil 3.10’da görülmektedir. Referans yakıt tüketiminin bulunabilmesi amacıyla bu düz uçuş periyotlarındaki uçuş mesafeleri seyir irtifasında gerçekleşen uçuş mesafelerine eklenerek burada oluşan yakıt tüketimi olarak toplam yakıt tüketimine eklenmiş ve bunun neticesinde aynı uçuş mesafesi

için tırmanma ve alçalma esnasında hiçbir düz uçuş periyodu olmaksızın gerçekleşebilecek yakıt tüketimi 2487 kg olarak hesaplanmıştır. Tırmanma ve alçalma esnasında oluşan düz uçuş periyotlarının yakıt tüketimine etkisi olmasının yanı sıra toplam uçuş süresi üzerine de etkisi olmaktadır. Uçağın seyir irtifası sırasındaki uçuş hızı ile özellikle alçalma sırasında gerçekleşen düz uçuş periyotlarındaki uçuş hızı farklılık göstermektedir. Örnek uçuş için; seyir irtifasında saniyede 0.13 NM yol alırken 7000 feet irtifadaki hızı ile saniyede 0.07 NM yol almaktadır. Dikey verimsizlik ortaya konulurken toplam uçuş mesafesi aynı tutulmuştur. Bu nedenle düşük irtifada gerçekleşen düz uçuş periyodu (örnek uçuş için 42 NM) seyir irtifasına taşındığı zaman toplam uçuş süresi değişmektedir. Hesaplanan bu uçuş süresi dikey verimsizliğin ortadan kalkması halindeki toplam uçuş süresi olarak ifade edilmiştir.

Referans yakıt tüketimi için uçuş mesafesi fazlalığının yani yatay uçuş verimsizliğinin de dikkate alınması gerekmektedir. Yatayda gerçekleşen uçuş verimsizliği uçuşun belirli meydan çifti arasındaki gerçek uçuş mesafesi ile büyük daire mesafesi arasındaki fark olarak ifade edilmiştir. Bu uçuş için kalkış ve iniş meydanları arasındaki büyük daire mesafesi 377 NM'dır ve yaklaşık 42 NM bir fazlalık söz konusudur. Uçuşun seyir irtifasındaki düz uçuşunda 1NM için ortalama 4,6 kg yakıt tüketimi gerçekleştiği hesaplanmıştır. Bu da 42 NM'lik bir uçuş için 192 kg fazla bir yakıt tüketimi anlamına gelmektedir. Daha önce hesaplanan dikey verimsizlik olmaması halindeki yakıt tüketiminden (2487 kg) bu değer çıkarılması ile yatay ve dikey uçuş verimsizliği olmadan gerçekleşebilecek yakıt tüketimi elde edilmiştir. Buna göre bu uçuş için aynı meteorolojik şartlar ve uçuş ağırlığında referans yakıt tüketimi 2297 kg'dır. Yatay verimsizliğin toplam uçuş süresi bakımında etkisini ortaya koyabilmek için ise uçağın seyir irtifasındaki ortalama olarak saniye birimde aldığı mesafe kullanılmıştır. Gerçek uçuş mesafesi ile büyük daire mesafesi arasındaki yol fazlalığının (bu uçuş için 42 NM) uçuşun seyir irtifasında saniyede aldığı mesafeye (0.13NM) bölünmesi ile yatay verimsizlik için uçuş süresi fazlalığı ortaya çıkmaktadır. Daha önceden hesaplanan dikey verimsizliğin ortadan kalkması halindeki toplam uçuş süresinden bu değer çıkarılması ile referans uçuş profili için toplam uçuş süresi bulunmuştur.



Şekil 3.10. Örnek uçuşa ait optimum ve gerçek uçuş profilleri

Yukarıda anlatılan bu işlemler her bir rotanın en az yakıt tüketimine sahip uçuşu için gerçekleştirilmiş ve o rotalar için gerçekleştirilecek minimum yakıt tüketimleri hesaplanmış ve bulgular kısmında verilmiştir.

Her bir rota için oluşturulacak referans uçuş profili birçok faktöre göre değişiklik gösterebilmektedir. Bu da herhangi bir rotada optimum yakıt sarfiyatının belirlenmesini oldukça zorlaştırmaktadır. Çünkü, uçak tipi, maksimum kalkış ağırlığı ve rota uzunluğuna ilaveten yakıt tüketimi ayrıca rüzgar, sıcaklık, uçak merkezi ağırlığı ve maliyet katsayısı (CI-Cost Index) gibi birçok faktöre bağlıdır.

Maliyet katsayısı zaman maliyetinin yakıt maliyeti ile kıyaslanmasıdır ve en iyi ekonomiyi elde etmek için kullanılmaktadır. Maliyet katsayısının belirlenmesi, kendi ekonomi politikalarına bağlı olarak her bir havayoluna özgü olarak değişmektedir. Yakıt maliyetlerinin zaman maliyetlerinden daha fazla olması durumunda maliyet katsayısı düşük olmaktadır. Yani uçuşun minimum yakıt için uzun-menzil hızında uçuşu tercih edilir. Bununla birlikte eğer yakıt maliyeti, zaman maliyetine kıyasla oldukça düşük olursa hız önem kazanır ve maliyet katsayısı yüksek olur. Yani uçuşun minimum zaman için maksimum hızda uçuşu

tercih edilir [79]. En iyi ekonomi durumu havayolu işleticilerinin maliyet yapısına ve operasyon önceliklerine göre değişmektedir. Minimum zaman ve minimum yakıt ilkesi arasındaki yakıt tasarrufu değerlidir ve önemli bir yakıt tasarrufu sağlar.

Uçuş ekibi, kötü hava koşullarında uçarken irtifa sapması gerçekleştirmek zorunda kalabilirler. Ayrıca kötü hava koşulları gecikmelere neden olabilir, böylelikle pilotlar ideal hızdan daha yüksek bir hızda uçabilirler. Bu gibi sapmalar fazla yakıt harcanmasına neden olabilmektedir. Rüzgâr etkisi günlük meteorolojik şartlara göre değişmektedir ve uçuş ekibi anlık özgül yakıt sarfiyatlarını takip ederek özgül menzillerini optimize edebilmektedirler.

Yakıt tüketimine etki eden bir diğer faktörde uçağın ağırlık merkezidir. Azami ağırlık, kuru operasyon ağırlığı, paralı yük ve yakıt ağırlığının toplamıdır ve uçağın ağırlık merkezi üzerine bir kuvvet olarak hareket eder. Aşırı yükleme ve uygun olmayan denge uçağın daha fazla motor itkisi ihtiyacına ve daha fazla yakıt tüketimine neden olmaktadır.

Yakıt tüketimi, ayrıca, maliyet katsayısı, meteorolojik şartlar ve ağırlık merkezi aynı olsa bile pilotların uyguladığı alçalma ve tırmanma profillerine göre de değişebilmektedir. Tırmanma profilleri hıza göre değişmektedir. Yüksek hız, daha düşük tırmanma açısı, daha uzun tırmanma mesafesi ve daha fazla yakıt tüketimi demektir. Alçalma sırasında ise daha az yakıt tüketimi için iki ana parametre vardır; hız ve alçalma eğimi. Daha yüksek açı ile alçalma sırasında daha az itkiye ihtiyaç duyulduğu için yakıt tasarrufu sağlanır. Ayrıca TOD noktası daha ileri taşınır ve seyir irtifasındaki düz uçuş periyodu daha uzun sürer. Bunun yanı sıra, belirli bir alçalma eğimi için daha düşük hızda yine daha az itkiye ihtiyaç duyulması nedeniyle daha az yakıt harcanır.

Her bir uçuşun maksimum kalkış ağırlığı, meteorolojik şartlar, kalkış pist başı ve iniş pist başı gibi uçuş parametrelerindeki farklılıklarından dolayı Hava Trafik Yönetimi verimsizlik modelinde kullanılacak referans yakıt tüketiminin belirlenmesinde ikinci bir yöntem daha oluşturulmuştur.

Hava Trafik Yönetimi verimsizlik modelinde kullanılacak referans yakıt tüketiminin bulunması amacıyla oluşturulan ikinci yöntemde ilgili rota için belirlenen uçuşların her biri için gerçek yakıt tüketimlerine kıyasla gerçekleştirilecek minimum yakıt tüketimlerinin bulunmasıdır. Birinci yöntem

kıyasla en önemli fark, bu yöntemde her bir rota için tek bir referans yakıt tüketimi yerine her uçuş için referans yakıt tüketiminin hesaplanmasıdır. Bu ikinci yöntemde uçuşların yakıt tüketimlerinin yanı sıra maksimum kalkış ağırlığı ve kalkış-iniş pistleri de ayrı ayrı belirlenmiştir (Şekil 3.11).

1	Uçuş no	Rota	Ucak_Tipi	Maks. Kalkış Ağırlığı (ton)	Süre (dk)	Toplam Yakıt Tüketimi (kg)	Kalkış Pisti	İniş Pisti
2	TC-JKJ87055420110303.xls	IST-GNY	B737	53.4	82.5	2825	36R	4
3	TC-JKJ97545920110806.xls	IST-GNY	B737	52.9	81.3	2854	36R	4
4	TC-JLM98455820110813.xls	IST-GNY	A320	58.2	82.1	2898	36R	4
5	TC-JPR85064120110125.xls	IST-GNY	A320	61.7	81.2	2962	36R	4
6	TC-JLK83963920110112.xls	IST-GNY	A320	59.5	81.8	2969	36R	4
7	TC-JPH98935020110816.xls	IST-GNY	A320	63.2	85.3	3003	36R	4
8	TC-JKO88565620110331.xls	IST-GNY	B737	56.7	82.4	3005	36R	4
9	TC-JKK97945620110807.xls	IST-GNY	B737	52.1	85.6	3018	36R	4

Şekil 3.11. Referans yakıt tüketimi için uçuşlara ait yakıt tüketimlerinin belirlenmesi (örnek)

Öncelikle her bir rotanın kendi içerisinde kalkış-iniş pisti aynı olan uçuşlar filtrelenerek veri tabanı oluşturulmuştur. Daha sonra maksimum kalkış ağırlığı farklılıklarından dolayı ortaya çıkan yakıt tüketim farklılıklarının önüne geçmek adına bu veri tabanı içerisinde her bir rota için ortalama olarak maksimum kalkış ağırlıkları belirlenmiştir. Bu ortalama maksimum kalkış ağırlığına en yakın maksimum kalkış ağırlıklarına sahip uçuşlar belirlenerek yeni bir veri tabanı oluşturulmuştur. Bu veri tabanı içerisindeki her bir uçuş için daha önceki yöntemde bahsedilen aşamalar gerçekleştirilmiş, dikey ve yatay verimsizlikler olmaksızın aynı uçuş şartlarında gerçekleştirilecek referans yakıt tüketimleri hesaplanmıştır.

İkinci yöntem kapsamında seçilen uçuşlar için hesaplanan referans yakıt tüketimleri Denklem 3.4’de kullanılarak ilgili uçuşların yakıt verimsizlikleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu yakıt verimsizlikleri ATM verimsizlik modeli içerisinde kullanılacak bir değişken olarak belirlenmiştir. Bu yöntem dahilinde yapılan hesaplamalar bulgular kısmında yer almaktadır.

Oluşturulan model ile ATM uçuş verimsizlik puanları hesaplanan rotaların seçilmesinde de bazı kriterler göz önünde bulundurulmuştur. Bu rotaların seçiminde ilk olarak yatay uçuş verimsizliklerine bakılmıştır. Daha sonrasında yapılan dikey uçuş analizleri neticesinde dikey uçuş verimsizliklerinin var olup

olmamasına bakılmıştır. Bu kriterlerden sonra, veri setinde ilgili rota için yeterli sayıda veri olması göz önünde bulundurulmuştur. Bu aşamadan sonra Dalaman, İzmir, Antalya gibi rotalar da hesaplama dışında bırakılmıştır. Bunun nedeni; bu rotalardaki uçuşların doğu-batı şeklinde iki farklı seyir irtifasına sahip olmalarıdır. İstanbul Atatürk Havaalanı'ndan kalkıp bu havaalanlarına gidecek olan uçuşlar ilk olarak doğu yönlü uçtukları için tek bin irtifaya (31000-33000 ft gibi) tırmandırılırlar. Daha sonra bu uçuşlar batı yönlü olarak uçuşlarına devam ederler ve çift bin irtifaya (30000-32000 ft gibi) tırmandırılır ya da alçaltılırlar. Model içerisindeki toplam dikey verimsizlik değişkeni oluşturulurken kullanılan formülde tek bir seyir irtifası kullanılması nedeniyle iki seyir irtifasına sahip olan bu uçuşlar dikkate alınmamıştır.

4. BULGULAR

4.1. Türkiye'deki Havaalanları için LTO Döngüsü Safha Sürelerinin, Yakıt Tüketimlerinin ve Emisyonlarının Analizleri

4.1.1. Taksi-out Safhası

Taksi-out safhası daha önceden de belirtildiği gibi motor çalıştırma anından kalkış anına kadar geçen süreyi kapsamaktadır. ICAO'nun belirlediği standart LTO döngüsünde taksi-out süresi 10 dakika olarak belirtilmiştir. Bütün havalimanları için elde edilen verilerle her iki uçak tipine ait taksi-out süreleri ve ortalama yakıt tüketimleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bütün havaalanları için taksi-out sürelerinin belirlenmesinde toplam 5940 veri kullanılmıştır. Taksi-out süreleri ve yakıt tüketimleri A320 ve B738 için ayrı ayrı hesaplanmış ve Çizelge 18'de verilmiştir. Çizelge'de ayrıca uçak tipleri ait taksi-out süreleri ve yakıt tüketimlerinin standart sapmaları da verilmiştir. Örneğin; Adana Havalimanı için ortalama taksi-out süresi A320 için 6.7 dk, standart sapması 2.4 dk, B738 için ise 8.6 dk standart sapması 2.4 dk, yakıt tüketimleri de A320 için 95.8 kg standart sapması 33.6 kg, B738 için 111.2 kg standart sapması 31.6 kg olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.1 ve 4.2'de iki uçak tipinin taksi-out ve yakıt tüketimlerinin ortalamaları alınarak belirlenen "medium" uçak kategorisine ait taksi-out ve yakıt tüketimleri verilmiştir. Şekil 4.1'de de görüleceği üzere yapılan hesaplamalara göre en uzun taksi-out süresine sahip havalimanı ortalama 14.3 dakikalık bir süre ile İstanbul Atatürk Havalimanıdır. Bu havaalanı için taksi-out safhasında harcanan yakıt tüketimi ise ortalama 194.4 kg olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.2). İstanbul Atatürk Havaalanı'ndan sonra en uzun taksi-out süresine sahip havaalanı Antalya Havaalanı'dır. Antalya Havaalanı için belirlenen taksi-out süresi 10.8 dk, yakıt tüketimi ise 149.4 kg'dır.

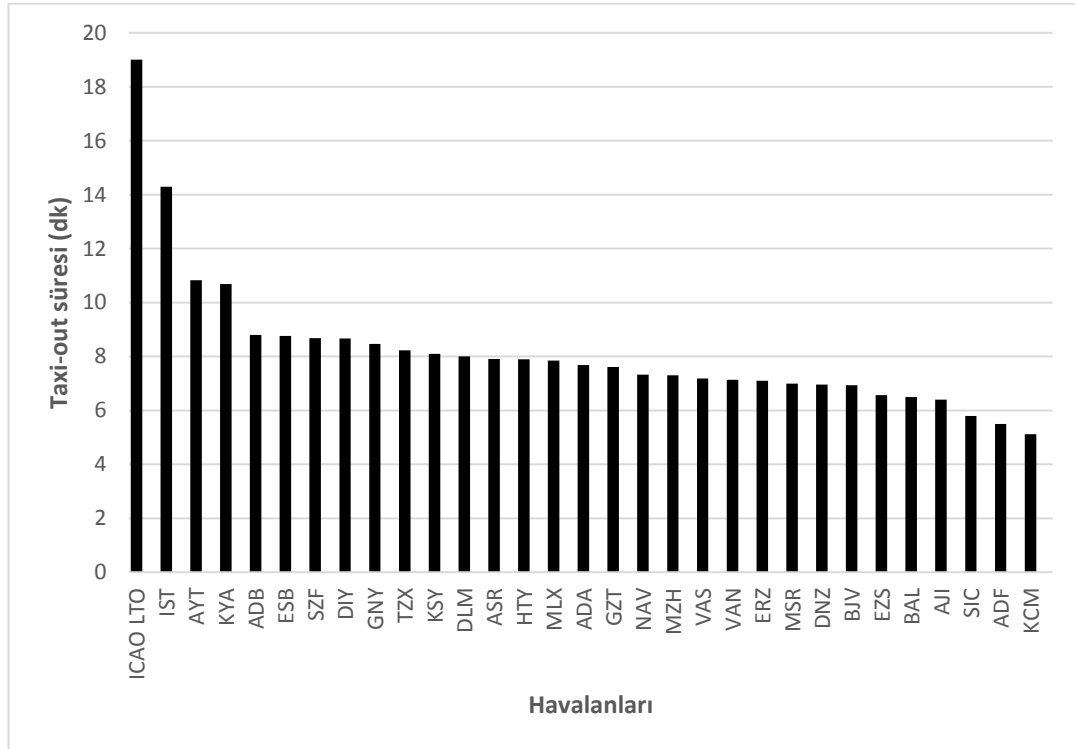
Çizelge 4.1. Havaalanlarının belirlenen taxi-out süreleri ve ortalama yakıt tüketimleri

Havaalanı	Uçak Tipi	Veri Sayısı	Süre (dk)		Yakıt Tüketimi (kg)	
			Ort.	Std. Sapma	Ort.	Std. Sapma
ADA	A320	92	6.7	2.39	95.8	33.58
	B738	90	8.6	2.44	111.2	31.6
ADB	A320	132	7.5	2.27	108.6	35.75
	B738	141	10.1	2.02	129.5	30.48
ADF	A320	7	5.5	1.70	79.9	22.77
	B738	-	-	-	-	-
ASR	A320	57	7.2	3.22	98.7	43.15
	B738	28	8.6	2.87	114.3	53.74
AJI	A320	5	6.4	0.70	88.0	42.29
	B738	-	-	-	-	-
AYT	A320	208	9.6	3.61	145.1	56.56
	B738	216	12.0	3.37	153.7	48.42
BAL	A320	6	6.5	3.16	100.6	49.58
	B738	-	-	-	-	-
BJV	A320	8	5.8	1.56	98.0	54.1
	B738	23	8.1	3.51	103.9	38.94
DIY	A320	48	8.0	3.41	116.9	49.71
	B738	14	9.3	3.26	111.1	36.82
DLM	A320	18	6.8	2.05	99.3	28.44
	B738	14	9.2	2.69	122.8	48.47
DNZ	A320	64	6.2	2.04	89.0	30.9
	B738	26	7.8	2.19	100.3	28.25
ERZ	A320	14	5.5	1.09	73.7	12.88
	B738	53	8.7	3.43	105.8	33
ESB	A320	215	7.4	3.18	103.5	43.76
	B738	194	10.1	4.09	128.5	54.69
EZS	A320	46	5.8	1.61	83.9	24.16
	B738	14	7.4	2.58	93.6	30.48
GNY	A320	14	7.4	2.17	103.2	34.3
	B738	62	9.6	1.64	121.5	17.91
GZT	A320	42	6.5	1.76	90.9	29.44
	B738	30	8.8	1.63	108.2	17.68
HTY	A320	19	6.8	1.23	99.1	20.87
	B738	44	9.0	1.82	117.9	24.45
IST	A320	1734	13.0	7.09	193.1	101.79
	B738	1572	15.6	7.49	195.7	90.03
KCM	A320	9	4.0	0.63	55.3	9.31
	B738	56	6.3	2.03	78.3	22.72
KSY	A320	13	6.4	1.48	87.6	19.12
	B738	7	9.8	1.40	122.7	14.72
KYA	A320	67	9.9	1.89	149.0	30.18
	B738	27	11.5	2.05	151.6	25.73
MLX	A320	41	7.0	2.07	102.8	28.83
	B738	11	8.7	2.17	110.4	24.17
MSR	A320	58	7.0	2.93	97.1	41.31
	B738	-	-	-	-	-
MZH	A320	-	-	-	-	-
	B738	10	7.3	1.38	89.4	15.52

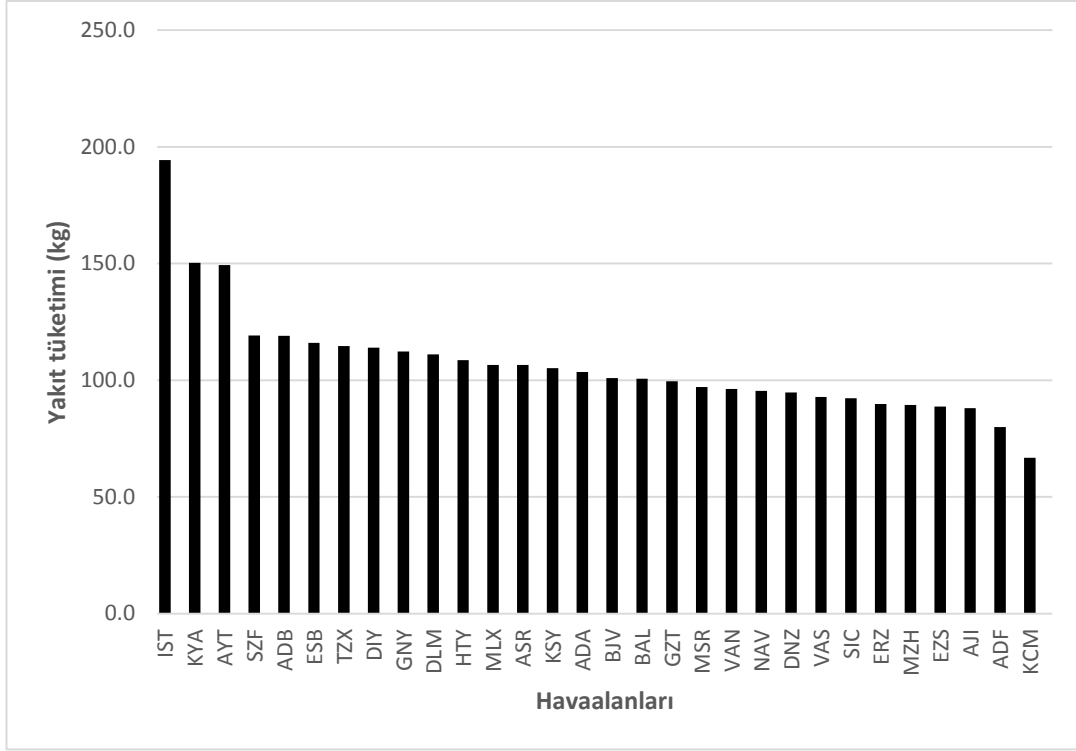
Çizelge 4.1. (Devam) Havaalanlarının belirlenen taxi-out süreleri ve ortalama yakıt tüketimleri

NAV	A320	10	6.0	1.39	80.9	18.95
	B738	68	8.7	2.51	110.0	37.45
SIC	A320	83	5.8	2.12	92.3	37.7
	B738	-	-	-	-	-
SZF	A320	54	7.3	1.92	107.2	34.03
	B738	14	10.1	2.90	131.3	45
TZX	A320	25	7.1	2.76	101.8	39.66
	B738	52	9.4	2.36	127.4	47.18
VAN	A320	43	5.8	1.32	82.9	19.21
	B738	9	8.5	1.44	109.6	15.57
VAS	A320	7	7.2	2.69	94.4	37.29
	B738	14	7.2	1.27	91.2	16.09

Şekil 4.1’de görüleceği üzere en kısa taxi-out süresine sahip havalimanları ise Kahramanmaraş Havalimanı ile Adıyaman Havalimanı’dır. Kahramanmaraş Havalimanı için taxi-out süresi 5.1 dk, yakıt tüketimi 66.8 kg’dır. Adıyaman Havalimanı için ise taxi-out süresi 5.5 dk, yakıt tüketimi de 79.9 kg’dır.



Şekil 4.1. Havaalanları ait taxi-out süreleri

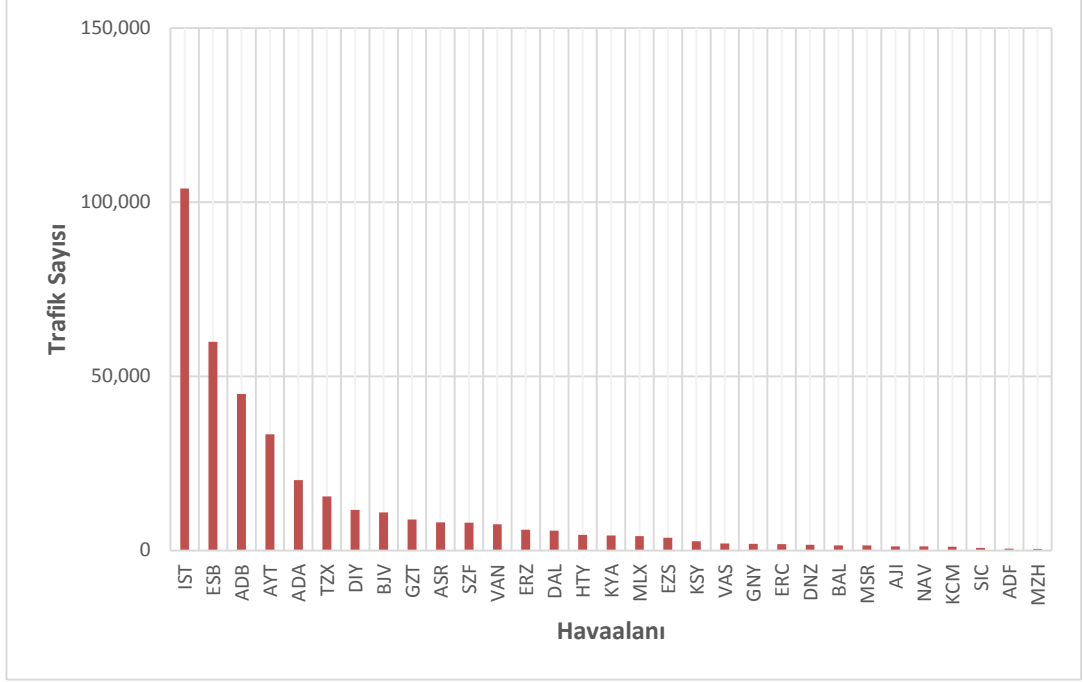


Şekil 4.2. Havaalanları ait taksi-out safhasındaki yakıt tüketimleri

Havaalanları arasında taksi-out sürelerinin farklı çıkmasının en önemli etkeni trafik yoğunluğudur. Şekil 4.3’de 2011 yılına ait havaalanlarının yurt içi trafik sıralaması verilmiştir [80].

Bu sıralamaya göre en fazla yurt içi uçuşun gerçekleştiği havaalanı 103,938 uçuş ile İstanbul Atatürk Havaalanıdır. En az yurt içi uçuş gerçekleştiği havaalanları ise sırasıyla Amasya, Adıyaman, Sinop ve Kahramanmaraş Havaalanlarıdır. Yapılan taksi-out süresi hesaplamalarında en az taksi-out süresine sahip havaalanları da sırasıyla Kahramanmaraş, Adıyaman ve Sinop Havaalanlarıdır.

Trafik yoğunluğu ile taksi-out süresi arasındaki ilişkiye bakıldığında trafik yoğunluğu az olup taksi-out süresi yüksek çıkan bazı havaalanları (Konya ve Amasya Havaalanları gibi) olduğu görülmektedir. Şekil 4.3’de verilen trafik sayıları sadece sivil uçuşları kapsamaktadır. Konya, Amasya, Dalaman, Erzurum, Batman, Diyarbakır, Elâzığ, Muş ve Sivas havaalanları ikili anlaşmalar gereği sivil ulaşımda yararlanan ve DHMİ tarafından hizmet verilen hem askeri hem sivil havaalanlarıdır. Bu nedenle bu havaalanlarına ait taksi-out süresinde askeri trafik sayısı da göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 4.3. Havaalanlarına ait 2011 yılı trafik sayısı [80]

Uçağın kalkış yapacağı pist başı, pist başına giderken izlediği taksi yolları, uçağın bulunduğu apron ve taksi yolları gibi havaalanı elemanlarının yerleşimi ve kalkış-iniş ayırması sırasındaki bekleme zamanı gibi faktörler taksi-out süresindeki farklılıklara neden olan diğer faktörlerdir.

Çalışılan havaalanları için taksi-out safhasına ait sürelerinin bulunmasından sonra bu safhaya ait havaalanı bazında hesaplanan emisyon değerleri (HC, CO, NOx) aşağıdaki Çizelge 4.2’de verilmiştir.

4.1.2 Taksi-in Safhası

LTO döngüsünün taksi-in safhası uçağın inişini tamamladığı andan park pozisyonuna gidip ana motorlarını kapattığı ana kadar olan gaz kolu ayarlarının mevcut olduğu süreyi kapsamaktadır. ICAO’nun belirlediği standart LTO döngüsünde taksi-in süresi 7 dakika olarak belirtilmiştir. Bu süre tüm uçak tiplerine ait taksi-in süresinin ortalaması olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.2. Taksi-out safhasına ait emisyon değerleri

Havaalanı	Veri sayısı	Taksi-out Safhası		
		HC (kg)	CO (kg)	NOx (kg)
ADA	360	41989	646384	185719
ADB	660	86175	1328237	399777
ADF	9	402	10348	3304
ASR	185	18257	322034	101309
AJI	26	1969	36873	10863
AYT	450	76085	1106091	336903
BAL	23	2361	35184	9563
BJV	270	24031	386929	135483
DIY	124	13841	245466	72836
DLM	203	23318	360456	113606
DNZ	109	10065	174616	51368
ERZ	60	7740	100595	28349
ESB	447	12922	723841	297734
EZS	109	8607	162830	48857
GNY	85	15502	184867	45629
GZT	185	18059	319668	96127
HTY	115	14441	212822	60069
IST	2795	576664	9159793	2743847
KCM	92	10522	119919	29142
KSY	21	2036	36672	11943
KYA	125	18485	306706	90276
MLX	119	10873	208314	64006
MSR	80	4761	119811	39232
MZH	14	2091	25076	6533
NAV	104	12586	181777	49750
SIC	22	192	24216	9004
SZF	141	12638	272904	83939
TZX	195	21309	361200	109219
VAN	97	5291	143888	48502
VAS	30	4829	55081	13745

Tüm verilerin uçak tipi ve havaalanına göre taksi-in süre ve yakıt tüketim dağılımları Boeing ve Airbus uçakları için uçuş düzenlenen havaalanları bazında Çizelge 4.3’de verilmiştir. Uçak tiplerine ait veri sayısı, taksi-in ve yakıt tüketimlerine ait standart sapma değerleri de bu çizelgede verilmiştir. Taksi-in süreleri ve yakıt tüketimleri hesaplanırken toplam 5983 veri kullanılmıştır.

Çizelge 4.3. Meydanların belirlenen taxi-in süreleri ve ortalama yakıt tüketimleri

Havaalanı	Uçak Tipi	Veri Sayısı	Süre (dk)		Yakıt Tüketimi (kg)	
			Ort.	Std. Sapma	Ort.	Std. Sapma
ADA	A320	91	4.8	1.03	74.6	35
	B738	93	4.5	0.79	57.3	16
ADB	A320	132	4.9	0.99	74.3	31
	B738	131	4.8	1.17	58.7	22
ADF	A320	7	3.8	0.47	56.0	12
	B738	-	-	-	-	-
ASR	A320	154	3.7	1.21	56.2	44
	B738	26	3.6	1.79	44.6	26
AJI	A320	5	3.2	0.96	44.2	13
	B738	-	-	-	-	-
AYT	A320	209	5.7	2.19	76.4	31
	B738	240	6.0	2.40	82.8	50
BAL	A320	6	4.7	0.89	66.1	13
	B738	-	-	-	-	-
BJV	A320	8	4.1	0.74	59.0	10
	B738	125	6.4	1.90	101.7	55
DIY	A320	74	5.1	1.58	74.1	33
	B738	14	4.8	1.64	56.8	21
DLM	A320	105	4.7	1.60	63.3	22
	B738	13	3.7	0.44	43.2	11
DNZ	A320	64	4.4	1.08	61.9	16
	B738	26	4.4	1.40	49.9	19
ERZ	A320	17	6.1	3.88	82.5	49
	B738	66	4.1	1.21	49.4	26
ESB	A320	218	6.4	1.77	86.0	25
	B738	278	6.6	2.10	92.7	42
EZS	A320	69	6.6	1.74	86.8	22
	B738	16	5.8	2.13	70.9	26
GNY	A320	13	4.3	1.67	61.2	27
	B738	60	3.5	0.71	41.3	14
GZT	A320	113	4.2	2.06	62.8	44
	B738	31	4.1	0.87	54.3	16
HTY	A320	21	4.2	1.61	64.1	21
	B738	82	3.8	1.00	48.8	19
IST	A320	1423	9.4	3.55	125.1	58
	B738	1266	8.9	3.36	132.7	78
KCM	A320	11	5.9	1.89	82.6	26
	B738	68	6.9	1.51	109.0	38
KSY	A320	12	4.5	1.39	75.4	25
	B738	9	4.3	1.29	53.5	17
KYA	A320	70	4.8	1.89	64.0	27
	B738	27	5.1	1.75	58.0	24
MLX	A320	78	7.7	2.12	96.8	28
	B738	11	7.1	2.22	86.1	31
MSR	A320	60	4.7	1.09	66.1	19
	B738	4	4.5	0.24	52.7	11
MZH	A320	4	8.9	1.54	120.0	26
	B738	10	9.6	2.77	128.3	52

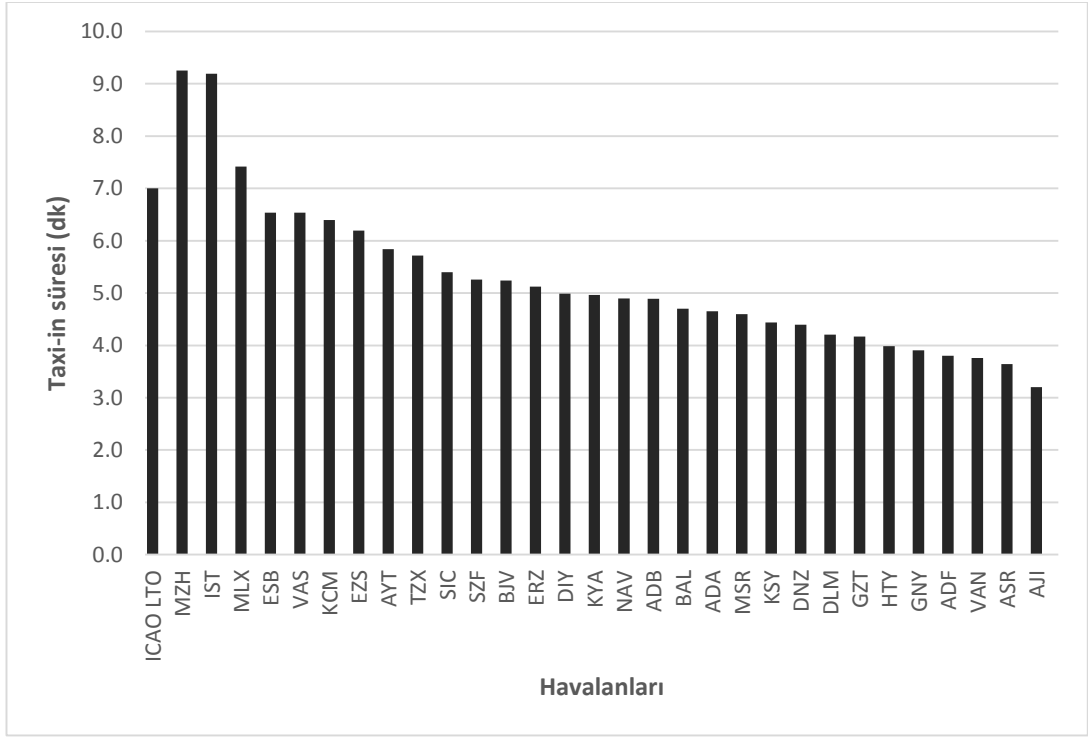
Çizelge 4.3. (Devam) Meydanların belirlenen taxi-in süreleri ve ortalama yakıt tüketimleri

NAV	A320	10	5.0	0.78	72.5	14
	B738	57	4.8	1.46	66.2	27
SIC	A320	40	5.4	1.27	80.2	17
	B738	-	-	-	-	-
SZF	A320	54	5.9	1.56	94.0	45
	B738	14	4.6	1.92	62.7	24
TZX	A320	54	6.0	1.17	97.2	24
	B738	84	5.5	1.23	78.8	23
VAN	A320	76	4.0	1.12	59.8	17
	B738	8	3.5	0.47	50.6	13
VAS	A320	7	6.3	1.53	93.7	26
	B738	14	6.8	1.06	93.2	27

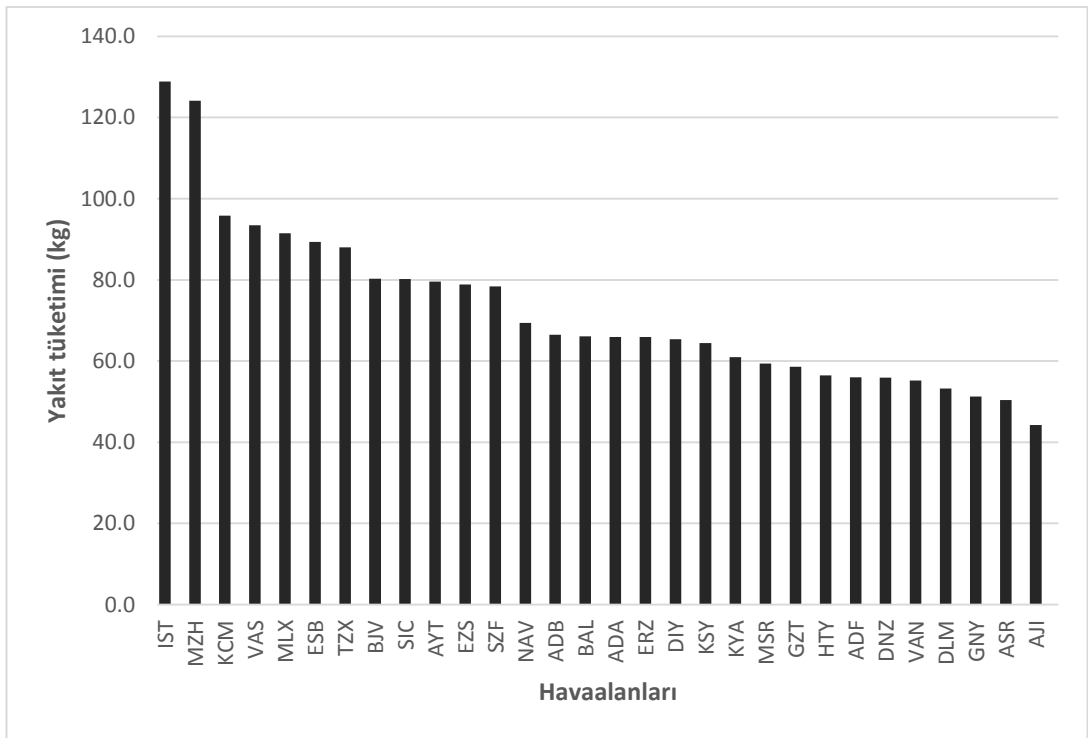
Şekil 4.4’de görüleceği üzere en uzun taxi-in süresine sahip havaalanları Amasya (9.3 dk), İstanbul Atatürk (9.2 dk) ve Malatya (7.4 dk) Havalimanlarıdır. Bu havaalanları için hesaplanan taxi-in safhası yakıt tüketimleri ise sırasıyla 124.1 kg, 128.9 kg ve 91.5 kg’dır (Şekil 4.5). Amasya, İstanbul ve Malatya havaalanları için hesaplanan taxi-in süreleri ICAO LTO taxi-in süresinin (7 dk) üzerindedir. En kısa taxi-in süresine sahip havaalanları ise Ağrı (3.2 dk), Kayseri (3.6 dk) ve Van (3.8 dk) Havalimanlarıdır. Bu havaalanlarına ait yakıt tüketimleri ise sırasıyla 44.2 kg, 50.4 kg ve 55.2 kg’dır.

Trafik yoğunluğu LTO döngüsü taxi-in sürelerini etkileyen faktörlerdendir. Daha önce verilen Şekil 4.3’da görüldüğü üzere en yoğun trafiğe sahip havaalanı olan İstanbul Atatürk Havalimanı’nın taxi-in süresi ICAO LTO taxi-out süresinin yaklaşık %30’u kadar yüksek çıkmıştır. Fakat, en az trafiğe sahip havaalanı olan Amasya Havaalanı en yüksek taxi-in süresine sahiptir.

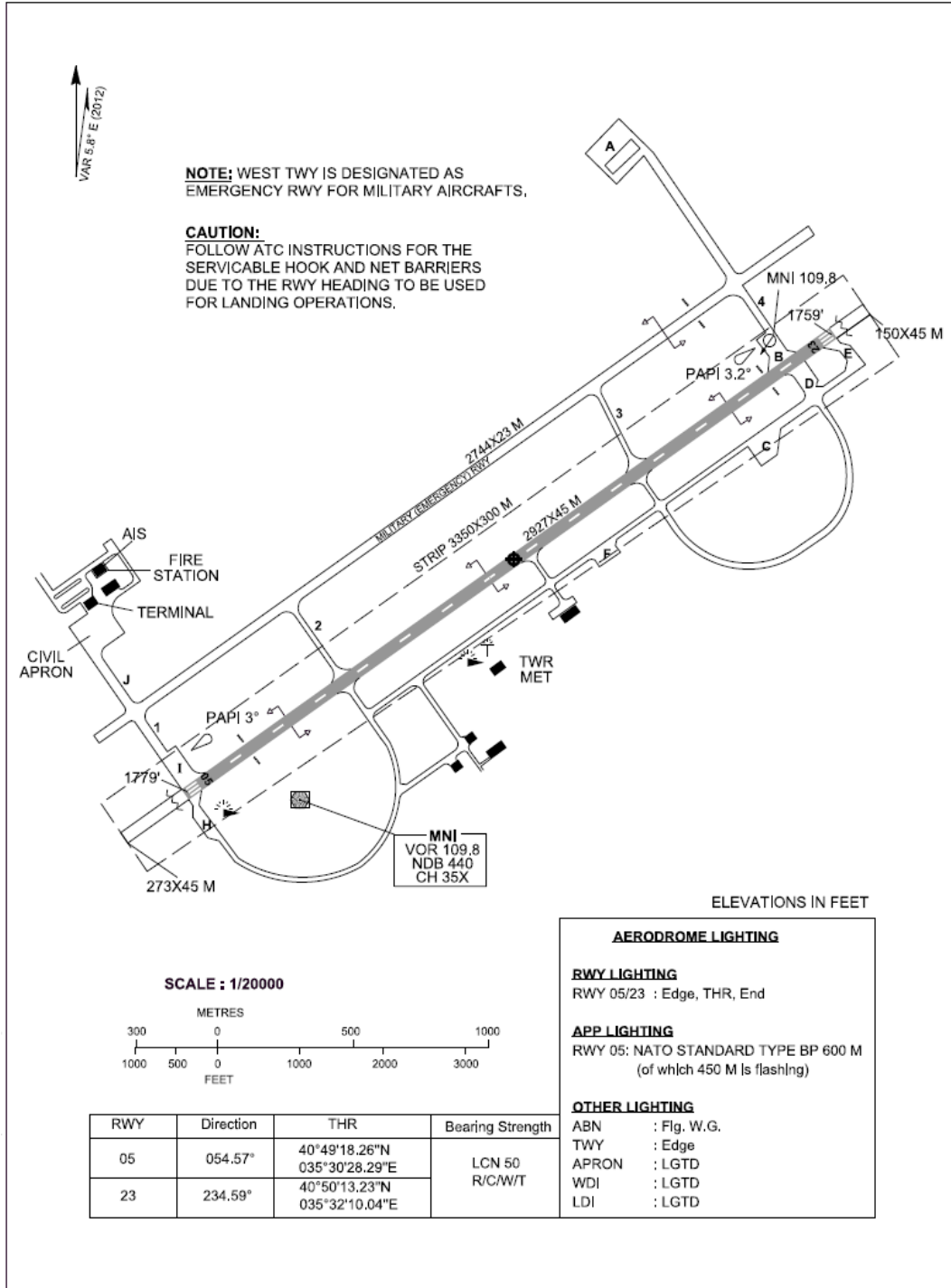
Amasya Havaalanı’nın meydan planı Şekil 4.6’da verilmiştir. Amasya Havaalanı 05-23 pist konfigürasyonuna sahiptir ve sivil apron ile terminal binası 05 pist başına yakın konumlandırılmıştır. 05 pistine iniş yapan uçak pist sonundan taxi yoluna girerek aprona gitmektedir. Bu da 05 pistine iniş yapan uçağın taxi-in süresinin fazla olmasına neden olmaktadır. Eldeki Amasya uçuşları tamamında iniş için 05 pistinin kullanıldığı görülmüştür. Sonuç olarak; trafik yoğunluğunun yanı sıra uçağın iniş yaptığı pist başı, park pozisyonuna giderken izlediği taxi yolu ve uçağın bulunduğu apron ve taxi yolları gibi havaalanı elemanlarının yerleşimi taxi-in sürelerini etkileyen önemli bir faktörler olduğu görülmüştür.



Şekil 4.4. Havaalanları ait taksi-in süreleri



Şekil 4.5. Havaalanları ait taksi-in safhasındaki yakıt tüketimleri



Şekil 4.6. Amasya Havaalanı plan görünümü [81]

Çalışılan havaalanları için taksi-in safhası ait sürelerinin bulunmasından sonra bu safhaya ait havaalanı bazında hesaplanan emisyon değerleri (HC, CO, NOx) aşağıdaki Çizelge 4.4'de verilmiştir. Çizelgede verilen emisyon değerleri

ilgili havaalanının veri sayısı ile hesaplanmıştır. Örneğin; Adana Havaalanı için 360 uçuşa ait HC emisyonu toplam 25 kg, CO emisyonu 394 kg, NO_x emisyonu 113 kg olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.4 Taksi-in safhasına ait emisyon değerleri

Havaalanı	Veri sayısı	Taksi-in Safhası		
		HC (kg)	CO (kg)	NO _x (kg)
ADA	360	25630	394546	113361
ADB	660	47984	739587	222603
ADF	9	278	7150	2283
ASR	185	8320	146750	46166
AJI	26	984	18437	5431
AYT	450	40860	594012	180929
BAL	23	1707	25441	6915
BJV	270	18111	291599	102103
DIY	124	7955	141072	41860
DLM	203	12242	189239	59643
DNZ	109	6327	109759	32288
ERZ	60	5560	72258	20363
ESB	447	9654	540801	222445
EZS	109	8085	152962	45896
GNY	85	7113	84821	20936
GZT	185	9980	176659	53123
HTY	115	7312	107758	30415
IST	2795	371001	5893014	1765272
KCM	92	13205	150487	36571
KSY	21	1106	19921	6488
KYA	125	8638	143321	42185
MLX	119	10185	195130	59955
MSR	80	3129	78733	25781
MZH	14	2664	31947	8322
NAV	104	8448	122014	33394
SIC	22	172	21754	8089
SZF	141	7699	166252	51135
TZX	195	14813	251078	75921
VAN	97	2832	77010	25959
VAS	30	4359	49726	12408

4.1.3 Tırmanma Safhası

LTO döngüsündeki tırmanma safhası güç kolunun arkaya çekildiği noktadan karışım yüksekliğine (genellikle 3000 feet) kadar olan gaz kolu ayarlarının mevcut olduğu süre olarak tanımlanmaktadır. ICAO LTO döngüsündeki tırmanma safhasına ait süre 2 dakika 18 saniye olarak belirlenmişken Çizelge 4.5’de de gösterildiği üzere bütün havalimanları için yapılan hesaplamalarda da B738 uçak tipi için tırmanma süresi 1-1.3 dk arasında, A320 tipi için ise 0.9-1.5 dk arasında değişmektedir. Daha önceden de belirtildiği üzere bu tez kapsamında sadece B738 ve A320 uçak tiplerine ait verileri kullanılmıştır. ICAO, LTO safha sürelerini belirlerken bütün uçak kategorilerine ait verileri kullanmıştır. Farklı uçak kategorisindeki uçak tiplerinin farklı tırmanma oranları sahip olduğu ve tırmanma safhasındaki söz konusu olan ciddi farkın bu nedenle kaynaklandığı göz önünde bulundurulmalıdır. Bir başka deyişle LTO döngüsü içerisindeki tırmanma safhasının süresi belirlenirken dikkat edilmesi gereken kriter uçak tipidir.

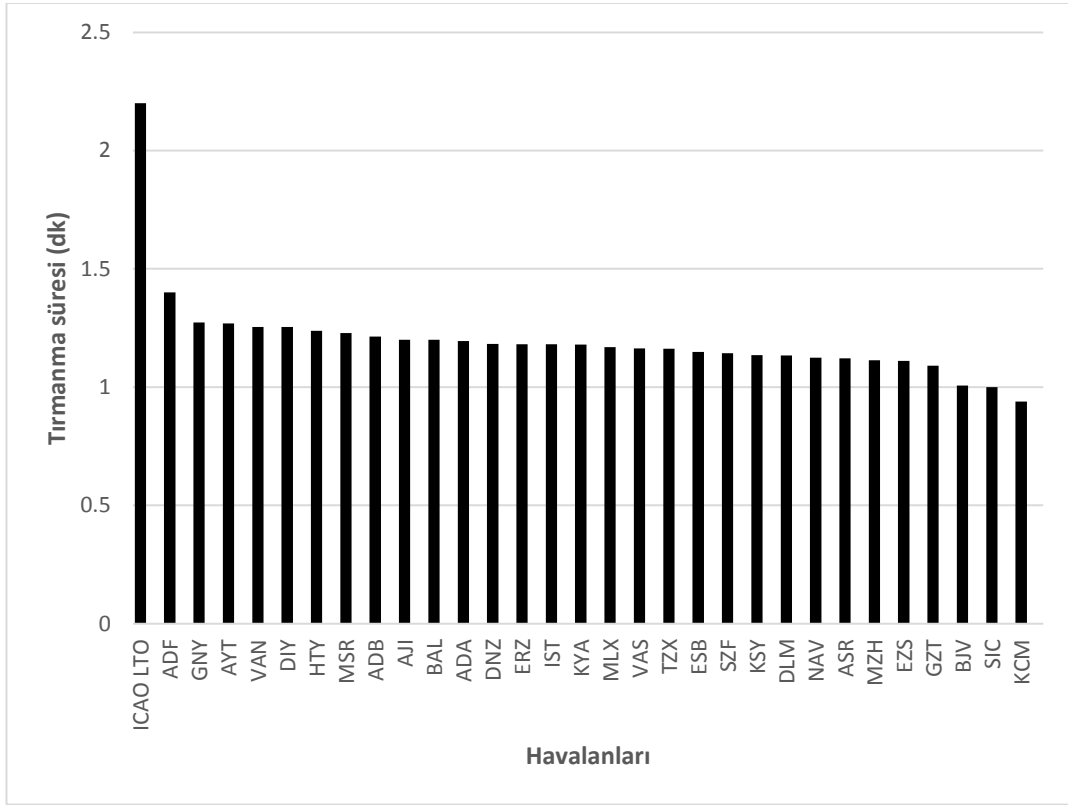
Her iki uçak tipi için hesaplanan sürelerin ortalamaları alınarak tespit edilen tırmanma süreleri bütün havaalanları için 0.9 ile 1.4 dakika arasında birbirlerine yakın olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.7). En yüksek tırmanma süresine sahip havaalanı 1.4 dakika ile Adıyaman Havaalanı’dır. En düşük tırmanma süresine sahip havaalanı ise 0.9 dakika ile Kahramanmaraş Havaalanı’dır. Şekil 4.8’de verilen tırmanma safhası yakıt tüketimleri verilmiştir. Buna göre tırmanma safhası için en yüksek yakıt tüketime sahip havaalanları 125.9 kg ile Muş ve Van Havaalanlarıdır. En düşük tırmanma safhası yakıt tüketimi ise 87.5 kg ile Ağrı Havaalanı ve 87.8 kg ile Sinop Havaalanı’dır.

Çizelge 4.5. Havaalanlarının belirlenen tırmanma süreleri ve ortalama yakıt tüketimleri

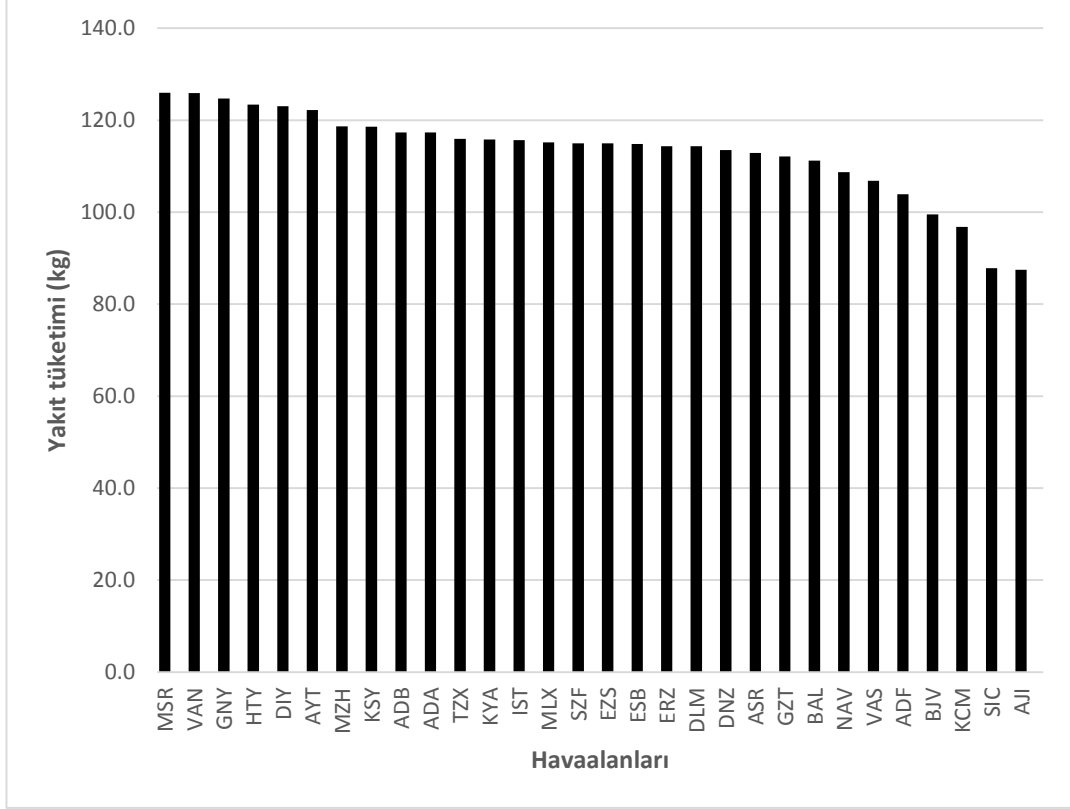
Havaalanı	Uçak Tipi	Veri Sayısı	Süre (dk)		Yakıt Tüketimi (kg)	
			Ort.	Std. Sapma	Ort.	Std. Sapma
ADA	A320	89	1.2	0.12	96.6	24.64
	B738	90	1.2	0.14	138.1	12.73
ADB	A320	131	1.2	0.18	100.2	25.99
	B738	141	1.2	0.15	134.5	12.94
ADF	A320	7	1.3	0.11	103.9	16.43
	B738	-	-	-	-	-
ASR	A320	57	1.1	0.10	101.2	21.85
	B738	28	1.1	0.09	124.5	9.24
AJI	A320	5	1.2	0.07	87.5	26.04
	B738	-	-	-	-	-
AYT	A320	200	1.2	0.18	102.7	27.13
	B738	216	1.3	0.19	141.7	14.78
BAL	A320	6	1.2	0.16	111.2	19.21
	B738	-	-	-	-	-
BJV	A320	8	0.9	0.31	77.0	28.36
	B738	23	1.1	0.14	122.1	9.84
DIY	A320	50	1.4	0.21	117.0	31.85
	B738	14	1.2	0.15	129.1	13.06
DLM	A320	18	1.1	0.16	99.5	25.47
	B738	14	1.2	0.18	129.1	13.26
DNZ	A320	61	1.2	0.16	101.2	22.72
	B738	26	1.2	0.14	125.8	9.84
ERZ	A320	14	1.2	0.11	104.2	18.53
	B738	53	1.2	0.17	124.5	15.98
ESB	A320	213	1.2	0.14	101.3	23.84
	B738	196	1.1	0.15	128.3	12.88
EZS	A320	45	1.2	0.17	102.9	23.83
	B738	14	1.0	0.07	127.0	6.70
GNY	A320	14	1.3	0.14	118.5	26.46
	B738	62	1.2	0.11	131.0	9.80
GZT	A320	42	1.1	0.12	93.8	21.39
	B738	30	1.1	0.08	130.4	9.05
HTY	A320	20	1.2	0.10	107.1	21.40
	B738	44	1.3	0.14	139.7	11.22
IST	A320	1703	1.2	0.18	99.6	23.70
	B738	1575	1.2	0.16	131.7	13.72
KCM	A320	9	0.9	0.06	72.8	22.34
	B738	56	1.0	0.06	120.8	8.95
KSY	A320	13	1.1	0.31	103.2	33.86
	B738	7	1.2	0.09	133.9	12.40
KYA	A320	65	1.2	0.18	108.6	21.79
	B738	27	1.1	0.17	122.9	15.52
MLX	A320	39	1.2	0.19	106.3	21.04
	B738	11	1.1	0.08	124.0	9.52
MSR	A320	56	1.3	0.19	113.8	24.52
	B738	4	1.2	0.17	138.1	17.18
MZH	A320	3	1.2	0.16	120.4	9.78
	B738	10	1.0	0.12	117.0	10.60

Çizelge 4.5. (Devam) Havaalanlarının belirlenen tırmanma süreleri ve ortalama yakıt tüketimleri

NAV	A320	10	1.1	0.13	87.7	12.13
	B738	68	1.2	0.12	129.8	12.68
SIC	A320	81	1.0	0.10	87.8	19.92
	B738	-	-	-	-	-
SZF	A320	52	1.2	0.14	102.5	25.35
	B738	14	1.1	0.11	127.5	11.15
TZX	A320	26	1.2	0.20	95.8	24.68
	B738	52	1.2	0.17	136.0	14.04
VAN	A320	42	1.5	0.17	124.9	29.98
	B738	9	1.1	0.08	127.0	5.18
VAS	A320	7	1.2	0.25	92.9	23.40
	B738	14	1.1	0.09	120.7	9.36



Şekil 4.7. Havaalanlarına ait tırmanma süreleri



Şekil 4.8. Havaalanlarına ait tırmanma safhasındaki yakıt tüketimleri

Çalışılan havaalanları için tırmanma safhası ait sürelerinin bulunmasından sonra bu safhaya ait havaalanı bazında hesaplanan emisyon değerleri (HC, CO, NOx) aşağıdaki Çizelge 4.6’da verilmiştir.

4.1.4 Kalkış Safhası

Kalkış için frenlerin serbest bırakıldığı andan ana motor güç kolunun arkaya çekildiği ana kadar olan ortalama gaz kolu ayarlarının mevcut olduğu süreyi kapsamaktadır. ICAO LTO döngüsündeki kalkış safhasının süresi 42 sn olarak belirlenmiştir. Tüm verilerin uçak tipi ve havaalanına göre taksi-in süre ve yakıt tüketim dağılımları Boeing ve Airbus uçakları için uçuş düzenlenen havaalanları bazında Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.6. Tırmanma safhasına ait emisyon değerleri

Havaalanı	Veri sayısı	Tırmanma Safhası		
		HC (kg)	CO (kg)	NOx (kg)
ADA	360	3433	28097	1123989
ADB	660	6463	52660	2178432
ADF	9	68	768	26673
ASR	185	1532	13592	545612
AJI	26	207	2046	70924
AYT	450	5056	39569	1662388
BAL	23	207	1809	62699
BJV	270	2270	18944	825482
DIY	124	1165	10517	403246
DLM	203	1842	15129	633363
DNZ	109	960	8555	325145
ERZ	60	646	4884	190630
ESB	447	2555	32508	1475162
EZS	109	832	7766	298296
GNY	85	1032	7241	271348
GZT	185	1482	13196	530200
HTY	115	1119	9174	341643
IST	2795	24896	216387	8870749
KCM	92	783	5517	195907
KSY	21	180	1586	62055
KYA	125	1140	9861	380175
MLX	119	969	9378	350318
MSR	80	592	6230	244623
MZH	14	145	1046	37528
NAV	104	954	7527	284226
SIC	22	96	1444	50413
SZF	141	983	9883	386579
TZX	195	1789	15469	612749
VAN	97	759	8272	318989
VAS	30	356	2419	90628

Çizelge 4.7. Havaalanlarının belirlenen kalkış süreleri ve ortalama yakıt tüketimleri

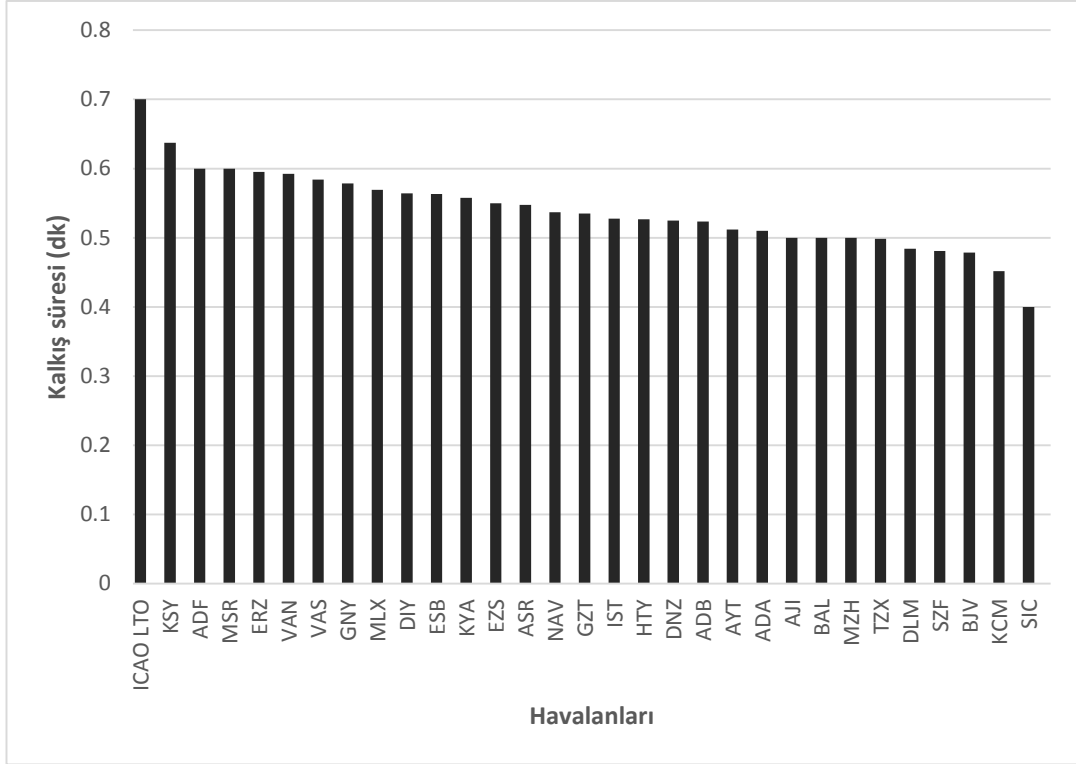
Havaalanı	Uçak Tipi	Veri Sayısı	Süre (dk)		Yakıt Tüketimi (kg)	
			Ort.	Std. Sapma	Ort.	Std. Sapma
ADA	A320	89	0.5	0.05	41.2	11.87
	B738	89	0.5	0.05	62.2	4.92
ADB	A320	130	0.5	0.07	42.1	11.62
	B738	141	0.6	0.07	61.8	6.55
ADF	A320	7	0.6	0.01	48.5	5.96
	B738	-	-	-	-	-
ASR	A320	57	0.6	0.04	50.3	9.91
	B738	28	0.5	0.04	61.7	5.51
AJI	A320	5	0.5	0.07	39.5	10.74
	B738	-	-	-	-	-
AYT	A320	200	0.5	0.06	40.4	10.35
	B738	216	0.5	0.07	61.5	7.00
BAL	A320	6	0.5	0.05	51.5	7.38
	B738	-	-	-	-	-
BJV	A320	7	0.5	0.05	39	9.18
	B738	23	0.5	0.05	55.6	3.37
DIY	A320	48	0.6	0.06	51.9	14.03
	B738	14	0.5	0.05	60.8	5.56
DLM	A320	18	0.5	0.06	41.5	8.04
	B738	14	0.5	0.06	57.8	5.42
DNZ	A320	60	0.5	0.05	44.2	10.27
	B738	26	0.5	0.06	58.2	5.66
ERZ	A320	13	0.6	0.12	53.6	14.53
	B738	53	0.6	0.06	62.5	7.71
ESB	A320	211	0.6	0.08	51.4	12.79
	B738	194	0.6	0.05	62.4	5.90
EZS	A320	45	0.6	0.05	51.3	12.23
	B738	14	0.5	0.05	65.5	6.88
GNY	A320	14	0.6	0.06	53.9	13.70
	B738	62	0.6	0.06	61.7	7.38
GZT	A320	42	0.5	0.04	47.7	13.88
	B738	30	0.5	0.04	64.8	5.58
HTY	A320	19	0.5	0.04	45.4	8.66
	B738	43	0.6	0.05	62.4	5.04
IST	A320	1691	0.5	0.07	44.8	11.55
	B738	1569	0.5	0.07	61.5	6.99
KCM	A320	9	0.5	0.02	37	11.45
	B738	56	0.4	0.04	56.3	6.44
KSY	A320	13	0.6	0.06	61.9	10.18
	B738	7	0.6	0.04	73.3	3.45
KYA	A320	64	0.6	0.07	50.9	9.59
	B738	26	0.6	0.07	60.3	7.69
MLX	A320	39	0.6	0.07	56.1	9.92
	B738	11	0.5	0.04	58.9	7.49
MSR	A320	56	0.6	0.05	58.5	10.89
	B738	-	-	-	-	-
MZH	A320	-	-	-	-	-
	B738	10	0.5	0.04	54.8	5.33

Çizelge 4.7. (Devam) Havaalanlarının belirlenen kalkış süreleri ve ortalama yakıt tüketimleri

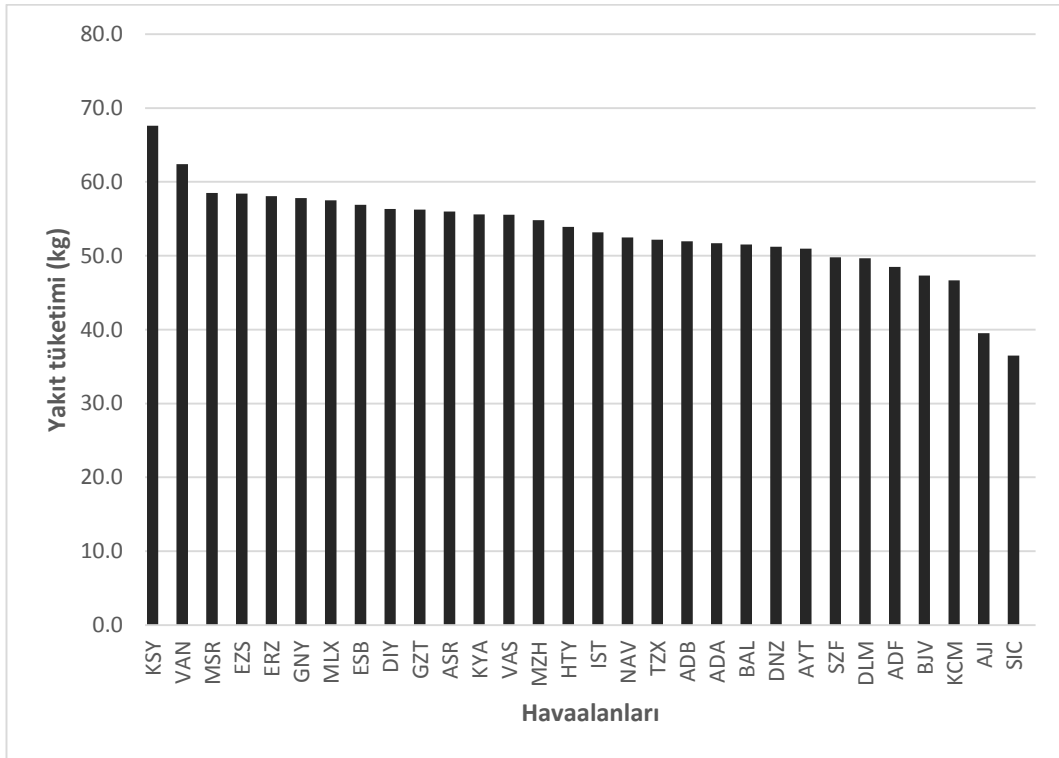
NAV	A320	10	0.5	0.06	41.7	9.27
	B738	68	0.6	0.06	63.2	8.18
SIC	A320	76	0.4	0.03	36.5	8.54
	B738	-	-	-	-	-
SZF	A320	52	0.5	0.05	42.9	10.45
	B738	14	0.5	0.05	56.7	4.94
TZX	A320	26	0.5	0.05	40.8	12.15
	B738	52	0.5	0.04	63.5	4.33
VAN	A320	42	0.6	0.03	54.5	13.27
	B738	9	0.6	0.03	70.3	3.21
VAS	A320	7	0.6	0.05	47.8	14.51
	B738	13	0.6	0.05	63.3	7.01

Şekil 4.9’da da görüleceği üzere havalimanları arasında her iki uçak tipinin ortalaması alınarak hesaplanan kalkış süreleri anlamında büyük bir farklılık bulunmamaktadır. Toplam 12 havaalanı için LTO kalkış süresi 0.6 dk, 17 havaalanı için ise 0.5 dk olarak hesaplanmıştır. Sadece Sinop Havaalanı için bu değer 0.4 dk olarak belirlenmiştir. Kalkış safhasında havaalanı bazında gerçekleşen yakıt tüketimleri Şekil 4.10’da verilmiştir. Yakıt tüketimlerinde uçak tipi tipine bağlı olarak havaalanı bazında farklılık bulunmaktadır. Fakat her iki uçak tipinin ortalaması alınarak hesaplanan yakıt tüketimleri açısından havaalanları arasında fazla bir farklılık söz konusu değildir.

Çalışılan havaalanları için kalkış safhası ait sürelerinin bulunmasından sonra bu safhaya ait havaalanı bazında hesaplanan emisyon değerleri (HC, CO, NOx) aşağıdaki Çizelge 4.8’da verilmiştir.



Şekil 4.9. Havaalanlarına ait kalkış süreleri



Şekil 4.10. Havaalanlarına ait kalkış safhasındaki yakıt tüketimleri

Çizelge 4.8. Kalkış safhasına ait emisyon değerleri

Havaalanı	Veri sayısı	Kalkış Safhası		
		HC (kg)	CO (kg)	NOx (kg)
ADA	360	1757	8839	710552
ADB	660	3329	16458	1389379
ADF	9	38	347	17778
ASR	185	859	4994	375301
AJI	26	104	812	42916
AYT	450	2412	10814	986766
BAL	23	104	696	38147
BJV	270	1423	7319	640691
DIY	124	656	4003	277691
DLM	203	1039	5259	442382
DNZ	109	488	2885	201955
ERZ	60	397	1811	145373
ESB	447	1783	18567	1219072
EZS	109	553	3556	241886
GNV	85	580	2303	189932
GZT	185	827	4874	363431
HTY	115	568	2976	213093
IST	2795	12866	83030	5585664
KCM	92	528	2321	163171
KSY	21	121	654	51093
KYA	125	696	3890	285156
MLX	119	590	4253	258111
MSR	80	363	2764	181395
MZH	14	80	332	25722
NAV	104	528	2428	194724
SIC	22	46	594	28829
SZF	141	546	4031	260641
TZX	195	915	4987	385891
VAN	97	428	3463	217305
VAS	30	217	783	69067

4.1.5 Yaklaşma Safhası

Karışım yüksekliğinden (bu çalışmada 3000 feet olarak kabul edilmiştir.) pist üzerinde inişini gerçekleştirdiği ana kadar olan ortalama gaz kolu ayarlarının mevcut olduğu süreyi kapsamaktadır. ICAO LTO döngüsündeki yaklaşma safhasının süresi 4 dakika olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.9’da her bir havaalanı ve A320 ve B738 için ayrı ayrı hesaplanmış yaklaşma safhası süreleri ve yakıt tüketimleri verilmiştir. Bütün havaalanları için yaklaşma sürelerinin belirlenmesinde toplam 5961 veri kullanılmıştır.

Çizelge 4.9. Havaalanlarının belirlenen yaklaşma süreleri ve ortalama yakıt tüketimleri

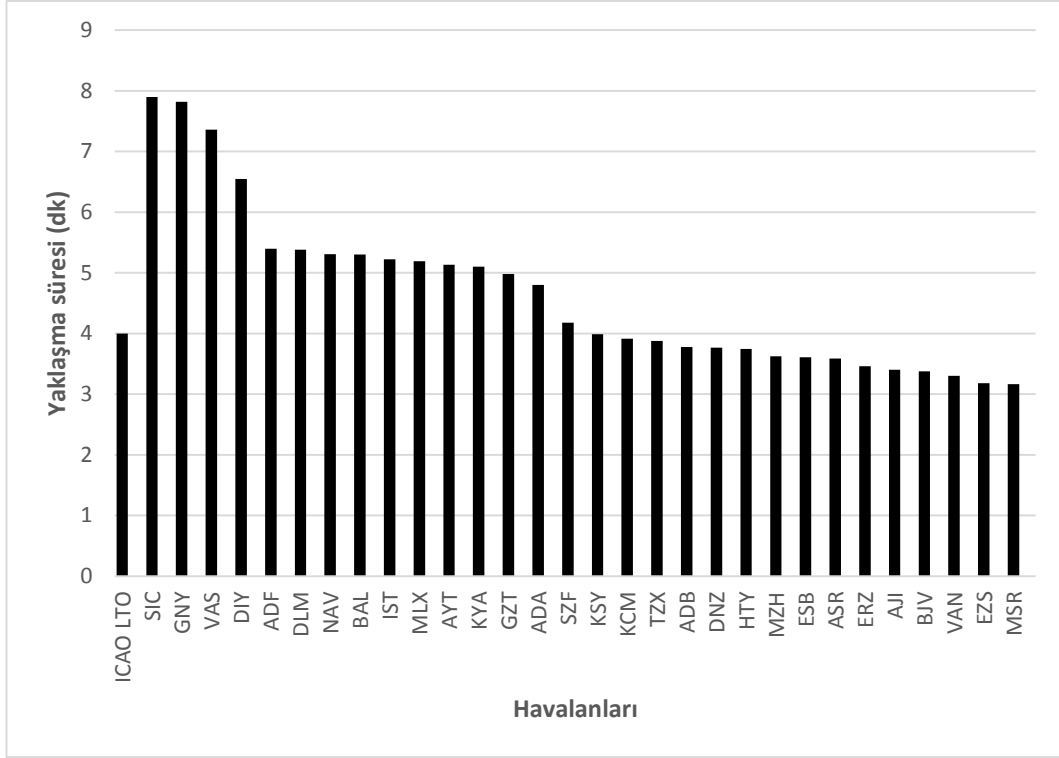
Havaalanı	Uçak Tipi	Veri Sayısı	Süre (dk)		Yakıt Tüketimi (kg)	
			Ort.	Std. Sapma	Ort.	Std. Sapma
ADA	A320	91	5.0	1.24	148.7	47.76
	B738	93	4.6	0.93	147.0	38.97
ADB	A320	132	3.8	0.54	111.2	34.12
	B738	132	3.8	0.34	111.6	21.87
ADF	A320	7	5.4	1.13	173.9	56.72
	B738	-	-	-	-	-
ASR	A320	146	3.7	0.36	105.6	20.76
	B738	26	3.5	0.14	103.4	17.40
AJI	A320	5	3.4	0.98	82.2	34.70
	B738	-	-	-	-	-
AYT	A320	209	5.4	1.22	170.2	54.17
	B738	240	4.9	1.19	147.1	48.80
BAL	A320	6	5.3	0.68	163.2	27.08
	B738	-	-	-	-	-
BJV	A320	8	3.6	0.27	95.5	16.98
	B738	125	3.1	0.24	87.5	
DIY	A320	74	6.8	1.83	227.8	95.64
	B738	14	6.3	1.74	207.5	60.69
DLM	A320	105	4.9	1.35	154.9	55.65
	B738	13	5.8	1.39	191.0	59.18
DNZ	A320	64	3.9	0.97	104.9	44.53
	B738	26	3.7	0.60	110.7	31.70
ERZ	A320	17	3.4	0.26	109.2	24.76
	B738	66	3.5	0.56	98.2	27.14
ESB	A320	218	3.6	0.45	105.5	27.36
	B738	278	3.6	0.25	105.9	19.28
EZS	A320	69	3.3	0.20	88.9	14.24
	B738	16	3.1	0.19	88.0	21.37
GNY	A320	13	7.9	2.74	248.8	106.34
	B738	60	7.7	3.16	243.6	111.53
GZT	A320	113	5.4	0.73	164.1	35.12
	B738	31	4.6	1.04	143.5	43.34
HTY	A320	21	3.7	0.21	101.7	15.06
	B738	82	3.7	0.39	112.4	21.96
IST	A320	1427	5.3	1.61	165.8	66.41
	B738	1281	5.1	1.55	160.3	62.00
KCM	A320	11	3.9	0.83	103.6	35.27
	B738	68	3.9	1.12	125.7	50.02
KSY	A320	12	3.7	1.21	99.9	45.68
	B738	9	4.3	1.72	144.5	92.16
KYA	A320	64	5.2	0.98	158.2	43.09
	B738	27	5.0	1.10	152.5	44.86
MLX	A320	78	5.2	1.03	158.5	49.60
	B738	11	5.1	1.03	147.0	33.99
MSR	A320	61	3.2	0.28	84.5	18.98
	B738	4	3.2	0.06	102.6	11.78
MZH	A320	4	3.5	0.42	98.9	26.79
	B738	9	3.7	0.28	109.1	17.02

Çizelge 4.9. (Devam) Havaalanlarının belirlenen yaklaşma süreleri ve ortalama yakıt tüketimleri

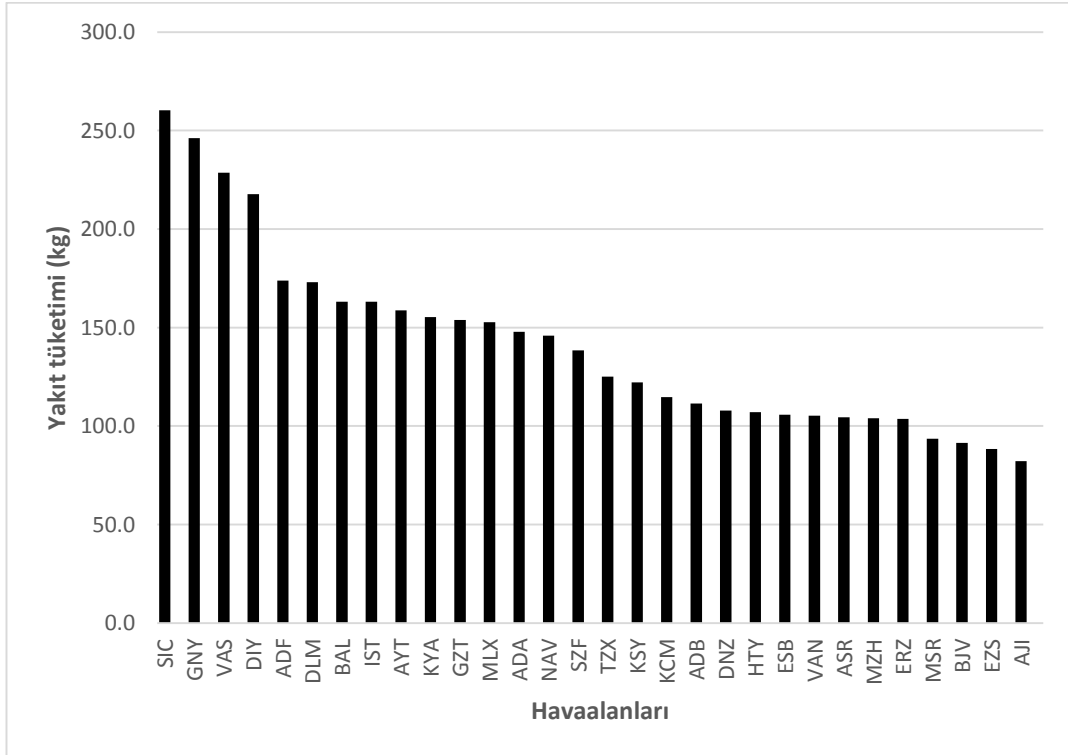
NAV	A320	10	5.3	1.41	133.4	52.91
	B738	57	5.4	2.14	158.5	80.83
SIC	A320	40	7.9	1.65	260.3	74.33
	B738	-				
SZF	A320	54	4.0	0.88	127.0	45.93
	B738	14	4.4	1.23	150.0	61.39
TZX	A320	27	4.2	1.52	134.8	78.39
	B738	84	3.6	0.88	115.3	45.02
VAN	A320	75	3.4	0.82	102.7	42.16
	B738	8	3.2	0.19	108.0	20.23
VAS	A320	7	7.7	0.83	240.6	37.26
	B738	14	7.0	2.21	216.6	77.33

Her iki uçak tipinin ortalamaları alınarak yapılan hesaplamalar sonucunda en yüksek yaklaşma süresine sahip havaalanları Sinop (7.9 dk), Şanlıurfa (7.8 dk) ve Sivas (7.4 dk) Havaalanları olarak belirlenmiştir. En düşük yaklaşma süresine sahip havaalanları ise Muş (3.2 dk), Elazığ (3.2 dk) ve Van (3.3 dk) Havaalanları'dır. Adana, Antalya, İstanbul, Diyarbakır, Malatya, Nevşehir ve Batman Havaalanları için hesaplanan yaklaşma süreleri ICAO'nun belirlediği 4 dakikalık yaklaşma süresinin üzerinde bulunmuştur (Şekil 4.11). Ayrıca Şekil 4.12'de havaalanlarına ait her iki uçak tipi için yaklaşma safhasında gerçekleşen ortalama yakıt tüketimleri verilmiştir. Buna göre en fazla yaklaşma safhası süresine sahip havaalanlarına ait yakıt tüketim değerleri de diğer havaalanlarına kıyasla daha fazla bulunmuştur.

En yüksek ve en düşük yaklaşma sürelerine sahip havaalanları arasındaki fark oldukça büyüktür. Bu nedenle yüksek yaklaşma süreleri sahip havaalanları için bu sürelerin nedenlerinin özellikle incelenmesi gerekmektedir.



Şekil 4.11. Havaalanlarına ait yaklaşma süreleri



Şekil 4.12. Havaalanlarına ait yaklaşma safhasındaki yakıt tüketimleri

Sinop Havaalanı LTO yaklaşma safha süresinin belirlenmesi için kullanılan 40 uçuş verisi incelendiğinde 35 uçuşun inişini 23 pistine gerçekleştirdiği görülmektedir. Sinop Havaalanı yaklaşma planları incelendiğinde 23 pistine direkt yaklaşma planlarının olduğu, 05 pisti için ilan edilmiş bir yaklaşma planının bulunmadığı 05 pistine inişlerin 23 pistine yapılan yaklaşmanın devamında türlü yaklaşma (circling/visual manoeuvring) ile gerçekleştirildiği görülmektedir. Şekil 4.13'de Sinop Havaalanının aletli yaklaşma planı verilmiştir.

Sinop Havaalanı 23 pisti NDB/DME yaklaşma planı incelendiğinde minimum bekleme irtifası 3000 feet olan sola dönüş bir bekleme paterninin mevcut olduğu görülmektedir. İnişe gelen uçak ilk olarak NDB üzerinde 3000 feette beklemeye girmektedir. Beklemeyi 3000 ft'de terk eden uçak 45°/180° Prosedür Dönüşü manevrası ile alçalmakta ve 23 pistini karşılayacak konuma gelmektedir. Bu manevrada uçak 6 NM dönüş noktasına ilerleyerek 2000 ft'e alçalmakta daha sonra 45°/180° dönüşünü gerçekleştirerek, 230° baş ile 23 pistini karşıladığı son yaklaşma fiksine gelmektedir. Bu fiksten itibaren de pist başına kadar alçalmasına devam etmektedir.

Bu manevra neticesinde uçakların 3000 ft'de bekleme paternini terk etmelerinden itibaren 23 pistine inecek uçaklar için yaklaşık 7 dk, aynı yaklaşmayı uygulayarak 05 pistine türlü yaklaşma ile inecekler için 10 dk sürmektedir. LTO döngü yaklaşma safhasının 3000 feet ile piste teker konulduğu ana kadar olduğu göz önünde tutulduğunda Sinop Havaalanı için seyrüsefer yardımcısının piste olan konumu ve ilan edilen yaklaşma prosedürleri yaklaşma süresinin yüksek çıkmasında belirleyici olduğu görülmektedir. Bu analiz, yaklaşma safha süresi ICAO LTO döngüsünden fazla çıkan diğer havaalanları için de gerçekleştirilmiş ve benzer durumlar olduğu görülmüştür.

AD 2 LTCM IAC- 2
30 JUL 09

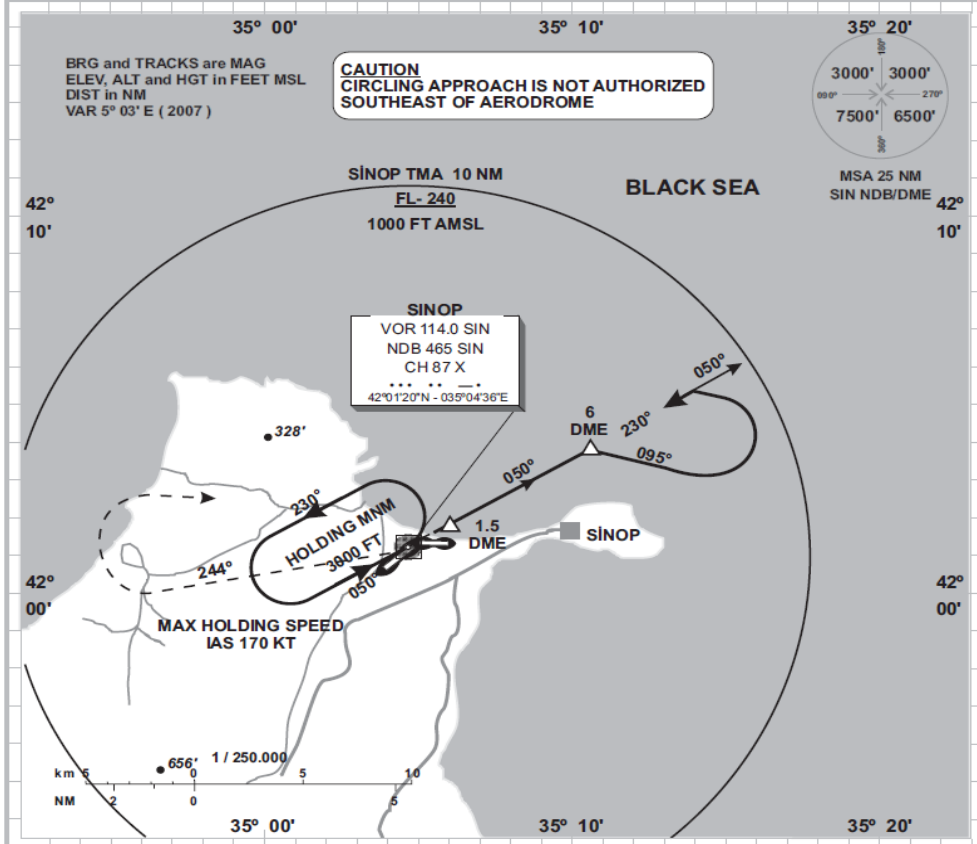
AIP
TURKEY

SINOP

INSTRUMENT
APPROACH
CHART - ICAO

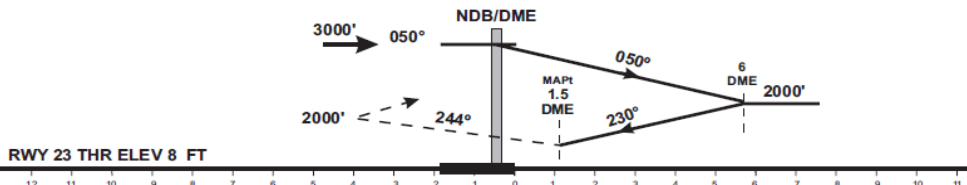
NDB/DME RWY 23 ELEV 24 FT

APP : 126.3 - 279.025
TWR : 126.3 - 279.025



TRANSITION ALT 10000 FT

MISSED APPROACH
CLIMB TO 2000 FT ON HDG 244° OF SIN NDB/DME
THEN RIGHT CLIMBING TO 3000 FT PROCEED TO
SIN NDB/DME AND HOLD



OCA (H)	A	B	C	D
Straight-in approach		500' (492')		
Circling	900' (876')		1150' (1126')	

AIRAC AMDT 06/09

DHMI - TURKEY

Şekil 4.13. Sinop Havaalanı 23 pisti NDB/DME aletli yaklaşma planı [81]

Çalışılan havaalanları için yaklaşma safhası ait sürelerinin bulunmasından sonra bu safhaya ait havaalanı bazında hesaplanan emisyon değerleri (HC, CO, NOx) aşağıdaki Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.10. Yaklaşma safhasına ait emisyon değerleri

Havaalanı	Veri sayısı	Yaklaşma Safhası		
		HC (kg)	CO (kg)	NOx (kg)
ADA	360	5405	139609	690623
ADB	660	7935	198631	1041058
ADF	9	132	4427	17527
ASR	185	2021	54354	268768
AJI	26	255	7945	32195
AYT	450	7485	175349	980064
BAL	23	373	10798	44714
BJV	270	2907	68736	407132
DIY	124	2408	68257	310019
DLM	203	3467	85579	463246
DNZ	109	1249	34931	158716
ERZ	60	704	16494	86294
ESB	447	3942	139500	664496
EZS	109	1018	29888	132524
GNY	85	2293	52969	263520
GZT	185	2755	77309	365475
HTY	115	1352	35095	164902
IST	2795	43438	1232984	5803656
KCM	92	1251	29311	139381
KSY	21	260	6663	33717
KYA	125	1950	52941	248189
MLX	119	1781	54014	231126
MSR	80	703	22234	97112
MZH	14	176	3969	19889
NAV	104	1787	44596	216442
SIC	22	417	16213	61567
SZF	141	1647	52065	223674
TZX	195	2331	62085	303385
VAN	97	866	27960	120050
VAS	30	794	17112	89867

Gerçek uçuş verileri ile yapılan hesaplamalar neticesinde, belirlenen 30 havaalanı için oluşturulan LTO döngüsü ile ICAO tarafından belirlenen LTO döngüsü arasında tüm safhalar için emisyon hesaplamalarına ciddi olarak etki edecek farklılıklar bulunmuştur. Çizelge 4.11’de de görüleceği üzere taxi-out safhasında %59 ve tırmanma safhasında da %45’lik bir azalma söz konusudur.

Sadece yaklaşma safhasında ICAO LTO döngüsüne göre bir artış (%15) söz konusudur.

Çizelge 4.11. Operasyonel LTO ile ICAO LTO arasındaki farklılıklar

Safha	ICAO LTO (dk)	Operasyonel LTO (dk)	Fark
Kalkış (Take-off)	0.7	0.5	-29%
Tırmanma (Climb)	2.2	1.2	-45%
Taksi-in	7	5.2	-26%
Taksi-out	19	7.8	-59%
Yaklaşma (Approach)	4	4.6	15%

Yapılan çalışmalar sonucunda LTO döngüsündeki safha sürelerinin belirlenmesini etkileyecek kriterler tespit edilmeye çalışılmıştır. ICAO LTO döngüsünün belirlenmesinde motor ayarlarının uçak tipini, pilot prosedürlerini ya da atmosferik şartları hesaba katmadan gerçek uçuş ayarlarını gösterdiği varsayılmaktadır. Bunun sonucunda gerçek uçuş verileri ile yapılan operasyonel LTO ölçümleri standart olan LTO döngüsünden farklı çıkmaktadır. Özellikle sıcaklığa ve uçağın kalkış ağırlığı faktörleri kalkış için gerekli olan mesafeyi direkt olarak etkilediği için LTO döngüsündeki kalkış safhasının süresinde buna paralel olarak değişmektedir. Başka bir deyişle kalkış safhasının belirlenmesi sırasında uçak tipi ve meteorolojik şartlar dikkat edilmesi gerekli kriterlerdir. Taksi safhası süresinin belirlenmesinde ise meydan trafiği, kalkış ve iniş için kullanılacak pist başı ve buna bağlı olarak da izlenen taksi yolları önemli kriterlerdir.

Hesaplamalar sırasında dikkat edilmesi gerekli başka bir konu ise karışım yüksekliğidir. LTO döngüsü ile ilgili emisyon hesaplamaları yapılırken karışım yüksekliği genellikle yerden 3000 feet olarak belirlenir. Bununla birlikte havaalanından havaalanına ve dönemsel olarak karışım yüksekliği farklılık göstermektedir.

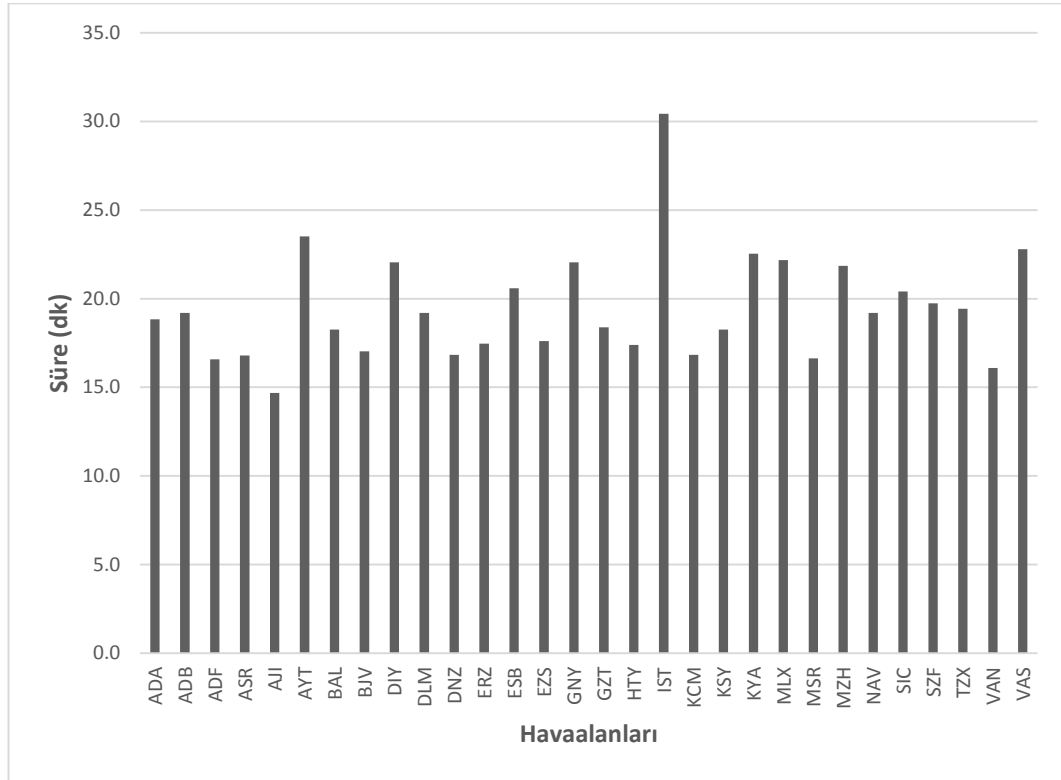
Havaalanı ve çevresindeki emisyonun hesaplanmasında daha kesin sonuç elde etmek amacıyla farklı havaalanları için ortalamalar alınarak tek bir LTO döngüsü belirlenmelidir [19]. Ayrıca söz konu havaalanları için her bir uçak kategorisine ait LTO safha süreleri de ayrı ayrı hesaplanmalıdır. Bu amaç doğrultusunda; daha önceden de belirtildiği üzere havaalanı civarında uçaklardan

kaynaklanan emisyon miktarının hesaplanması amacıyla her bir meydan için ayrı bir LTO süreleri bu çalışma kapsamında hesaplanmıştır. Bu anlamda; elde edilen verilerle tüm havaalanları için ayrı ayrı hesaplanan LTO döngüsü safha süreleri Çizelge 4.12’da verilmiştir.

Çizelge 4.12. “Medium” uçak kategorisi için belirlenen LTO safha süreleri

Meydan	LTO Safha Süreleri (dk)					LTO toplam süre (dk)
	Taxi-in	Taxi-out	Kalkış	Yaklaşma	Tırmanma	
ADA	4.7	7.7	0.5	4.8	1.2	18.8
ADB	4.9	8.8	0.5	3.8	1.2	19.2
ADF	3.8	5.5	0.6	5.4	1.3	16.6
ASR	3.6	7.9	0.5	3.6	1.1	16.8
AJI	3.2	6.4	0.5	3.4	1.2	14.7
AYT	5.8	10.8	0.5	5.1	1.3	23.5
BAL	4.7	6.5	0.5	5.3	1.2	18.3
BJV	5.2	6.9	0.5	3.4	1.0	17.0
DIY	5.0	8.7	0.6	6.5	1.3	22.0
DLM	4.2	8.0	0.5	5.4	1.1	19.2
DNZ	4.4	7.0	0.5	3.8	1.2	16.8
ERZ	5.1	7.1	0.6	3.5	1.2	17.5
ESB	6.5	8.7	0.6	3.6	1.1	20.6
EZS	6.2	6.6	0.6	3.2	1.1	17.6
GNV	3.9	8.5	0.6	7.8	1.3	22.0
GZT	4.2	7.6	0.5	5.0	1.1	18.4
HTY	4.0	7.9	0.5	3.7	1.2	17.4
IST	9.2	14.3	0.5	5.2	1.2	30.4
KCM	6.4	5.1	0.5	3.9	0.9	16.8
KSY	4.4	8.1	0.6	4.0	1.1	18.3
KYA	5.0	10.7	0.6	5.1	1.2	22.5
MLX	7.4	7.9	0.6	5.2	1.2	22.2
MSR	4.6	7.0	0.6	3.2	1.2	16.6
MZH	9.3	7.3	0.5	3.6	1.1	21.9
NAV	4.9	7.3	0.5	5.3	1.1	19.2
SIC	5.4	5.8	0.4	7.9	1.0	20.4
SZF	5.3	8.7	0.5	4.2	1.1	19.7
TZX	5.7	8.2	0.5	3.9	1.2	19.4
VAN	3.8	7.1	0.6	3.3	1.3	16.1
VAS	6.5	7.2	0.6	7.4	1.2	22.8

Şekil 4.14’de belirlenen havaalanları için hesaplanan LTO döngüsü toplam süreleri verilmiştir. Buna göre; en fazla LTO süresine sahip havaalanı 30.4 dakika ile İstanbul Atatürk Havaalanı’dır. İstanbul Atatürk Havaalanı için hesaplanan safha süreleri bakıldığında (Çizelge 4.12) özellikle taksi safhalarında diğer havaalanlarına kıyasla büyük farklılıklar olduğu görülmektedir. Bunun neticesinde toplam LTO süresinde de ciddi bir fark oluşmuştur.



Şekil 4.14. Havaalanları LTO döngüsü toplam süreleri

EUROCONTROL Gecikme Analizi Merkez Ofisi (CODA-Central Office for Delay Analysis) Avrupa’daki hava trafik gecikme durumlarını zamanında, tutarlı ve kapsamlı bir şekilde hava taşımacılığı sistemindeki politika yapıcılara sağlamak amacıyla çalışmalar yürütmektedir [82]. Bu amaç doğrultusunda CODA 2010 yılından itibaren yıllık olarak Avrupa’daki belirli havaalanları için taksi-in ve taksi-out sürelerini ayrı ayrı hem kış hem yaz sezonu olmak üzere yayımlamaktadır. Ayrıca taksi-out süreleri orta (medium) ve ağır (heavy) uçak tiplerine göre ayrı ayrı verilmektedir [83].

EUROCONTROL CODA'nın yayınladığı taksi süreleri ile bu tezde kullanılan verilerden hesaplanan taksi sürelerinin kıyaslamaları Çizelge 4.13'de gösterilmiştir. THY'den sadece B737 ve A320 uçak tiplerine ait verilerin temin edilmesi nedeniyle Çizelgede sadece “medium” uçak kategorisine ait veriler kıyaslanmıştır. Adıyaman (ADF) ve Şanlıurfa (GNY) Havaalanları için CODA tarafından belirlenen taksi-in ve taksi-out süreleri bulunmamaktadır. Ayrıca Muş Havaalanı (MZH) için de taksi-in süresi belirtilmemiştir.

Çizelge 4.13. CODA ile operasyonel taksi-in ve taksi-out süreleri kıyaslaması

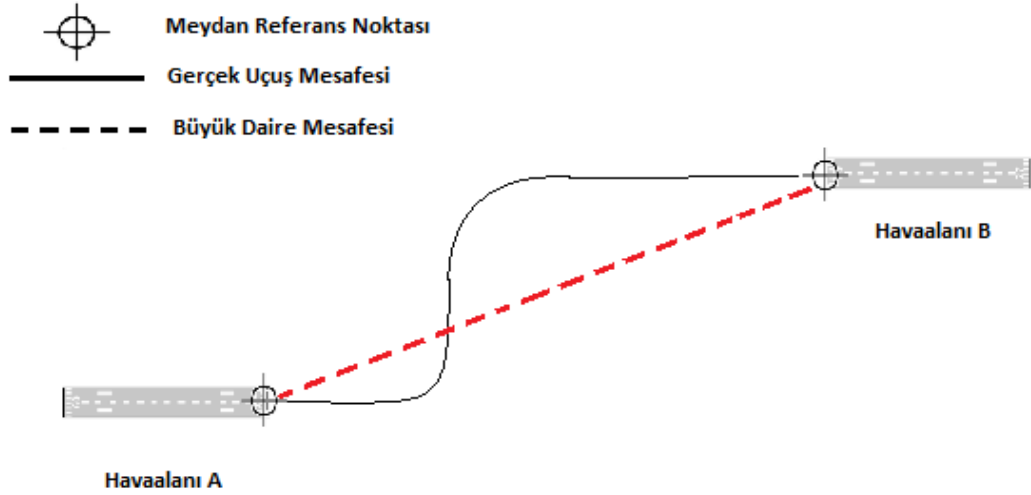
Havaalanı	Taksi-in (dk)	CODA Taksi-in (dk)	Taksi-out (dk)	CODA Taksi-out (dk)
ADA	4.7	5	7.7	10
ADB	4.9	5	8.8	12
ADF	3.8	-	5.5	-
ASR	3.6	5	7.9	12
AJI	3.2	5	6.4	7
AYT	5.8	6	10.8	16
BAL	4.7	6	6.5	9
BJV	5.2	6	6.9	10
DIY	5	5	8.7	12
DLM	4.2	5	8	12
DNZ	4.4	6	7	6
ERZ	5.1	6	7.1	11
ESB	6.5	6	8.7	12
EZS	6.2	8	6.6	9
GNY	3.9	-	8.5	-
GZT	4.2	5	7.6	10
HTY	4	5	7.9	10
IST	9.2	9	14.3	19
KCM	6.4	9	5.1	8
KSY	4.4	6	8.1	10
KYA	5	6	10.7	13
MLX	7.4	9	7.9	10
MSR	4.6	6	7	9
MZH	9.3	-	7.3	9
NAV	4.9	6	7.3	10
SIC	5.4	7	5.8	7
SZF	5.3	7	8.7	11
TZX	5.7	6	8.2	10
VAN	3.8	5	7.1	9
VAS	6.5	8	7.2	11

4.2. Yurt-içi Uçuşlar İçin Terminal ve Yol Safhasında Süre ve Yakıt Tüketim Analizleri

ATM uçuş verimliliği üzerine yapılan çalışmalarda verimliliğin uçuş süresi, uçuş mesafesi, yakıt tüketimi ve emisyonlara ait kazançlara bağlı olduğu bilinmektedir. Bu kapsamda terminal ve yol safhasındaki ATM uçuş verimsizliğinin belirlenmesinde uçuşlar yatay ve dikey olmak üzere iki boyutta incelenmiştir. Yatay boyutta yapılan analizlerde uçuş mesafesine ve buna bağlı ortaya çıkan yakıt tüketimleri esas alınmıştır. Dikey boyutta ise rota bazında oluşan düz uçuş periyotları belirlenmiştir.

4.2.1 Yurt içi uçuşlar için yatay verimsizlik analizleri

Yatay verimsizlik uçuşun gerçekleşmiş rotası ile optimal mesafesinin karşılaştırılması ile bulunmaktadır. Bu çalışmada optimal mesafe olarak adlandırılan gösterge, uçuşun ilk ve son coğrafik pozisyonları arasındaki direkt mesafeyi ifade etmektedir. Başka bir deyişle; bu optimal mesafe, ilk ve son noktalar arasındaki büyük daire mesafesi olarak tanımlanmaktadır. Bu noktalar ise çalışmada uçuşların kalkış ve inişlerini gerçekleştirdikleri meydanların referans noktaları olarak değerlendirilmiştir. Aynı şekilde; her bir uçuşun gerçek toplam uçuş mesafesi hesaplanırken ilk ve son uçuş noktaları kalkış ve iniş yapılan pist başları olarak belirlenmiştir. Özetle; gerçek toplam uçuş mesafesi, bir uçağın kalkış için pistten teker kestiği andan iniş pistine teker koyduğu ana kadar olan kısımda kat ettiği toplam mesafeyi yansıtmaktadır. Bu toplam mesafe, uçağın kalkış ya da iniş sırasında uyguladığı prosedürlerden kaynaklı mesafeleri (örn; hava trafik kontrol tarafından uygulanan vektör ya da bekleme gibi) ve uçağın meydanlar arasında izlediği yol mesafelerini kapsamaktadır (Şekil 4.15).



Şekil 4.15. İki meydan arasındaki büyük daire ve gerçek uçuş mesafe farkı

Yurt içi uçuşlardaki yatay uçuş verimsizliğinin bulunabilmesi amacıyla THY Uçuş Emniyet Müdürlüğü'nden elde edilen FDR verileri kullanılarak İstanbul Atatürk Havalimanı ile diğer meydanlar arasındaki 60 ve üzerinde uçuş kaydı olan veriler dikkate alınmıştır. Bu kapsamda 19 meydana gerçekleştirilen her bir uçuşun toplam gerçek uçuş mesafesi ve harcanan toplam yakıt tüketimlerinin ortalama ve medyan gibi temel betimsel istatistikleri yapılmıştır.

Çizelge 4.14 ve 4.15'de çalışma kapsamındaki 19 rota için yapılan betimsel istatistik analizleri verilmiştir. Bu çizelgelerde uçuş mesafesine (NM cinsinden) ve toplam yakıt tüketimine (kg cinsinden) ait veri sayısı, aritmetik ortalama, standart sapma, en düşük ve en yüksek değerler özetlenmiştir. Örneğin; Ankara Esenboğa Havalimanı kalkışlı ve İstanbul Atatürk Havalimanı inişli toplam 734 uçuş verisi analiz edilmiş ve bu 734 verinin uçuş mesafesinin ortalaması 254 NM, gerçekleşmiş minimum uçuş mesafesi 218 NM, gerçekleşmiş maksimum uçuş mesafesi 390 NM olarak belirlenmiştir. Bu rotanın uçuş mesafesine ait standart sapması 21.6 NM'dır. Aynı rota için yakıt tüketimleri hesaplanırken 303 veri kullanılmıştır. Buna göre; bu rota için ortalama yakıt tüketimi 2001 kg, en düşük yakıt tüketimi 1633 kg ve en yüksek yakıt tüketimi ise 3242 kg olarak bulunmuştur. Yakıt tüketimine ait standart sapma 213 kg olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.14. Uçuş mesafesine ait betimsel istatistikler

Meydan Çifti	Veri Sayısı	Ortalama Uçuş Mesafesi (NM)	Std. Sapma	Gerçekleşmiş Min.Uçuş Mesafesi (NM)	Gerçekleşmiş Maks.Uçuş Mesafesi (NM)
ESB-IST	734	254.22	21.573	218	390
IST-ESB	813	228.09	20.988	207	683
ADB-IST	650	243.12	30.960	189	423
IST-ADB	640	235.27	11.553	186	272
AYT-IST	448	307.23	22.563	266	397
IST-AYT	449	304.15	12.627	273	369
ADA-IST	359	452.92	24.371	407	569
IST-ADA	360	436.68	16.879	413	670
IST-ASR	229	385.39	10.201	354	468
ASR-IST	233	396.82	23.098	350	518
GZT-IST	176	535.88	24.140	490	625
IST-GZT	185	518.72	78.138	497	969
IST-SZF	141	382.82	12.593	362	429
SZF-IST	139	414.74	22.366	370	492
IST-TZX	195	526.65	58.581	505	1326
TZX-IST	196	562.76	24.558	524	697
BJV-IST	272	315.41	35.801	260	477
IST-BJV	270	298.81	15.52	263	378
DLM-IST	201	340.51	21.6	287	419
IST-DLM	201	332.93	13.418	300	367
IST-KYA	125	302.81	8.735	283	333
KYA-IST	122	298.01	19.634	271	383
DIY-IST	101	615.01	17.34	582	667
IST-DIY	124	601.87	27.918	576	860
GNV-IST	87	573.90	19.263	533	625
IST-GNV	85	572.59	50.334	541	1024
DNZ-IST	109	253.34	23.977	216	404
IST-DNZ	109	284	18.89	213	320
IST-MLX	119	497.44	24.219	476	741
MLX-IST	82	519.56	27.879	480	621
EZS-IST	84	560.38	21.96	521	632
IST-EZS	109	567.91	38.478	536	958
ERZ-IST	74	619.15	18.986	584	675
IST-ERZ	89	631.02	59.195	583	948
IST-VAN	97	720.74	32.755	708	1035
VAN-IST	64	757.77	22.679	719	837
HTY-IST	136	513.82	18.553	481	600
IST-HTY	137	512.64	8.797	482	558

Çizelge 4.15. Yakıt tüketimine ait betimsel istatistikler

Meydan Çifti	Veri Sayısı	En Düşük Yakıt Tüketimi (kg)	En Yüksek Yakıt Tüketimi (kg)	Ortalama Yakıt Tüketimi (kg)	Std. Sapma
ESB-IST	303	1633	3242	2001	213.0
IST-ESB	383	1573	2806	1795	121.4
ADB-IST	330	1454	2850	1976	247.7
IST-ADB	321	1507	2154	1843	106.1
AYT-IST	235	1871	3086	2322	219.7
IST-AYT	240	1832	2599	2205	148.5
ADA-IST	171	2558	4032	3100	229.7
IST-ADA	172	2323	3148	2802	154.0
ASR-IST	79	2304	3580	2768	271.4
IST-ASR	75	2128	3249	2545	187.7
GZT-IST	69	2960	4533	3610	310.3
IST-GZT	72	2591	3601	3171	201.0
SZF-IST	39	2460	3408	2920	228.0
IST-SZF	39	2255	3415	2585	229.8
BJV-IST	127	1766	3214	2324	264.1
IST-BJV	125	1779	3091	2207	210.2
DIY-IST	32	3529	4356	3887	202.9
IST-DIY	49	3109	4144	3598	222.1
DLM-IST	97	1995	3040	2460	201.0
IST-DLM	96	2085	2952	2350	152.1
DNZ-IST	45	1553	2462	1876	178.1
IST-DNZ	45	1737	2585	2135	199.5
ERC-IST	53	3002	4542	3585	281.7
IST-ERC	67	1713	3927	3409	306.5
ERZ-IST	53	3354	4618	3735	318.3
IST-ERZ	61	3036	4417	3543	311.3
EZS-IST	37	3191	4171	3714	230.8
IST-EZS	39	2963	3923	3388	225.4
GNY-IST	62	3032	4541	3595	299.4
IST-GNY	122	2825	4541	3470	289.6
HTY-IST	84	2848	4020	3470	218.7
IST-HTY	82	2911	3895	3216	162.3
KCM-IST	56	2674	3985	3146	274.3
IST-KCM	68	2527	3774	2883	227.7
KYA-IST	55	1820	3199	2207	256.3
IST-KYA	55	1817	2445	2175	134.1
MLX-IST	41	2785	4141	3373	299.7
IST-MLX	41	2633	3271	2915	173.4
NAV-IST	69	2079	3192	2534	259.6
IST-NAV	57	1913	2631	2231	170.1
TZX-IST	84	3200	4468	3836	243.9
IST-TZX	84	2823	4261	3247	216.0
VAN-IST	21	4213	5302	4787	329.5
IST-VAN	21	3671	4442	4154	226.4

Çizelgeler dikkatle incelenecek olursa meydan çiftleri bazında gidiş-dönüş yönünden ortalama uçuş mesafelerinde ciddi farklar göze çarpmaktadır. Örneğin; İstanbul Atatürk Havaalanı kalkışlı, Ankara Esenboğa Havaalanı inişli uçuşlar ortalama olarak 228NM sürerken Ankara Esenboğa Havaalanı kalkışlı İstanbul Atatürk Havaalanı inişli uçuşlar ortalama olarak 254NM sürmektedir. Bu farkın analizlerinin yapılabilmesi amacıyla uçuşların plan görünümünden faydalanılmıştır. Meydan çiftleri arasındaki karşılıklı rotalarda uçuş mesafelerinin farklı olmasının temel nedenlerinden biri uçuşların aynı rota üstünden gerçekleşmemesidir. Ayrıca her meydan için belirlenen kalkış ve geliş prosedürleri de farklılık göstermektedir. Şekil 4.16’da gösterilen kırmızı rota İstanbul Atatürk Havaalanı’ndan kalkıp Ankara Esenboğa Havaalanı’na iniş gerçekleştiren uçağa ait rotadır. Sarı renkte gösterilen rota ise Ankara Esenboğa Havaalanı’ndan kalkıp İstanbul Atatürk Havaalanı’na iniş gerçekleştiren uçağa aittir. Şekilde de görüleceği üzere sarı rota için özellikle yaklaşma safhasında yol uzaması göze çarpmaktadır.



Şekil 4.16. IST-ESB (kırmızı) ve ESB-IST (sarı) uçuşlarının plan görünümü

Çizelge 4.16’da her bir rota için hesaplanan optimal mesafe (büyük daire mesafesi) ile gerçekleşen uçuş mesafelerini ortalaması ve bunlar arasındaki fark verilmiştir. Ayrıca, hesaplanan gerçek uçuş mesafelerine ve yakıt tüketimlerine bağlı olarak rota bazında mil başına düşen özgül yakıt sarfiyatları verilmiştir.

Çizelge 4.16. Yatay uçuş verimsizliği analiz sonuçları

Meydan Çiftleri	Büyük Daire Mesafesi (NM)	Ort. Gerçek Uçuş Mesafesi (NM)	Yatay Uçuş Verimsizliği (%)	Ort. Gerçek Yakıt Tüketimi (kg)	1 NM başına düşen yakıt tüketimi (kg)
ESB-IST	198	254	28.3	2001	7.9
IST-ESB	198	228	15.2	1795	7.9
ADB-IST	178	243	36.5	1976	8.1
IST-ADB	178	235	32	1843	7.8
AYT-IST	261	307	17.6	2322	7.6
IST-AYT	261	304	16.5	2205	7.3
ADA-IST	386	453	17.4	3100	6.8
IST-ADA	386	437	13.2	2802	6.4
ASR-IST	336	397	18.2	2768	7.0
IST-ASR	336	385	14.6	2545	6.6
GZT-IST	472	536	13.6	3610	6.7
IST-GZT	472	519	10	3171	6.1
SZF-IST	352	415	17.9	2920	7.0
IST-SZF	352	383	8.8	2585	6.7
TZX-IST	498	563	13.1	3836	6.8
IST-TZX	498	527	5.8	3247	6.2
BJV-IST	230	315	37	2324	7.4
IST-BJV	230	299	30	2207	7.4
DLM-IST	256	340	32.8	2460	7.2
IST-DLM	256	333	30.1	2350	7.1
KYA-IST	250	298	19.2	2207	7.4
IST-KYA	250	303	21.2	2175	7.2
DIY-IST	560	615	9.8	3887	6.3
IST-DIY	560	602	7.5	3598	6.0
GNY-IST	515	574	11.5	3595	6.3
IST-GNY	515	573	11.3	3470	6.1
DNZ-IST	196	253	29.1	1876	7.4
IST-DNZ	196	284	44.9	2135	7.5
MLX-IST	455	520	14.3	3373	6.5
IST-MLX	455	497	9.2	2915	5.9
EZS-IST	505	560	10.9	3714	6.6
IST-EZS	505	568	12.5	3388	6.0
ERZ-IST	569	619	8.8	3735	6.0
IST-ERZ	569	631	10.9	3543	5.6
VAN-IST	688	758	10.2	4787	6.3
IST-VAN	688	721	4.8	4154	5.8
HTY-IST	447	514	15	3470	6.8
IST-HTY	447	513	14.8	3216	6.3

Yapılan analizlerde bazı meydan çiftleri için ortalama uçuş mesafesi değerlerinin çok üzerinde olan gerçek uçuş mesafeleri olduğu görülmüştür. Örneğin; ilk analizlerde IST-TZX uçuşlarında ortalama uçuş mesafesi 527 NM olarak hesaplanmıştır. Fakat bu rota için gerçekleşmiş en uzun uçuş 1326 NM olarak görülmektedir. Ortalama değer çok üstünde gerçekleşmiş bu uçuşun verileri incelendiğinde uçuşun asıl iniş meydanının İran Tebriz Havaalanı olduğu görülmüştür. Bu havaalanına inişin gerçekleştirilememesi nedeniyle yedek meydan olarak belirlenen Trabzon Havaalanı'na iniş yapılmış ve böylelikle uçuş 1326 NM sürmüştür. Bu uçuşun incelenmek istenen rotaya ait olmaması ve analiz sonuçlarını etkilemesi nedeniyle yatay uçuş verimsizlik analizlerinden çıkartılmıştır. Bunun neticesinde; IST-TZX uçuşları için 527NM olan ortalama 522 NM'e düşmüştür ve bu rotadaki verimsizlikte %5 olarak belirlenmiştir.

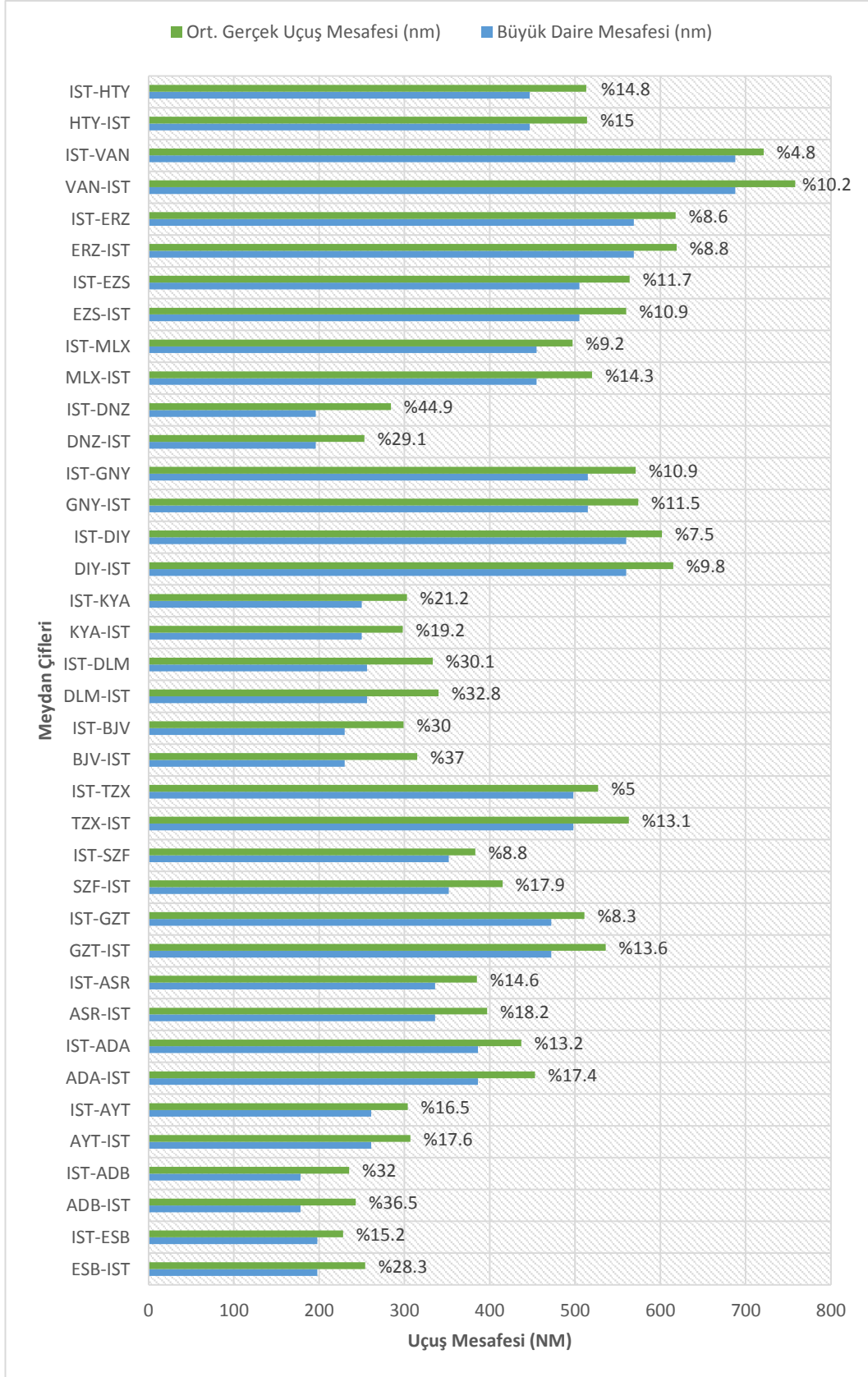
Yatay uçuş analizlerine ilişkin diğer sonuçlar aşağıda listelenmiştir;

- IST-EZS uçuşlarında 958NM olarak gerçekleşmiş uçuşun asıl iniş meydanı Van Havaalanı'dır. Bu uçuşun veri setinden çıkartılması neticesinde ortalama uçuş mesafesi değeri 568NM'den 564NM'e yatay uçuş verimsizliği de %12.5'dan %11.7'ye düşmüştür.
- IST-ERZ veri setinde bu rotaya ait olmayan beş uçuş tespit edilmiştir. Bu uçuşların kayıt isimleri ve gerçekleşen uçuş mesafeleri sırasıyla şu şekildedir, TC-JKJ87972520110322 (948NM), TC-JKJ87258520110310 (843NM), TC-JKN87042820110308 (826NM), TC-JGD85174320110130 (775NM). Bu uçuşların veri setinden çıkartılması sonucunda IST-ERZ ortalama uçuş mesafesi 631NM'den 618NM'e, yatay uçuş verimsizliği de %10.9'dan %8.6'ya düşmüştür.
- IST-GZT veri setinden gerçekleşen uçuş mesafeleri 1446NM ve 977NM olan iki veri çıkartılmıştır. Bunun sonucunda IST-GZT ortalama uçuş mesafesi 519NM'den 511NM'e, yatay uçuş verimsizliği de %8.3'e düşmüştür.
- IST-GNY veri setinden gerçekleşen uçuş mesafesi 1024NM olan uçuş çıkartılmıştır. Bunun sonucunda IST-GNY ortalama uçuş mesafesi 573NM'den 571NM'e, yatay uçuş verimsizliği de %11.3'den %10.9'a düşmüştür.

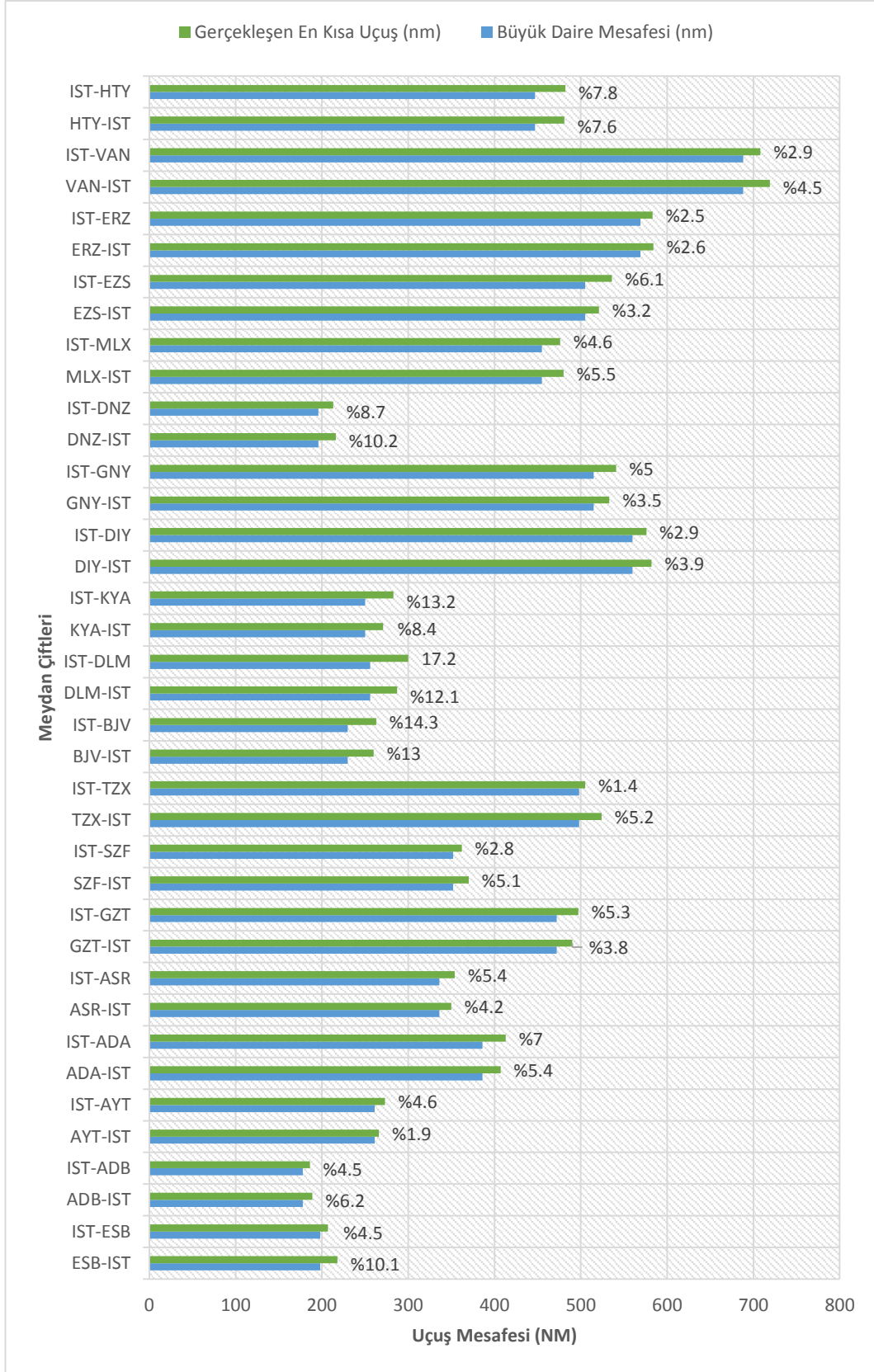
İstanbul Atatürk Havalimanı'ndan kalkıp Ankara Esenboğa Havalimanı'na iniş yapılan uçuşların ortalama uçuş mesafesi yapılan hesaplamalarda 228 NM olarak bulunmuştur. Fakat veri seti incelendiğinde bu ortalama değerin çok üstünde gerçekleşmiş bir uçuş (683NM) olduğu göze çarpmıştır. Bu uçuşun ilgili rotaya ait olup olmadığı incelenmiştir. Uçuşun mesafe olarak uzamasının nedeni büyük ölçüde meydanın güney doğusunda uyguladığı bekleme manevrasıdır. Bu uçuşun o rotaya ait olduğunun belirlenmesinden sonra veri setinden çıkartılmamış ve hesaplamalarda kullanılmıştır. Bu analiz ATM'de kullanılan geciktirme yöntemlerinden biri olan beklemenin uçuş verimi açısından olumsuzluğunun somut bir göstergesidir.

Veri setinden hatalı veriler elendikten sonra elde edilen ortalama gerçek uçuş ve büyük daire mesafeleri ve yatay uçuş verimsizlik yüzdeleri Şekil 4.17'de verilmiştir. Ortalama gerçek uçuş mesafelerine göre en düşük yatay uçuş verimsizlikleri %4.8 ile IST-VAN, %5 ile IST-TZX VE %7.5 ile IST-DIY rotalarında gerçekleşmiştir. En yüksek yatay uçuş verimsizliğe sahip meydan çiftleri ise IST-DNZ (%44.9), BJV-IST (%37) ve ADB-IST (%36.5) uçuşlarına ait olduğu görülmektedir. Bu veriler ışığında Türk hava sahasında gerçekleşen yurt içi uçuşlara ait ortalama uçuş mesafelerinin gerçekleştirebilecek en kısa uçuş mesafesine karşılık gelen büyük daire mesafesinden en az %5 en fazla %44.9 sapma gösterdiği sonucuna varılmıştır. Uçuş mesafelerindeki artış yakıt tüketimi ve emisyon artışlarını da paralelinde getirmektedir. Özellikle yüksek yüzdeler o hatlardaki hava trafik yol ağı üzerinde iyileştirme ihtiyacı olduğunun somut göstergesidir.

Analizler kapsamında uçuşların gerçekleşen en kısa uçuş mesafeleri ile optimal mesafeleri (büyük daire mesafeleri) kıyaslanarak gerçekleşen bir uçuşun optimal mesafeye ne kadar yaklaştığı dolayısı ile mevcut hava trafik hizmet yol ağının optimal mesafeye ne ölçüde yaklaşabildiği belirlenmiştir. Bu kapsamda Şekil 4.18'de gerçekleşen en kısa uçuş mesafeleri ile optimal mesafeleri ve verimsizlik yüzdeleri gösterilmiştir. Veriler %1.4 ile %17.2 arasında değişmektedir. Optimal mesafeye en yakın uçuşların IST-TZX (%1.4) ve AYT-IST (%1.9) arasında gerçekleştiği; en büyük farka sahip uçuşlar ise IST-DLM (%17.2), IST-BJV (%14.3) ve IST-KYA (%13.2) arasında olduğu görülmektedir.



Şekil 4.17. Yurt içi uçuşlarda meydan çiftleri arasında büyük daire (optimal) ve ortalama gerçek uçuş mesafeleri



Şekil 4.18. Yurt içi uçuşlarda meydan çiftleri arasında büyük daire (optimal) ve gerçekleşen en kısa uçuş mesafeleri

4.2.2 Yurt içi uçuşlar için dikey verimsizlik analizleri

ATM kaynaklı dikey verimsizlik, tezin daha önce bölümlerinde hava sahası yapısı ya da hava trafik kontrolörü tarafından uygulanan taktiksel müdahaleler sonucunda uçağın tırmanma veya alçalma sırasında seyir irtifasından başka bir seviyede düz uçuşta geçirdiği zaman olarak tanımlanmıştır. Bu kapsam doğrultusunda her bir meydan için kalkışından seyir irtifasında kadar olan tırmanma safhasındaki, seyir irtifasından pist başına kadar olan alçalma safhasında meydana gelen düz uçuş periyotları belirlenmeye çalışılmıştır. Bu düz uçuş periyotlarını belirlemek adına verilerin uçuş profilleri çıkartılmıştır. Bu işlemin zorluğu nedeniyle ilgili meydan için elde edilmiş olan veri seti içerisinde belirli sayıda örneklem seçilmiştir. Örneklem, belli kurallara göre, belli bir evrenden seçilmiş ve seçildiği evreni temsil yeterli kabul edilen küçük kümedir [84-88].

Çizelge 4.17’de her bir meydan için alçalma ve tırmanma safhalarında en sık karşılaşılan düz uçuş irtifaları ve bu irtifadaki düz uçuş sürelerinin ortalamaları verilmiştir.

Çizelge 4.17. Dikey verimsizlik analizleri

Havaalanı	Tırmanma Sırasındaki Düz Uçuşlar				Alçalma Sırasındaki Düz Uçuşlar			
	İrtifa (ft)	Süre (sn)	İrtifa (ft)	Süre (sn)	İrtifa (ft)	Süre (sn)	İrtifa (ft)	Süre (sn)
ADA					3000	70		
ADB					5500	206		
ASR	26000	75			9000	137	7500	144
AYT					1500	88		
BJV	16000	88			4500	58		
DIY					5000	112		
ERZ	24000	125			15000	146	10000	179
GNY					13000	57	4300	303
GZT					17000	127	4000	90
HTY					4500	113		
IST	31000	109	33000	95	10000	123	3000	112
KYA					6000	121		
MLX					5500	109		
SZF					11000	81	5000	46
VAS					13000	69	7400	267
VAN	28000	65			11000	68	9000	66

AD 2 LTAU IAC - 2
17 OCT 13

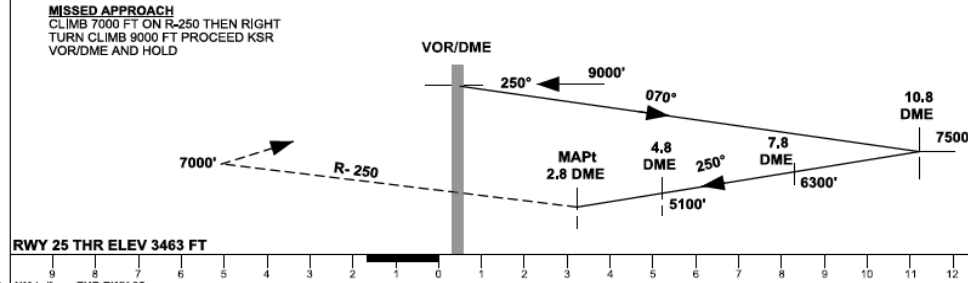
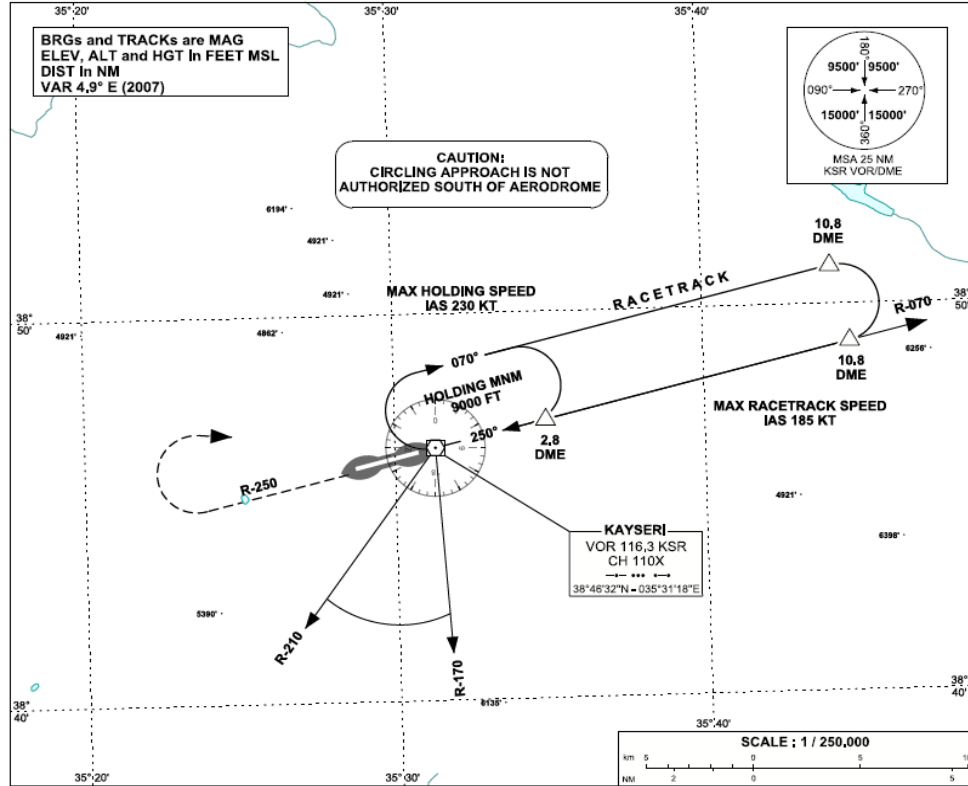
AIP
TURKEY

KAYSERİ

APP	362,3 - 119,2	AD ELEV	3506 FT
TWR	257,8 - 122,1	TRANSITION ALTITUDE	10 000 FT
ATIS	-		

INSTRUMENT
APPROACH
CHART - ICAO

VOR / DME RWY 25



RWY 25 THR ELEV 3463 FT

NM to/from THR RWY 25

OCA (H)	A	B	C	D
Straight-In Approach		4500' (1037')		
Circling		5700' (2194')		

AIRAC AMDT 09/13

DHMI - ANKARA

Şekil 4.19. Kayseri Havaalanı 25 pisti VOR/DME aletli yaklaşma planı

Şekil 4.19'da Kayseri Havaalanı 25 pisti VOR/DME aletli yaklaşma planı verilmiştir. Bu plana göre inişe gelen uçak ilk olarak VOR üstünde 9000 feette beklemeye girmektedir. Beklemeyi 9000 feette terk eden uçak Racetrack prosedürü uygulayıp 10.8NM uçarak 7500 feete alçalmaktadır. Bu havaalanı ile ilgili dikey

verimsizlik analiz sonuçlarına bakıldığında en fazla düz uçuş periyotlarının 9000 feet ve 7500 feette olduğu görülmektedir. Diğer ilgili meydanların da aletli yaklaşma planları incelendiğinde Çizelge 4.17’de verilen alçalma sırasındaki düz uçuş periyotları irtifaları ile yaklaşma planları ile tutarlılık gösterdiği görülmüştür. Başka bir deyişle ilgili havaalanları için yaklaşma prosedürleri dikey verimsizliklerin temel nedenidir.

4.2.3 Uçuş safhalarına göre yakıt tüketimi ve emisyon analizleri

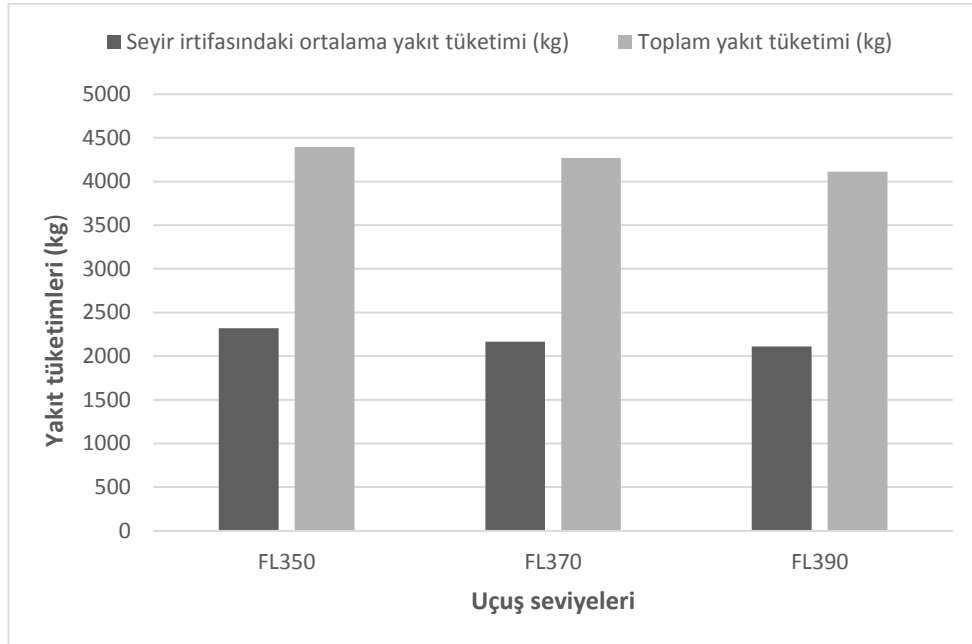
Bir uçuşta yakıt tüketimin etkileyen birçok faktörün bulunduğu tezin daha önceki bölümlerinde dile getirilmiştir. Bu faktörlerin başlıcaları uçak ağırlığı, uçuşun seyir irtifası, hızı, meteorolojik şartlar ve hava trafik kontrolörü tarafından uygulanan taktiksel müdahaledir. Özellikle hava trafik kontrolörü tarafından uygulanan taktiksel müdahaleler neticesinde ortaya çıkan yakıt tüketimleri uçuş safhalarına göre farklılık göstermektedir. Örneğin uçuşun tırmanış safhası motor gücünün yüksek olduğu dolayısıyla yakıt tüketiminin fazla olduğu bir safhadır. Bu safhada kontrolör tarafından uygulanan dikey ya da yatay ayırmalar neticesinde yakıt tüketimi daha da artacaktır.

Aynı şekilde uçuşun seyir safhasında uygulanan ayırmalar neticesinde uçaklar optimum seyir irtifalarından farklı bir seviyede uçmalarıyla yakıt tüketimleri farklılık gösterebilmektedir. Uçuşun farklı safhalarında ve farklı seyir irtifalarında gerçekleşen yakıt tüketimlerini ve emisyonlarını görebilmek adına analizler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda IST-VAN rotası için oluşturulan veritabanındaki uçuş verileri kullanılmıştır.

Yapılan ilk analizler farklı seyir irtifalarının yakıt tüketimine olan etkilerini görmek adına gerçekleştirilmiştir. Bu noktada gerçekleştirilecek analizler için uçak kalkış ağırlığı, uçuş mesafesi, uçuş süresi gibi faktörlerin yakıt tüketimine olan etkilerini göz önünde bulundurulmuş ve bu nedenle bu değerleri birbirini yakın olan uçuşlar seçilmiştir. Analizleri gerçekleştirilen uçuşların uçak kalkış ağırlığı 63.5-66.5 ton, uçuş mesafeleri 714-720 NM ve uçuş süreleri de 100-104 dk arasındadır.

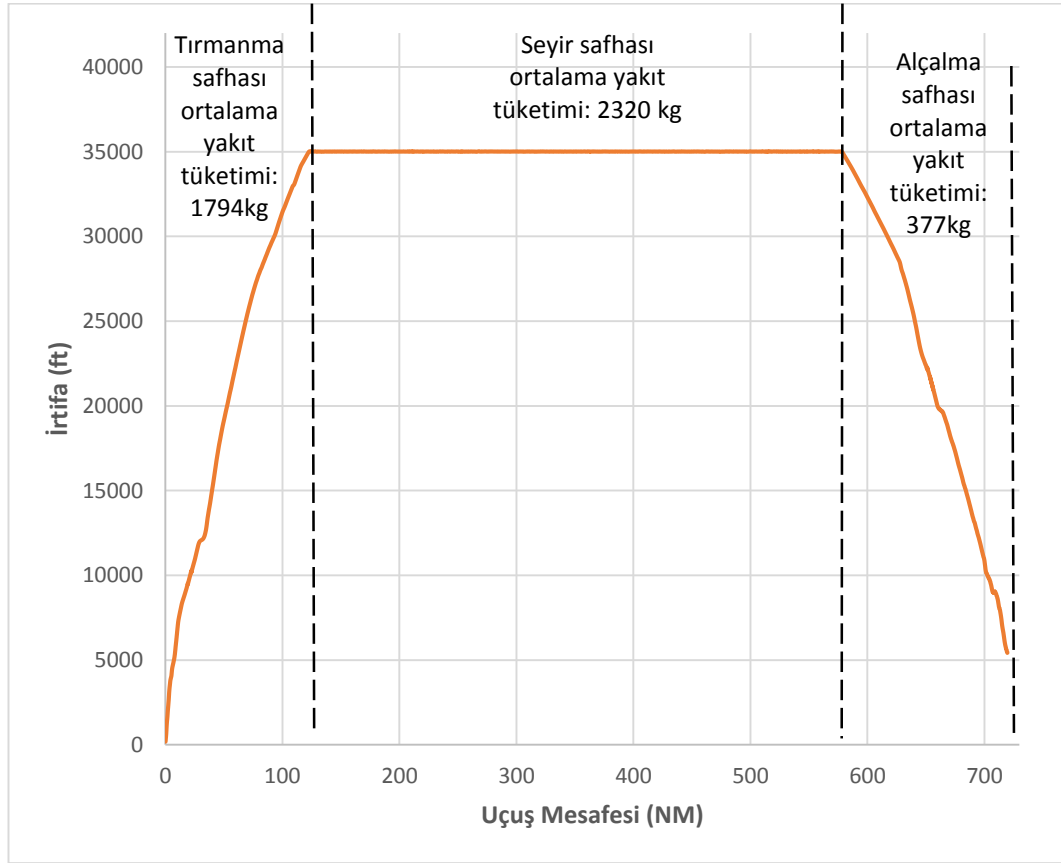
IST-VAN rotasına ait veritabanındaki uçuşların tamamında uçuş seviyeleri 35000 feet, 37000 feet ve 39000 feet olarak belirlenmiştir. Bu nedenle sadece bu uçuş seviyeleri ait yakıt tüketim değerleri hesaplanmıştır.

Daha yüksek seviyelerde gerçekleşen uçuşlarda doğal olarak tırmanma ve alçalmada safhasındaki uçuş mesafeleri daha alçak seyir irtifasındakilere kıyasla daha uzun olmaktadır. Başka bir deyişle toplamda aynı uçuş mesafesine sahip iki uçuştan 39000 feet seyir irtifasına sahip bir uçuşun tırmanma safhası 135 NM, alçalma safhası 125 NM ve seyir safhası da 455 NM sürerken 37000 feet seyir irtifasına sahip bir uçuşun tırmanma safhası 123 NM, alçalma safhası 115 NM ve seyir safhası da 474 NM sürebilmektedir. Bu durum göz önünde bulundurularak seyir irtifaları için hesaplanan yakıt tüketimleri aynı uçuş mesafeleri esas alınarak hesaplanmıştır. Buna göre hesaplanan değerler aşağıdaki Şekil 4.20’de verilmiştir. Buna göre; 35000 feette gerçekleşen uçuş seyir safhasındaki yakıt tüketimi ortalama olarak 2320 kg olmaktadır. Aynı uçuş mesafesi için 37000 feette ortalama 2166 kg, 39000 feette ise 2110 kg yakıt tüketimi gerçekleşmiştir. Daha yüksek seyir irtifalarında yakıt tüketimlerinin ve ayrıca toplam yakıt tüketimleri de azaldığı somut olarak ortaya konulmuştur.



Şekil 4.20. Farklı seyir irtifalarında gerçekleşen yakıt tüketim değerleri

Farklı seyir irtifalarının yakıt tüketimine olan etkilerinin analiz edilmesinden sonra farklı uçuş safhalarında oluşan yakıt tüketim farklılıkları belirlenmiştir. Şekil 4.21’de IST-VAN rotasında 35000 feete gerçekleşen uçuşların ortalama yakıt tüketim değerleri safhalara göre gösterilmiştir. Buna göre tırmanma safhasındaki yakıt tüketimi alçalma safhasındakinin yaklaşık beş katıdır. Daha öncede ifade edildiği gibi tırmanma safhasında motor gücünün yüksek olması nedeniyle yakıt tüketimi de alçalma safhasına göre oldukça yüksek olmaktadır. Dolayısıyla tırmanma sırasında ortaya çıkan emisyonlarda alçalmadaki emisyonlara göre yüksek olmaktadır.



Şekil 4.21. Uçuş safhalarına göre oluşan yakıt tüketim değerleri (örnek)

Farklı seviyeleri ve farklı uçuş safhalarının yakıt tüketim değerlerine etkisini belirledikten sonra her bir safhadaki mil başına harcanan yakıt tüketim ve emisyon değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.18). Tüm uçuşa ait emisyon

değerlerinin gerçek anlamda belirlenebilmesi için deniz seviyesinde elde edilen emisyon faktörlerinin herhangi bir referans atmosfer şartına düzeltilmesi için literatür tarafından genel kabul gören ve Boeing tarafından geliştirilen bir yöntem kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise sadece CO₂ ve H₂O emisyon değerleri hesaplanmış ve çizelgede verilmiştir. Bu değerler belirlenirken literatürde üzerinde fikirbirliği bulunan emisyon katsayılarından yararlanılmıştır. Buna göre bir kg yakıt yandığından 3.15 kg CO₂ ve 1.26 kg H₂O emisyonları ortaya çıkmaktadır. İleriki çalışmalarda Boeing yöntemi kullanılarak tüm uçuşa ait HC, CO ve NO_x emisyon değerleri de belirlenecektir.

Çizelge 4.18. Uçuş safhalarına göre mil başına düşen yakıt tüketimi, CO₂ ve H₂O emisyon değerleri

Uçuş safhası	Yakıt tüketimi (kg)	CO ₂ (kg)	H ₂ O (kg)
Tırmanma	13.7	43.2	17.3
Seyir	5.0	15.8	6.3
Alçalma	2.8	8.8	3.5

Bu analiz sonuçlarından görüleceği üzere tırmanma safhası uçuşun en fazla yakıt tüketimin ve emisyonun olduğu safhadır. Tırmanma sırasında 1 NM uçuş sırasında 43.2 kg CO₂ ve 17.3 kg H₂O ortaya çıkarken seyir safhasında 15.8 kg CO₂ ve 6.3 kg H₂O, alçalma safhasında ise 8.8 kg CO₂ ve 3.5 kg H₂O emisyonu ortaya çıkmaktadır. Ayrıca daha alçak seviyelerde gerçekleşen düz uçuş periyotlarında daha üst seviyelerinkine kıyasla yakıt tüketimi artmaktadır.

ATM kaynaklı uçuş verimsizliğinin azaltılması için yapılacak çalışmalarda mümkün olduğunca tırmanma safhası ile ilgili iyileştirmelere ağırlık verilmesi gerekliliği bu analizler kapsamında ortaya konulmuştur.

4.3. Yurt içi ATM Uçuş Verimsizliği Modeli

Yurt içi uçuşların ATM kaynaklı oluşan uçuş verimsizlikleri analizleri yatay anlamda fazla uçulan uçuş mesafesine dikey anlamda ise alçalma ve tırmanma sırasında gerçekleşen düz uçuş periyotlarına dayalı olarak ayrı ayrı

gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde yatay ve dikey verimsizliklerin birbiri ile etkileşimi sonucunda yakıt tüketimini nasıl etkilediğine dair sayısal bir sonuç ortaya konulmamıştır. Yatay ve dikey verimsizliğin beraber (bu noktadan itibaren bütünleşik ATM verimsizliği) değerlendirilmesi sonucu ortaya çıkan uçuş verimsizliğin belirlenebilmesi amacıyla regresyon analizi kullanılarak ATM uçuş verimsizliği modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan model sonucunda elde edilecek sayısal değer ilgili uçuşun ATM kaynaklı verimsizlik skorunu ifade edecektir.

4.3.1 Modelde kullanılacak verilerin oluşturulması

ATM verimsizlik modelinde yakıt verimsizliğinin ortaya konulabilmesi için uçuşların gerçekleşmiş yakıt tüketimleri ile kıyaslanabilecek referans bir yakıt tüketimi gerektiği daha önceden ifade edilmiştir. Bu kapsam doğrultusunda her bir meydan çifti arasındaki rota için eldeki verilerden en düşük yakıt tüketimi değerleri daha önce belirlenmiştir (Çizelge 4.15). Daha sonra, materyal ve yöntem kısmında daha ayrıntılı olarak açıklanan 1.yöntem ile her bir meydan çifti arasında gerçekleşebilecek en düşük yakıt tüketimleri belirlenmiştir ve Çizelge 4.19’da verilmiştir.

Çizelgedeki gerçek yakıt tüketimi, seyir irtifası, gerçek uçuş süresi ve gerçek uçuş mesafesi verileri, ilgili rota için belirlenen en düşük yakıt tüketimine sahip uçuşun gerçekleşmiş verileridir. Referans yakıt tüketimi ve uçuş süreleri ise yatay ve dikey verimsizliklerin ortadan kalkması halinde ilgili uçuş için, başka bir deyişle o rota için, gerçekleşebilecek en düşük yakıt tüketimi ve uçuş süresini ifade etmektedir. Uçuşun gerçekleşmiş uçuş mesafesi (GUM) ve ilgili rotanın büyük daire mesafesi (BDM) arasındaki fark ise çizelgenin son sütununda verilmiştir.

Çizelgede yer alan IST-DLM uçuşlarında, diğer uçuş rotalarından farklı olarak iki adet seyir seviyesi bulunmaktadır. Bunun nedeni doğulu ve batılı trafiklerde tek ve çift seviye tahsisi kuralıdır (doğulu uçuş seviyeleri tek, batılı uçuş seviyeleri çift). İstanbul Atatürk Havaalanı’ndan kalkıp Dalaman Havaalanı’na gitmekte olan uçuşlar için öncelikle doğu yönlü daha sonrasında da batı yönlü seviye tahsis edilmektedir. Bu nedenle bu rota için çizelgede FL350 ve FL340 olmak üzere iki seviye belirtilmiştir.

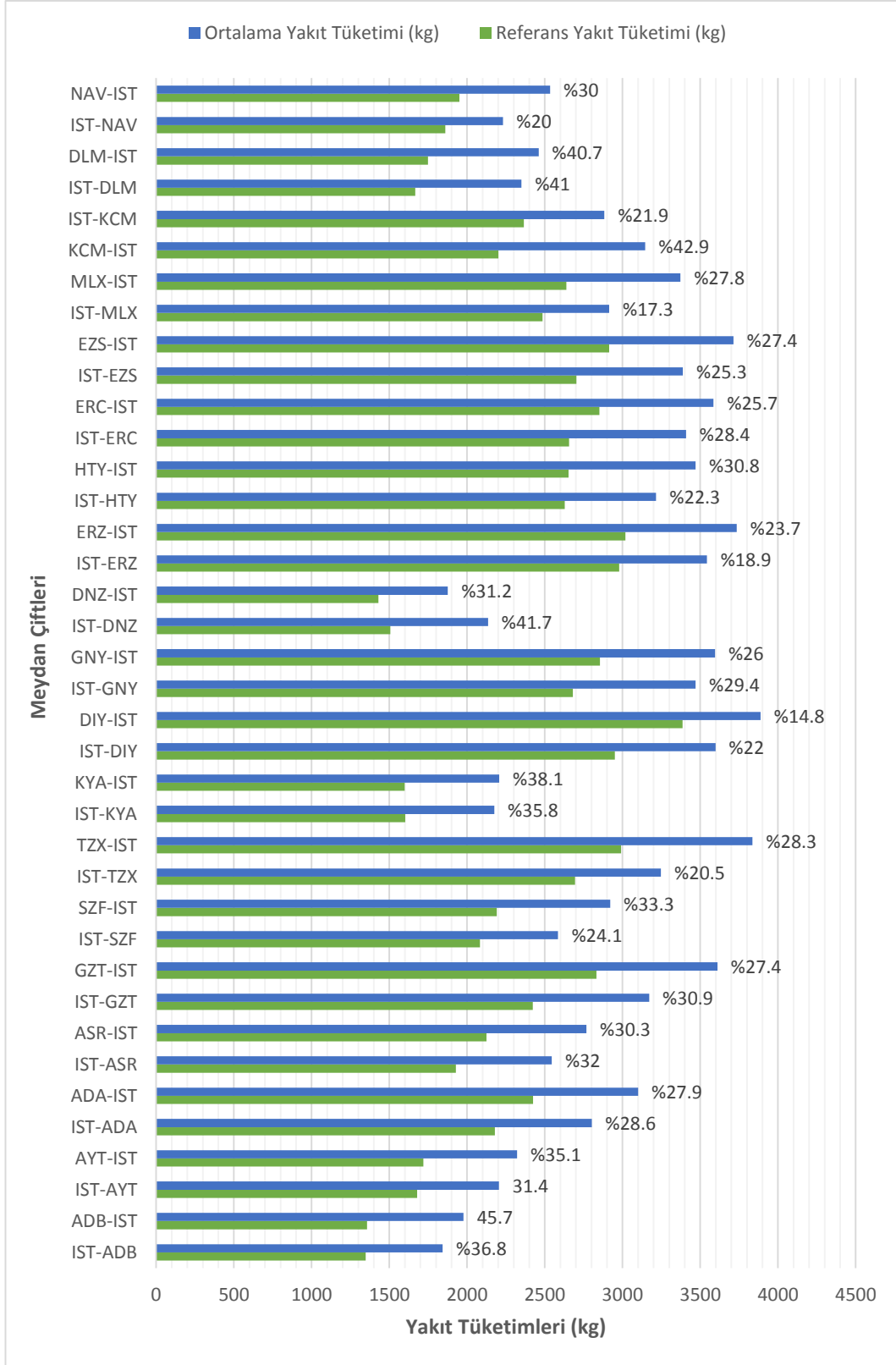
Aynı çizelgede yer alan bazı rotalar için gerçekleşen toplam yakıt tüketimi ile dikey düzeltme sonunda tahmini yakıt tüketimi arasında herhangi bir fark bulunmamıştır. Bunun nedeni belirlenen uçuş için herhangi bir dikey verimsizlik bulunamamasıdır. Başka bir deyişle bu uçuşlarda tırmanma ve alçalma safhalarında düz uçuş periyotları tespit edilmemiştir. Bu nedenle gerçekleşen toplam yakıt tüketimi ile dikey düzeltme sonunda tahmini yakıt tüketimi bu uçuşlar için aynı alınmıştır. Dikey düzeltme sonucunda ortaya çıkan yakıt tüketimi bu çizelgede verilmemiştir.

Rota bazında gerçekleşen ortalama yakıt tüketimleri ile yatay ve dikey düzeltme sonunda hesaplanan referans yakıt tüketimlerinin kıyaslaması Şekil 4.22'de verilmiştir. Aynı şekil üzerinde, gerçekleşen ortalama yakıt tüketimlerinin yatay ve dikey verimsizliklerin kaldırılması sonucu belirlenen referans yakıt tüketimlerine göre meydan çiftleri bazında fazla yakıt tüketim yüzdeleri de görülmektedir. Örneğin veri seti dahilinde IST-AYT rotasında gerçekleşen uçuşlar arasında en az yakıt tüketimi 1832 kg olarak gerçekleşmiştir. Bu uçuşun seyir irtifası 31000 feet, maksimum kalkış ağırlığı 52,4 ton uçuş mesafesi ise 289 NM'dir. Daha sonra bu uçuş için tespit edilen dikey ve yatay verimsizliklerin ortadan kalkması halinde yakıt tüketimi 1678 kg olarak belirlenmiştir.

Her bir rota için oluşturulacak referans uçuş profili birçok faktöre göre değişiklik gösterebilmektedir. Başka bir deyişle yakıt tüketimi; uçak tipi, rüzgâr, sıcaklık, maliyet katsayısı (CI-Cost Index), seyir irtifası gibi birçok faktöre göre değişmektedir. Bu nedenle 2.yöntemde rotalar için belirlenen her bir uçuş için dikey ve yatay düzeltmeler yapılarak referans yakıt tüketimi hesaplanmıştır.

Çizelge 4.19. Meydan çiftleri arasındaki rota bazında hesaplanan referans yakıt tüketimler ve uçuş süreleri

Rota	Gerçek yakıt tüketimi (kg)	Referans yakıt tüketimi (kg)	Seyir irtifası	Maksimum Kalkış Ağırlığı (ton)	Gerçek Uçuş Süresi (sn)	Referans uçuş süresi (sn)	Gerçek uçuş mesafesi (NM)	BDM ile GUM farkı (NM)
IST-AYT	1832	1678	FL310	52.4	3084	2787	289	27.5
AYT-IST	1871	1719	FL340	50.2	3202	2910	294	32.6
IST-ADA	2323	2179	FL370	51	4080	3789	422	36.45
ADA-IST	2558	2424	FL360	56.5	4359	4101	414	28.3
IST-ASR	2128	1928	FL410	49.6	3628	3233	388	52.1
ASR-IST	2304	2125	FL340	49.6	4038	3701	372	35.8
IST-GZT	2591	2422	FL370	51.1	4738	4387	515	43.3
GZT-IST	2960	2833	FL360	59.2	4942	4715	495	23.1
IST-SZF	2255	2083	FL350	56.1	3684	3424	382	30
SZF-IST	2460	2191	FL360	56.8	4268	3764	406	54
IST-TZX	2823	2694	FL330	54.6	4734	4491	529	32
TZX-IST	3200	2991	FL380	56.4	5540	5147	541	43
IST-KYA	1817	1602	FL310	54.2	2977	2552	299	49.1
KYA-IST	1820	1598	FL300	50.4	3189	2748	289	38.8
IST-DIY	3109	2950	FL390	56.4	5168	4865	599	39.1
DIY-IST	3529	3386	FL360	55.2	5751	5505	588	28
IST-GNY	2854	2681	FL370	52.9	4878	4555	552	37.5
GNY-IST	3032	2854	FL360	54.9	5402	5050	555	40
IST-DNZ	1737	1507	FL350	52.5	2505	2059	240	44
DNZ-IST	1553	1430	FL300	49.2	2603	2361	222	26
IST-ERZ	3078	2979	FL390	55.9	4956	4788	591	22.3
ERZ-IST	3354	3018	FL360	53	6318	5655	631	62
IST-HTY	2911	2629	FL370	57.5	4633	4122	515	68
HTY-IST	2848	2653	FL360	55.3	4823	4455	489	42
ERC-IST	3002	2852	FL360	54.6	5458	5164	525	28
IST-ERC	2833	2656	FL350	56.8	4494	4223	535	38
IST-EZS	2963	2703	FL370	55.5	4960	4484	569	64
EZS-IST	3191	2914	FL380	56.5	5787	5242	551	46
IST-MLX	2633	2485	FL410	53.1	4127	3937	482	27
MLX-IST	2785	2639	FL340	54.8	4917	4639	486	31
KCM-IST	2674	2201	FL360	51.1	4638	4331	469	38
IST-KCM	2527	2365	FL390	53.6	4299	3977	471	40
IST-DLM	2085	1666	FL350/340	52.9	3583	2748	350	94
DLM-IST	1995	1749	FL360	51.8	3224	2676	319	63
ADB-IST	1454	1356	FL280	54.9	2255	2069	199	21
IST-ADB	1507	1347	FL250	50.1	2356	2074	209	31
IST-NAV	1913	1860	FL330	54.7	2971	2868	304	9
NAV-IST	2079	1950	FL360	56.6	3403	3161	318	23



Şekil 4.22. Meydan çiftleri bazında ortalama yakıt tüketimleri ve referans yakıt tüketimleri ile yüzdelik olarak farklılıkları

İlgili rotalar için referans yakıt tüketimleri hesaplanacak olan uçuşlar belirli kriterler çerçevesinde belirlenmiştir. Bu kriterler, uçuşların maksimum kalkış ağırlıkları ve iniş-kalkış yapılan pistlerin seçimidir. Bu amaç doğrultusunda ilk olarak ilgili rota için kalkış ağırlıklarının ortalama değerleri belirlenmiş ve Çizelge 4.20’de verilmiştir. Çizelgede ilgili havaalanları ile ilgili kalkış ağırlıklarının betimsel istatistikleri bulunmaktadır.

Çizelge 4.20. Kalkış Ağırlıkları ile ilgili betimsel istatistikler

Kalkış Meydanı	Veri Sayısı	Minimum Kalkış Ağırlığı (ton)	Maksimum Kalkış Ağırlığı (ton)	Ortalama Kalkış Ağırlığı (ton)	Std. Sapma
ADB	650	51.0	77.2	62.4	4.9
ADA	359	49.4	75.8	62.0	4.5
ASR	233	48.8	76.2	62.0	5.9
AYT	448	48.0	76.6	61.6	5.5
BJV	272	48.1	76.0	63.1	6.3
DIY	101	52.5	77.7	60.8	3.8
DLM	201	48.2	74.7	61.1	5.1
DNZ	109	48.4	70.1	57.6	3.4
ERC	64	53.9	72.8	61.4	3.6
ERZ	74	50.1	71.5	58.7	5.1
ESB	734	47.9	76.0	62.4	4.9
EZS	83	56.0	74.3	62.6	3.9
GNV	87	49.9	73.1	59.2	3.4
GZT	176	54.1	78.3	63.3	5.0
HTY	136	55.3	74.3	61.8	3.1
IST	4390	47.8	81.1	60.4	4.0
KCM	77	51.1	62.8	56.7	2.5
KYA	122	49.4	75.7	60.0	4.4
MLX	82	51.1	68.3	58.9	3.5
MSR	78	57.5	72.8	63.6	3.2
NAV	117	51.2	65.6	58.7	3.5
SIC	85	50.1	59.0	55.3	1.7
SZF	139	51.9	75.7	60.5	4.3
TZX	196	47.7	74.8	62.0	4.0
VAN	64	55.9	75.6	63.4	3.3
VAS	30	52.0	67.6	58.2	3.7

Model içerisinde kullanılacak veriler için ortalama kalkış ağırlığına yakın uçuşlar öncelikli olarak seçilmiştir. Daha sonra uçuşların kalkış ve iniş pistlerinin seçiminin etkisini ortadan kaldırmak adına ilgili rota için aynı iniş-kalkış pistleri seçilmiştir.

Maksimum kalkış ağırlığına ve kalkış-iniş pistine göre filtrelenen uçuşlar arasında rastsal olarak bir seçim yapılarak referans yakıt tüketimleri hesaplanacak uçuşlar belirlenmiştir. Belirlenen uçuşlar için referans yakıt tüketiminin oluşturulmasından sonra yöntem kısmında verilen Denklem 3.4 kullanılarak bu uçuşlara ait yakıt verimsizlikleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu yakıt verimsizliği *yakit_oran* değişkeni olarak model içerisine alınmıştır.

Referans yakıt tüketim değerleri belirlenen uçuşların dikey verimsizliklerinin belirlenmesi için Denklem 3.1 ve 3.2, yatay verimsizliklerinin belirlenmesi için ise Denklem 3.3 kullanılmıştır. Tırmanma safhası için belirlenen dikey verimsizlikler *tirmanma_toplam_verimsizlik*, alçalma safhası için belirlenen dikey verimsizlikler *alçalma_toplam_verimsizlik* ve uçuşun tüm safhaları dahilinde belirlenen toplam dikey verimsizlik ise *toplam_dikey_verimsizlik* değişkeni olarak model içerisine alınmıştır. Yatay uçuş verimsizlikleri ise *mesafe_oran* değişkeni olarak modele dahil edilmiştir.

4.3.2 Normal Dağılımın Kontrolü

Yatay uçuş verimsizliğinin tespiti için harcanan yakıt ile uçuş mesafesi arasında gerçekleştirilecek basit doğrusal regresyon analizi için bazı ön şartlar gerekmektedir. Bu ön şartlardan en önemlisi verilerin normal dağılım göstermesi ya da normale yakın bir dağılıma sahip olmasıdır. Bu amaç doğrultusunda eldeki mevcut verilerin her biri için normallik testleri yapılmış ve histogram grafikleri çıkartılmıştır.

Normal dağılımın kontrol edilmesi amacıyla bazı grafiklerin kullanılmasının yanı sıra Kolmogorov-Smirnov ve Shapiro-Wilk gibi testler de kullanılabilir. Literatürde normal dağılım için çarpıklık-basıklık değerlerine ilişkin kesin kabul görmüş standart değerler olmamasına karşın Chou ve Bentler (1995), Curan, West ve Finch (1996) basıklık ve çarpıklık değerleri ± 2 ve ± 7

aralıklarında olduğunda, verilerin normal dağılım sergilediklerini belirtmişlerdir [89,90].

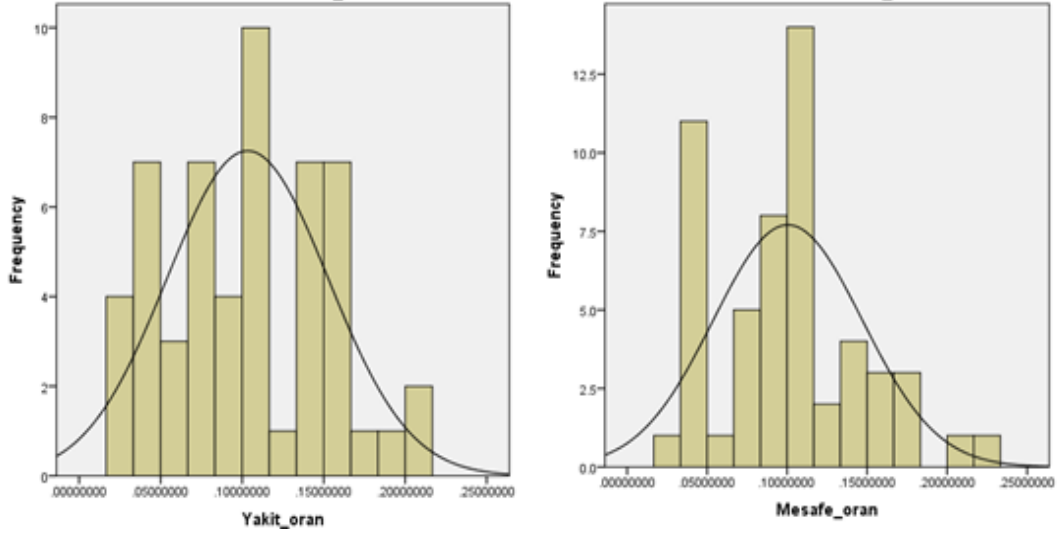
Histogram, Q-Q grafiği ya da çarpıklık-basıklık değerleri incelendiğinde ideal bir normal dağılım gösterdiği düşünülen; ancak Kolmogorov-Smirnov ve Shapiro-Wilk testlerinde normal dağılıma sahip olmadığı görülen veri setleri ile karşılaşılabildiği ifade edilmektedir. Bu durumda; normal dağılım koşulunun sağlanıp sağlanmadığına karar vermek için birden çok ölçütün kullanılması tavsiye edilmektedir [91]. Bu nedenle; harcanan yakıt ve uçuş mesafesi verilerinin normal dağılıma sahip olup olmadığı incelenirken çarpıklık-basıklık değerleri hesaplanmış ve histogram grafikleri çizilmiştir.

Verilerin çarpıklık-basıklık değerleri Çizelge 4.21’de verilmiştir. Bu Çizelgede de görülüşü üzere model için düşünülen bütün değişkenlerin çarpıklık ve basıklık değerleri ± 2 ve ± 7 aralıklarındadır.

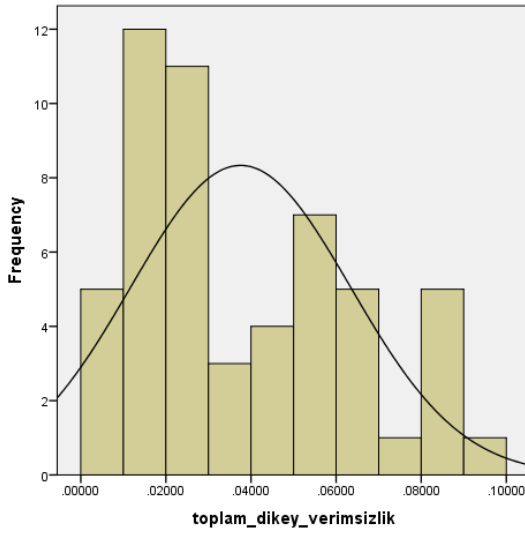
Çizelge 4.21. Değişkenlerin çarpıklık-basıklık değerleri

Değişkenler	Çarpıklık	Basıklık
Yakit_oran	0.223	-0.758
Süre_oran	0.387	-0.22
Mesafe_oran	0.599	0.318
Tırmanma_toplam_verimsizlik	1.362	0.834
Alcalma_toplam_verimsizlik	0.566	-0.818
Toplam_dikey_verimsizlik	0.61	-0.813

Değişkenlerin, ayrıca, normal dağılım koşulunu sağlayıp sağlamadığını daha net bir şekilde karar vermek için histogram grafikleri de çıkartılmıştır (Şekil 4.23-4.24).



Şekil 4.23. Yakıt-oran ve mesafe-oran verilerine ait dağılım grafikleri



Şekil 4.24. Toplam dikey verimsizlik verilerine ait dağılım grafikleri

4.3.3 Değişkenler arasındaki korelasyon ve regresyon

ATM kaynaklı uçuş verimsizliği modeli içerisinde kullanılacak değişkenlerin karar verilmesi amacıyla öncelikli olarak değişken arasında korelasyon yapılmıştır.

Korelasyon, iki ya da daha çok değişken arasında ilişki olup olmadığını, varsa yönünü ve gücünü göstermek amacıyla kullanılan analiz türüdür [92,93].

Korelasyon katsayısını yorumlarken .10 ile.29 arasındaki değerlerin küçük, .30 ile .49 arasındaki değerlerin orta ve .50 ile 1.0 arasındaki değerlerin ise büyük kuvvette bağıntı değerleri olduğu belirtilmektedir [94,95]. Eğer aralarında ilişki aranan iki değişken, aynı anda artıyor ya da azalıyorsa r değeri artı yönde (pozitif bağıntı); eğer değerlerden biri artarken diğeri azalıyorsa r değeri eksi yönde olacaktır (negatif bağıntı).

Bağımlı değişkendeki değişimin yüzde ne kadarının bağımsız değişken tarafından tanımlanabildiğini görmek amacıyla belirleme katsayısına (R^2) bakılır. Fakat R^2 değeri, etkinin öneminin ölçülmesinde oldukça önemli olmasına rağmen nedensel bir ilişki kurulmasında kullanılamaz [96].

Regresyon analizi, bağımlı bir değişken ile bağımlı değişken üzerinde etkisi olduğu varsayılan bağımsız değişken(ler) arasındaki ilişkinin matematiksel bir model ile açıklanmasıdır [97]. Bağımlı değişkenle en yüksek korelasyon katsayısına sahip bağımsız değişken ilk olarak modele alınır. Geriye kalan değişkenlerle bağımlı değişken arasında kısmi korelasyon katsayısı hesaplanır ve katsayısı en yüksek olan değişken denkleme alınır. Her aşamada denkleme son giren değişkenin modelde kalmasına gerek olup olmadığı ve son giren değişken modelde iken önceki değişkenlerin modelde kalmasına gerek olup olmadığı test edilir. Gereksiz olan değişken model dışında bırakılır. ATM kaynaklı uçuş verimsizliği modelinin geliştirilmesinde bu yöntem izlenecektir [98].

Bağımlı değişkenle yani yakıt tüketimi ile aralarında bağlantı bulunan değişkenlerin bulunması amacıyla yapılan analizlerde SPSS Statistics 20 paket programı kullanılmıştır. THY'nın 2011 yılında yurt içinde gerçekleştirdiği 134 adet uçuşun verileri kullanılmıştır. Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki korelasyon matrisine baktığımızda yakıt verimsizliği ve uçuş mesafesi verimsizliği arasındaki korelasyon katsayısı .873 bulunmuştur (Çizelge 4.22). Başka bir deyişle; harcanan toplam yakıt ile uçuş mesafesi arasında büyük kuvvette, pozitif yönlü bir ilişki bulunmaktadır ve bu değer istatistiksel olarak anlamlıdır ($p<.001$). Yine aynı şekilde yakıt verimsizliği ile toplam dikey verimsizlik arasında büyük kuvvette, pozitif yönlü ve anlamlı bir ilişki bulunmaktadır ($r=.819$; $p<.001$). Yakıt verimsizliği ile tırmanmadaki toplam verimsizlik arasındaki ilişkiye bakacak

olursak negatif yönde zayıf kuvvette bir ilişki olduğu görülmüştür ($r = -.115$; $p > .001$).

Çizelge 4.22. Değişkenler arasındaki korelasyon

n=54	Mesafe_oran	Tırmanma toplam verimsizlik	Alçalma toplam verimsizlik	Toplam dikey verimsizlik
Yakıt_oran	0.873	-0.115	0.818	0.819
	0.000	0.205	0.000	0.000
Mesafe_oran		-.122	.545	.539
		.189	.000	.000
Tırmanma toplam verimsizlik			-.216	-.074
			.059	.298
Alçalma toplam verimsizlik				.990
				.000

En iyi regresyon modelini elde etmek için her defasında modele yeni bir bağımsız değişkenin ilave edildiği veya çıkarıldığı yöntemlerden biri de adım adım regresyon yöntemidir. Çoklu regresyon modellerinde, bir model ortaya koyabilmek için, en büyük problem modelde yer alacak bağımsız değişkenlerin seçimidir. Çok sayıda bağımsız değişken söz konusu olduğunda bir model kurmak zordur. Bu zorluğunda giderilmesinde adım adım regresyon yöntemleri yaygın olarak kullanılır.

Adım adım yöntemi ile gerçekleştirilen çoklu regresyonda SPSS programı istatistiksel olarak anlamlı olan yordayıcı değişkenleri sırasıyla kendi seçer. Değişkenler arasında bağımlı değişkenle en yüksek bağıntıya sahip olan bağımsız değişken ilk olarak modele sokulur. Daha sonra kalan değişkenler arasında en yüksek bağıntıya sahip olan değişken modele sokulur. Bu işlem modele girmeyi hak edecek derecede bağıntısı olmayan değişkenler dışarıda bırakılarak tamamlanır.

Buna göre; oluşturulan ilk model yakıt verimsizliği ile uçuş mesafesi verimsizliği arasındaki ilişkiyi, ikinci model ise yakıt verimsizliği ile uçuş mesafesi verimsizliği ve toplam dikey verimsizliğin arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

İlk model varyansın %87,3'ünü açıklarken toplam dikey verimsizliğin uçuş mesafesi verimsizliğine eklenmesiyle oluşturulan ikinci model ise varyansın %96.6'sını açıklamaktadır.

İlk modeli belirlilik katsayısı (R^2) .761 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, uçuş mesafesi verimsizliğinin toplam yakıt verimsizliğinin %76.1'lik bir kısmını açıkladığı göstermektedir. İkinci modelin R^2 değeri ise .932 olarak hesaplanmıştır. Yani uçuş mesafesi ve toplam dikey verimsizlik değişkenleri yakıt tüketimi verimsizliğinin %93.2'sini açıklamaktadır. Başka bir deyişle; R^2 değeri, harcanan toplam yakıttaki varyansın %6.8'ini etkileyen başka değişkenler olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.23'de verilen varyans analizleri, yordayan değişkenlerin yordama işlemini başarıyla gerçekleştirdiğini ve modellerin anlamlı bir model olduğunu göstermektedir. ANOVA çizelgesindeki en önemli değerler F değeri ve bu değer için hesaplanan anlamlılık değeridir. Çizelge 4.23'de görüldüğü üzere ilk model için F değeri (165.918) ve anlamlılık değeri de (.000) olarak bulunmuştur. Diğer modelde ise F değeri (351.223) ve anlamlılık değeri de (.000) olarak bulunmuştur. Başka bir deyişle hesaplanan F değerinin şans eseri gerçekleşmiş olma ihtimali yüzde sıfırdır. Buna göre; harcanan toplam yakıt ve uçuş mesafesi arasındaki regresyon modeli yordama işleminde başarılı olmuştur ve model istatistiksel olarak anlamlıdır.

Çizelge 4.23. Varyans Analizi Çizelgesi

Model	Değişim Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kare	F	P
1	Regresyon	1	.099	.099	165.918	.000 ^b
	Hata	52	.031	.001		
	Toplam	53	.130			
2	Regresyon	2	.121	.061	351.223	.000 ^c
	Hata	51	.009	.000		
	Toplam	53	.130			

Uçuş mesafesi verimsizliğini ve toplam dikey verimsizliği değişkenlerinin harcanan yakıt verimsizliği değişkenine olan katkısını görebilmek için Çizelge 4.24'de verilen katsayıları bakmak gerekmektedir. B sütunundaki ilk değer (b_0) yordayan değişkenin değeri sıfır olduğunda yordanan değişkenin aldığı değeri göstermektedir. B sütunundaki diğer değer (b_1) ise yordayan değişkende bir

birimlik değişim olduğu zaman yordanan değişkende meydana gelecek olan değişimin miktarı açıklamaktadır.

Standart b değeri (β) tahmin değişkenindeki bir standart sapma değişikliğinin bağımlı değişkende ne kadar değişiklik yaratacağını söylemektedir. Başka bir deyişle; değişkenlerin kısmi etkilerinin ölçü birimlerinden bağımsız olarak görülebilmesini ve karşılaştırılmasını sağlamaktadır.

Çizelge 4.24. Katsayı Çizelgesi

	B	Standart hata	β
Model 1			
Sabit	.010	.008	
Uçuş Mesafesi verimsizliği	.927	.072	.873*
Model 2			
Sabit	.003	.004	
Uçuş Mesafesi verimsizliği	.646	.046	.608*
Toplam dikey verimsizlik	.940	.083	.491*

Not: Model 1 için $R^2=.761$ ($p<.001$); Model 2 için $R^2=.932$ ($p<.001$);* $p<.001$

Çizelge 4.23'de ilk model için $b_0=.010$ ve $b_1=.927$ olduğu görülmektedir. Basit doğrusal regresyon modeli $y=b_0+b_1x$ şekildedir. Buna göre; uçuş mesafesi bağımsız değişkeni ile yakıt verimsizliği bağımlı değişkeni arasındaki ilişkiyi açıklayan birinci doğrusal regresyon modeli şu şekildedir;

$$y= 0,010 +0,927x \quad (4.1)$$

İkinci model için sabit değerimiz 0.003'dür. Uçuş mesafesi ve toplam dikey verimsizliği bağımsız değişkenleri için katsayılar sırasıyla 0.646 ve 0.940'dır. Bunun neticesinde ikinci model şu şekildedir;

$$y= 0.003 +0.646x_1+0.940x_2 \quad (4.2)$$

x_1 : Uçuş mesafesi verimsizliği

x_2 : Toplam dikey verimsizlik

İlgili uçuşun x_1 ve x_2 değişkenleri ayrı ayrı belirlenerek modele dahil edilmesi ile ilgili uçuşun bütünlük ATM uçuş verimsizliği skoru ortaya çıkacaktır. Rota ya da hava sahası dahilindeki her bir uçuşun ATM uçuş verimsizliğinin belirlenmesi ile de ilgili rota ve hava sahasının bütünlük ATM uçuş verimsizliği puanı belirlenecektir.

4.4. Model ile İlgili Bulgular

Materyal ve yöntem kısmında anlatılan kriterler ışığında seçilen rotalar olan Sivas, Van, Kayseri, Malatya, Erzurum ve Şanlıurfa rotaları için ATM uçuş verimsizlik puanları hesaplanmış ve Çizelge 4.25’de verilmiştir. Bu çizelgede ayrıca ilgili rotaların model için seçilmiş uçuş verilerine ait yatay verimsizlik, alçalmadaki dikey verimsizlik, tırmanmadaki dikey verimsizlik ve toplam dikey verimsizlik yüzdeleri ayrı ayrı verilmiştir. Örneğin; IST-VAS rotası için seçilen verilere ait yatay verimsizlik %11.3 ve dikey verimsizlik ise %5.5 olarak belirlenmiştir. Bu verimsizliklere göre IST-VAS rotasının ATM verimsizlik puanı ise 12.5 olarak hesaplanmıştır. Hem yatay hem dikey verimsizlik esas alındığında ilgili rotalar arasında en yüksek ATM verimsizliğine sahip 14.6 puan ile IST-ASR rotasıdır. Başka bir deyişle IST-ASR rotası yatay ve dikey anlamda en fazla TMA ve yol iyileştirmesine ihtiyaç duyan rotadır. En düşük ATM verimsizlik puanı ise 4 puan ile IST-VAN rotasına aittir.

Çizelge 4.25. Rotaların ATM kaynaklı verimsizlik puanları

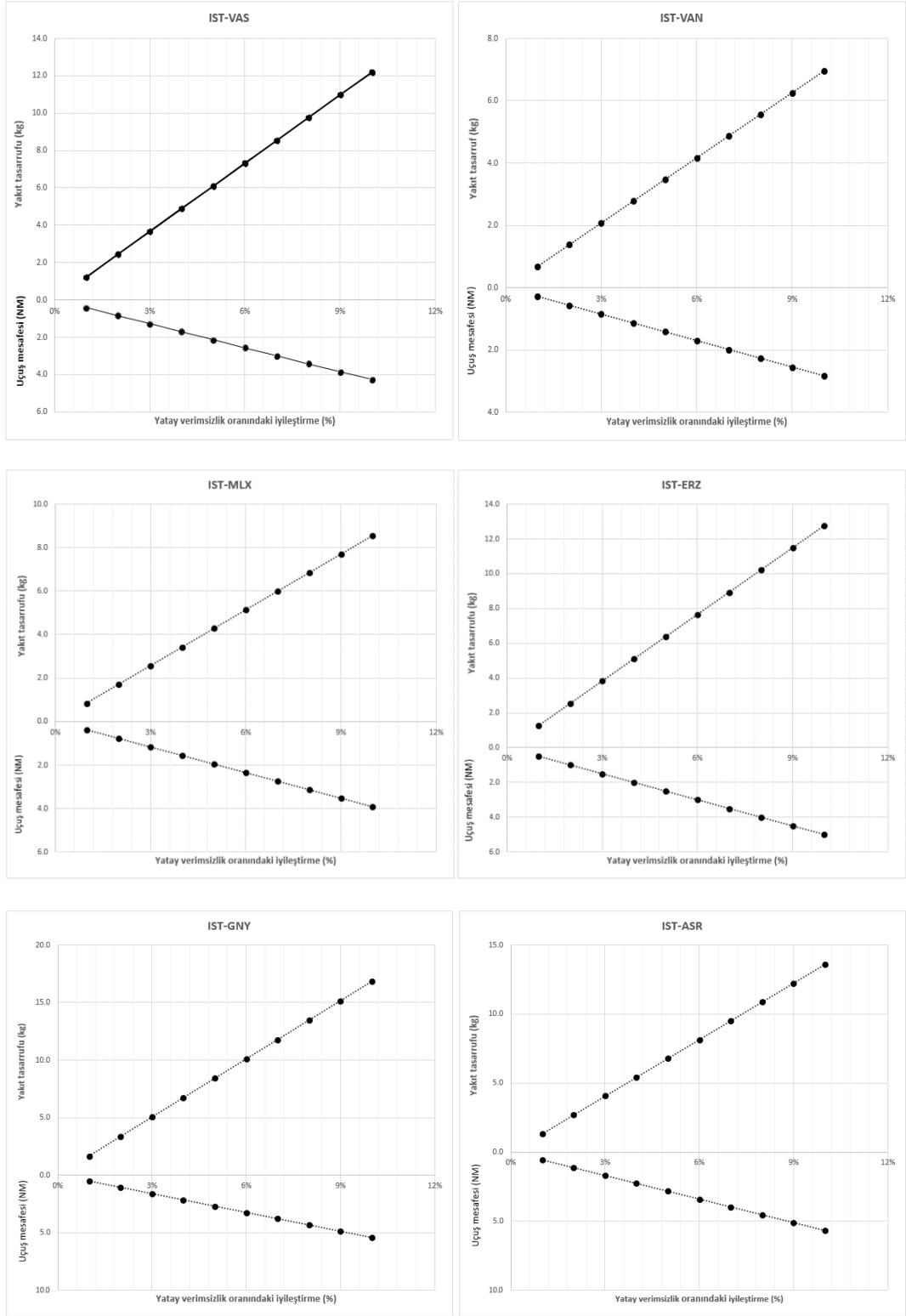
Rota	Yatay Verimsizlik Puanı	Tırmanmadaki Dikey Verimsizlik Puanı	Alçalmadaki Dikey Verimsizlik Puanı	Toplam Dikey Verimsizlik Puanı	ATM Verimsizlik Puanı
IST-VAS	11.3	0.2	5.3	5.5	12.5
IST-VAN	4.1	0.2	1.3	1.5	4
IST-MLX	8.6	0.2	2	2.2	7.6
IST-ERZ	8.8	0.2	3.2	3.4	8.9
IST-GNY	9.4	0.4	5.4	5.8	11.5
IST-ASR	16.9	0.3	3.6	3.9	14.6

Genel anlamda uçuşun yakıt tüketimini etkileyen birçok değişken bulunmaktadır. Daha öncede belirtildiği gibi uçuşun optimum seyir seviyesinden sapmaları ve özellikle alçak seviyelerdeki düz uçuşları yakıt tüketimini artıran önemli değişkenlerdir. Aşağıda verilen Çizelge 4.26’da yatay ve dikey anlamda yapılacak iyileştirmeler neticesinde ATM verimsizlik puanında gerçekleşecek düşüşler yüzde olarak verilmiştir.

Çizelge 4.26. Yatay ve dikey iyileştirmelerin yüzdesel olarak ATM verimsizlik puanına etkisi

Yatay İyileştirme	Dikey İyileştirme	ATM verimsizlik puanındaki iyileştirme
1%	1%	1%
2%	2%	2%
2%	1%	1.4%
1%	2%	1.6%
15%	10%	12%
10%	15%	13%
20%	-	8.2%
-	20%	11.8%

Yukarıdaki çizelgede verilen iyileştirme yüzdeleri uçuş mesafesindeki ya da düz uçuş periyotlarındaki %1’lik azalmayı değil denklem 3.1 ve 3.3 ile hesaplanan yatay ve dikey uçuş verimsizlik oranlarındaki düşüşleri ifade etmektedir. Bu nedenle rotaların yatay ve dikey verimsizlik puanlarında yapılacak iyileştirmeler neticesinde elde edilecek uçuş mesafesi ve yakıt tüketimleri gibi kazançlar farklılık gösterecektir. İlgili rotaların yatay verimsizlik puanlarında yapılacak %1’lik iyileştirme sonucunda elde edilecek uçuş mesafesi ve yakıt tasarrufu kazançları model ile hesaplanmış ve grafik şeklinde verilmiştir (Şekil 4.25). Buna göre; IST-VAS rotasının yatay verimsizlik puanında yapılacak %10’luk iyileştirme ile uçuş başına 4.3 NM uçuş mesafesi kazancı ve 12.2 kg yakıt tasarrufu sağlanacaktır. IST-VAN rotası için ise yatay verimsizlik puanında yapılacak %10’luk iyileştirme ile uçuş başına 2,8 NM uçuş mesafesi kazancı ve 6,9 kg yakıt tasarrufu sağlanacaktır.



Şekil 4.25. İlgili rotaların %1'lik yatay verimsizlik oranı iyileştirmesi sonucundaki uçuş mesafesi ve yakıt tüketimleri kazançları

5. SONUÇ, TARTIŞMA ve ÖNERİLER

ATM verimsizliği uçuşun optimal dört boyutlu yörüngesinden farklı bir yörüngede uçuşması sonucu oluşan uçuş verimsizliği olarak tanımlanmaktadır. Trafik durumu ya da meteorolojik şartlar neticesinde uygulanan kaçındırma yöntemleri, kalkış ve geliş prosedürleri, uygulanan hız tahditleri, tahsis edilen uçuş seviyeleri gibi ATM kaynaklı faktörler uçuş verimsizliğine neden olmaktadır ve bu verimsizliğin hava sahası kullanıcıları üzerine yakıt tüketimi ve zaman olarak farklı etkileri söz konusudur.

Hava taşımacılığının çevresel etkilerinin azaltılmasında hava trafik yönetiminin önemli bir rolü bulunmaktadır. Hava Trafik Yönetiminin iyileştirilmesi, hava trafik tıkanıklıklarını ve gecikmeleri azaltmanın yanı sıra yakıt tüketimini ve buna bağlı ortaya çıkan emisyonları da azaltmaktadır.

ATM'in yakıt tüketimi, uçuş zamanı ve çevre üzerine etkilerinin anlaşılabilmesi amacıyla uçuş safhalarındaki uçuş verimsizliğinin ölçülmesi gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda uçuşlar, havaalanı ve çevresindeki ATM etkisi ile terminal ve yol safhasındaki ATM etkisi olmak üzere iki boyutta incelenmiştir.

Bu tez kapsamında havaalanı ve çevresindeki ATM etkisi için ICAO LTO döngüsü safha süreleri esas alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. LTO döngüsü uçakların taksi, kalkış, 3000ft irtifaya kadar olan tırmanma ve yaklaşma hareketlerini kapsamaktadır. Gerçek uçuş verileri ile yapılan hesaplamalar neticesinde oluşturulan operasyonel LTO döngüsü ile ICAO tarafından belirlenen LTO döngüsü arasında tüm safha süreleri için ciddi farklılıklar bulunmuştur. Buna göre; ICAO LTO döngüsü safha sürelerine kıyasla taxi-out süresinde %59, tırmanma süresinde %45, kalkış süresinde %29 ve taksi-in süresinde ise %26'lık bir azalma belirlenmiştir. Sadece yaklaşma safhası süresinde ICAO LTO döngüsüne göre bir artış (%15) söz konusudur. Bu artış ile ilgili yapılan analizler neticesinde LTO döngü yaklaşma safhasının 3000 feet ile piste teker konulduğu ana kadar olması ve ilan edilen yaklaşma prosedürleri ile kontrolör tarafından yaklaşma sırasında uygulanan dikey ayırmaların bu safha süresi için belirleyici olduğu görülmüştür.

Terminal ve yol safhasındaki ATM etkisi yatayda ve dikeyde olmak üzere iki boyutta incelenmiş ve elde edilen uçuş verileri ile yapılan analizlerle uçuşların kendi optimal yörüngelerinden ne kadar farklı uçtukları belirlenmiştir.

Yatay uçuş verimsizliği analizlerinde uçuş verilerinin tamamı kullanılmıştır. Buna göre; ATM kaynaklı en yüksek yatay uçuş verimsizliğine sahip rotanın %44.9 ile IST-DNZ, en düşük verimsizliğin ise %4.8 ile IST-VAN rotasında olduğu tespit edilmiştir. Başka bir deyişle hava trafik yol ağının iyileştirme ihtiyacının en fazla olduğu rota IST-DNZ olarak belirlenmiştir. Yatay uçuş verimsizliği analiz sonuçlarına bakıldığında meydan çiftleri arasındaki karşılıklı rotaların verimsizlik sonuçlarının farklı (IST-HTY ve IST-GZT rotaları hariç) olduğu görülmektedir. Meydan çiftleri arasındaki karşılıklı rotalar arasındaki en fazla farka sahip rota IST-ESB rotasıdır. ESB-IST uçuşları için yatay verimsizlik %28.3 iken IST-ESB uçuşları için bu verimsizlik %15.2'dir. Karşılıklı rotalar arasındaki bu fark, her havaalanı için belirlenen kalkış ve yaklaşma prosedürlerinin farklı olmasından ve uçuşların karşılıklı olarak aynı rota üzerinden gerçekleşmemesinden kaynaklanmaktadır.

Çalışma kapsamındaki rotaların gerçekleşen en kısa uçuşları ile ilgili rotanın büyük daire mesafesi kıyaslanarak hava trafik hizmet yol ağının optimal uçuş mesafeye ne ölçüde yaklaşabildiği belirlenmiştir. Buna göre optimal uçuş mesafesine en yakın uçuşların IST-TZX (%1.4) ve AYT-IST (1.9) arasında gerçekleştiği görülmüştür.

ATM kaynaklı dikey verimsizliklerin belirlenebilmesi amacıyla çalışma kapsamındaki rotaların seyir irtifaları haricindeki tırmanma ve alçalmaları sırasında gerçekleşen düz uçuş periyotları incelenmiştir. Bu kapsamda veri seti içerisinde belirli bir sayıda örneklem seçilerek ilgili rotalar için en sık karşılaşılan düz uçuş irtifaları ve bunların en fazla hangi safhalarda gerçekleştiği tespit edilmiştir. Yapılan analizler neticesinde kalkış pistinden seyir irtifasına kadar olan tırmanma safhasına kıyasla seyir irtifasından iniş pistine kadar alçalmalarda daha fazla dikey verimsizlik olduğu görülmüştür. Daha sonra alçalma safhasında oluşan dikey verimsizliklerin nedenlerinin belirlenmesi amacıyla ilgili meydanların yaklaşma planları incelenmiştir. Buna göre; ilgili havaalanlarının yaklaşma prosedürlerinin alçalma sırasında oluşan dikey verimsizliklerin nedeni olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan analizler neticesinde ATM kaynaklı uçuş verimsizliğine neden olan değişkenler tespit edilerek karmaşık hesaplama yöntemleri olmadan ATM verimsizliğini ölçmeyi sağlayacak bir model geliştirilmiştir. Bu modelin oluşturulmasında regresyon analizi kullanılmış olup bağımlı değişken olarak yakıt tüketimi, bağımsız değişkenler olarak da yatay verimsizlik (uçuş mesafesi) ve dikey verimsizlik parametreleri kullanılmıştır. Bu model sayesinde hem yatay hem de dikeyde oluşan ATM kaynaklı verimsizliklerin yakıt tüketimine etkileri birlikte belirlenebilmektedir. Ayrıca model neticesinde ilgili rota ya da uçuş için ATM kaynaklı verimsizlik puanları da belirlenebilmektedir. Bu amaç doğrultusunda bazı rotalar için model kullanılarak ATM verimsizlik puanları hesaplanmıştır. Buna göre en yüksek ATM verimsizlik puanına sahip rota 14,6 puan ile IST-ASR rotası olarak belirlenmiştir.

Modele göre yapılan hesaplamalar sonucunda yatay ve dikey anlamda yapılacak %1'lik iyileştirmelerle ATM verimsizlik puanında %1.3'lük bir düşüş yaşanacağı belirlenmiştir. Dikey anlamda bir iyileştirme yapılmadan sadece yatayda yapılacak %20'lik bir iyileştirme ile ATM verimsizlik puanında %8.2'lik bir düşüş gerçekleşecektir. Yatay anlamda bir iyileştirme yapılmadan sadece dikeyde yapılacak %20'lik bir iyileştirme ile ATM verimsizlik puanında %11.8'lik bir düşüş yaşanacaktır. Bu hesaplamalar neticesinde ATM verimsizlik puanını en çok etkileyen değişkenin dikeyde yapılacak iyileştirmeler olduğu görülmektedir. Bu nedenle, ileriki çalışmalarda yapılacak uçuş prosedürü anlamındaki iyileştirmelerde en çok üzerinde durulacak değişken dikey verimsizlik değişkeni olacaktır.

Rotalara ait ATM verimsizlik puan değerleri ne kadar düşürülebilirse verimlilikte o kadar kazanç sağlanacaktır. Bu kapsamda belirli periyotlarla konulacak hedef puan değerlerine ulaşmak ATM'de iyileşmeyi, bunun doğal sonucu olarak da uçuş verimliliğinin artması yani yakıt tüketimi ve emisyonunun azalmasını sağlayacaktır. Çizelge 5.1'de yatayda ve dikeyde yapılacak %1'lik iyileştirmelerle modele göre hesaplanan rota bazında uçuş başına sağlanacak ortalama yakıt tasarrufları verilmiştir. Bu yakıt tasarrufları modelin oluşturulmasında kullanılan uçuş verileri esas alınarak belirlenmiştir. Buna göre; IST-VAS rotasında yatayda yapılacak %1'lik iyileştirmeler neticesinde uçuş başına

ortalama 1,2 kg yakıt tasarrufu, sadece dikeyde yapılacak %1’lik iyileştirme ile de uçuş başına ortalama 1.8 kg yakıt tasarrufu sağlanacaktır. Bütünleşik bir şekilde hem yatayda hem de dikeyde yapılacak %1’lik iyileştirmelerle de uçuş başına ortalama 3.9 kg yakıt tasarrufu sağlanacaktır. Çizelge de ayrıca ilgili rotaların 2011 yılındaki toplam uçuş sayıları verilmiştir. IST-ASR rotası için hem yatayda hem de dikeyde yapılacak %1’lik iyileştirmeler neticesinde 2011 yılı uçuş sayısı dikkate alınarak toplamda 15017 kg yakıt tasarrufu sağlanması mümkün olabilecektir.

Çizelge 5.1. Rota bazında yapılan %1’lik iyileştirmelerle elde edilecek olası yakıt tasarrufları

Rota	Yapılan iyileştirme yüzdesi		Uçuş başına ortalama yakıt tasarrufu (kg)	2011 yılı uçuş sayısı	Toplam yakıt tasarrufu (kg)
	Yatay iyileştirme	Dikey iyileştirme			
IST-VAS	1%	-	1.2	457	548.4
	-	1%	1.8	457	822.6
	1%	1%	3.9	457	1778.5
IST-VAN	1%	-	0.7	529	370.3
	-	1%	1.0	529	529.0
	1%	1%	2.2	529	1173.1
IST-MLX	1%	-	0.8	942	753.6
	-	1%	1.3	942	1224.6
	1%	1%	2.7	942	2572.2
IST-ERZ	1%	-	1.3	631	820.3
	-	1%	1.9	631	1198.9
	1%	1%	4.1	631	2568.6
IST-GNY	1%	-	1.7	576	979.2
	-	1%	2.5	576	1440.0
	1%	1%	5.4	576	3093.4
IST-ASR	1%	-	1.3	3484	4529.2
	-	1%	2	3484	6968.0
	1%	1%	4.3	3484	15107.4

Geliştirilen bu model sayesinde; basit ve hızlı bir şekilde her bir uçuşun ATM kaynaklı uçuş verimsizliğinin ölçülmesi sağlanacaktır. Bu model, hava trafik kontrol kaynaklı davranışların her bir uçuş safhasına göre tespit edilmesini ve Türk hava sahası için yakıt tüketimini azaltacak hava sahası tasarımı ya da uçuş prosedürleri gibi önerilerin test edilmesini kolaylaştıracaktır. Ayrıca, Türk hava sahasındaki her bir uçuşun uçuş verimsizliğinin ölçülmesiyle çevresel anlamda

mümkün olduğunca optimuma en yakın uçuşun gerçekleştirilebilmesi amacıyla hava trafik kontrole yardımcı olacaktır.

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen analizlere ilave olarak, ileriki dönemlerde yapılması planlanan/öngörülen diğer çalışmalar şu şekildedir:

- Bu çalışmada hesaplanan LTO safha süreleri gerçek uçuş verilerine dayalı olarak ortaya çıkarılmıştır. Yapılacak simülasyon çalışmaları ile her bir havaalanı için LTO safha sürelerinin azaltılmasına yönelik iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilecektir. Böylelikle LTO safhalarındaki yakıt tüketimi ve emisyon değerlerinin düşürülmesi amaçlanmaktadır.
- Tez kapsamında yapılan analizler neticesinde ATM uçuş verimsizliğinin uçuş süresi, uçuş mesafesi, yakıt tüketimi ve emisyon salınımına ait kazançlara bağlı olduğu ortaya konulmuştur. Bu kazançların elde edilmesi amacıyla havaalanındaki özellikle taksi sürelerinin azalmasını sağlayacak önlemler alınmalı, TMA kullanım etkinliği sağlanmalı ve daha kısa rotalarla yol ağları düzeltilmelidir. Bu iyileştirmelerle yakıt tüketiminde ve buna bağlı olarak emisyonda azalma elde edilerek çevreye olumlu yönde direkt bir etki sağlanması söz konusu olacaktır. Bu tez kapsamında TMA ve yol safhası bir bütün olarak ele alınarak ilgili safhanın ATM uçuş verimsizlik analizleri gerçekleştirilmiştir. İleriki çalışmalarda bu safhaların ayrı ayrı ele alınarak özellikle TMA içerisinde yapılacak prosedürel iyileştirmelerin yakıt tüketimine etkileri ortaya konulması planlanmaktadır.
- ATM uçuş verimsizlik modelinin oluşturulmasında kullanılan uçuş verisi sayısının artırılması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Civil Aviation Navigation Services Organisation (CANSO), *ATM Global Environment Efficiency Goals for 2050*, Aralık, 2008
- [2] Clean Sky Team, *Clean Sky Info Day*, Ankara, 13 Temmuz 2011
- [3] EUROCONTROL, *ATM Flight Efficiency and Its Impact On Environment*, 2002
- [4] Baughcum, S. L., Tritz, T. G., Henderson, S. C., & Pickett, D. C., *Scheduled aircraft emission inventories for 1992: Database development and analysis*. NASA Center for Aerospace Information, Hanover, MD, US, 1996
- [5] Gardner, R. M., Adams, K., Cook, T., Deidewig, F., Ernedal, S., Falk, R., Fleuti, E., Herms, E., Johnson, C. E., Lecht, M., Lee, D. S., Leech, M., Lister, D., Massé, B., Metcalfe, M., Newton, P., Schmitt, A., Vandenberg, C., & Drimmelen, R. *The ANCAT/EC global inventory of NO_x emissions from aircraft*. *Atmospheric Environment*, 31(12), 1751–1766, 1997.
- [6] Schafer, K., Jahna, C., Sturmb, P., Lechnerb, B., & Bacher, M., *Aircraft emission measurements by remote sensing methodologies at airports*, *Atmospheric Environment*, 37, 5261–5271, 2003.
- [7] Eyers, C. J., Addleton, D., Atkinson, K., Broomhead, M. J., Christou, R., Elliff, T., Falk, R., Gee, I., Lee, D. S., Marizy, C., Michot, S., Middel, J., Newton, P., Norman, P., Plohr, M., Raper, D., & Stanciou, N. (2004). *AERO2k Global Aviation Emissions Inventories for 2002 and 2025*, European Commission, 2004.
- [8] Kim, B., Fleming, G., Balasubramanian, S., Malwitz, A., Fleming, G., Lee, J., Balasubramanian, S., Waitz, I., Klima, K., Locke, M., Holsclaw, C., Morales, A., McQueen, E., & Gillette, W., *System for Assessing Aviation's Global Emissions (SAGE), version 1.5, Global Aviation Emissions Inventories for 2000 through 2004*, Report FAA-EE-2005-02, Federal Aviation Administration, Office of Environment and Energy, Washington, DC, 2005
- [9] Unal, A., Hu, Y., Chang, M. E., Odman, M. T., & Russell, A. G., *Airport related emissions and impacts on air quality: Application to the Atlanta International Airport*. *Atmospheric Environment*, 39, 5787–5798, 2005

- [10] Carslaw, D. C., Ropkins, K., Laxen, D., Moorcroft, S., Marner, B., Williams, M. L., *Near-field commercial aircraft contribution to nitrogen oxides by engine, aircraft type, and airline by individual plume sampling*, Environmental Science & Technology, 42, 1871–1876, 2006
- [11] Farias, F., Apsimon, H., *Relative contributions from traffic and aircraft NO_x emissions to exposure in West London. Environmental Modelling and Software*, 21,477–485, 2006.
- [12] Williams, N., Noland, R.B., *Comparing the CO₂ emissions and contrail formation from short and long haul air traffic routes from London Heathrow*, Elsevier Ltd., 487-495, 2006
- [13] Tsague, L., Tsogo, J., Tatietsse, T. T., *Prediction of the production of NO_x in turbojet engines. Atmospheric Environment*, 40, 5727–5733, 2006.
- [14] Graham, A., Raper, D. W., *Transport to ground of emissions in aircraft wakes. Part II: Effect on NO_x concentrations in airport approaches. Atmospheric Environment*, 40, 5824–5836, 2006.
- [15] Schurmann, G., Schafer, K., Jahn, C., Hoffmann, H., Bauerfeind, M., Fleuti, E., & Rappengluck, B., *The impact of NO_x, CO and VOC emissions on the air quality of Zurich airport. Atmospheric Environment*, 41, 103–118, 2007.
- [16] Winther, M., Kousgaard, U., & Oxbel, A., *Calculation of odour emissions from aircraft engines at Copenhagen Airport. Science of the Total Environment* 366(1), 218–232, 2006.
- [17] International Civil Aviation Organisation (ICAO), *Doc. 9889. Airport Air Quality Guidance Manual, 2007*
- [18] International Civil Aviation Organisation (ICAO), *Doc. 9951. Offsetting Emissions From Aviation Sector, 2011.*
- [19] Ohsfeldt M. et al., *Quantifying the Relationship between ATM Inefficiency, Fuel Burn and Air Pollutant Emissions*, ATM Seminar, 2007
- [20] Kesgin U., *Aircraft Emissions at Turkish Airports*, Journal of Energy, 2006
- [21] Celikel, A. *Airport local air quality studies; case study: Emission inventory for Zurich Airport with different methodologies*, Eurocontrol Experimental Centre, Rep. No. EEC/SEE/2004/010,

- [22] UNIQUE SWISS, *Aircraft NOx-Emissions within the Operational LTO Cycle*, 2004
- [23] Elbir T., *Estimation of Engine Emissions from Commercial Aircraft at a Midsized Turkish Airport*, Journal of Environmental Engineering, 2008
- [24] Simic T., Babic O., *Airport Traffic Complexity and Environment Efficiency Metrics for Evaluation of ATM Measures*, Journal of Air Transport Management, syf 260-271, 2015
- [25] International Civil Aviation Organisation (ICAO), *Doc 9931 Continuous Descent Operations (CDO) Manual*, 2010
- [26] International Civil Aviation Organisation (ICAO), *Doc 9993 Continuous Climb Operations (CDO) Manual*, 2010
- [27] Wubben, F.J.M. and Busink, J.J., *Environmental benefits of continuous descent approaches at Schiphol Airport compared with conventional approach procedures*, NLR-TP-2000-275, 2000.
- [28] Tong, K., Warren, A.W. and Brown, J.A., *Continuous descent approach procedure development for noise abatement tests at Louisville International Airport, KY*, AIAA, 2003.
- [29] Clarke, J.P.B., Ho, N.T., Ren, L., Brown, J.A., Elmer, K.R., Tong, K. and Wat, J.K., *Continuous descent approach: design and flight test for Louisville International Airport*, Journal of Aircraft, Vol. 41 No. 5, 2004.
- [30] Wilson, I. and Hafner, F. (2005), *Benefit assessment of using continuous descent approaches at Atlanta*, Proceedings of the 24th Digital Avionics Systems Conference, DASC 2005.
- [31] Sprong, K., Klein, K., Shioutsuki, C., Arrighi, J., ve Liu, S., *Analysis of Air Continuous Descent Arrival Operations at Atlanta and Miami*, IEEE, 2008
- [32] Stibor, J. ve Nyberg, A., *Implementation of Continuous Descent Approaches at Stockholm Arlanda Airpor, Sweden*, IEEE, 2009
- [33] Alcabin M., Schwa R.W., Soncrant C., Tong K., Cheng S., *Measurin Vertical Flight Path Efficiency in the National Airspace System*, 9th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 2009
- [34] Turgut E., Usanmaz O., Canarlanlar O. and Sahin O., *Energy and Emission Assessment of Continuous Descent Approach*, Aircraft Engineering and

Aerospace Technology: An International Journal Volume 82 · Number 1 ·
2010 · 32–38

- [35] Canarslanlar O., Turgut E. ve Usanmaz O., *CDA Prosedürünün Enerji ve Emisyon Değerlendirmesi, Sabiha Gökçen Havaalanı Uygulaması*, III. Ulusal Havacılık Konferansı, Eskişehir, 2010
- [36] Miller M., Graham M., Aldous J., "*Efficient Climb and Descent Benefit Pool*", 2011, IEEE
- [37] Cao Y., Kotegawa T., Sun D., DeLaurentis D., Post J., "Evaluation of Continuous Descent Approach as a Standard Terminal Airspace Operation", 9th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, 2011
- [38] Knorr D., Chen X., Rose M., Gulding J., Enaud P., Hegendoerfer H. "Estimating ATM Efficiency Pools in the Descent Phase of Flight", 9th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, 2011
- [39] Roach K., Robinson J., "A Terminal Area Analysis of Continuous Ascent Departure Fuel Use at Dallas/Fort Worth International Airport, AIAA, 2009
- [40] Walter Johnson, Nhut Ho, Vernol Battiste, Kim-Phuong L. Vu, Joel Lachter, Sarah Ligd, Arik Dao, Patrick Martin "*Management of Continuous Descent Approach During Interval Management Operation*", AIAA, 2010
- [41] Thompson T., Miller B., Murphy C., Augustine S., White T., Souihi S., "Environmental Impacts of Continuous-descent Operations in Paris and New York Regions, Tenth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, 2013
- [42] Harada A., Kozuka T., Miyazawa Y., Wickramasinghe N., Brown M., Fukuda Y., *Analysis of Air Traffic Efficiency Using Dynamic Programming Trajectory Optimization*, 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, Eylül, 2014
- [43] <http://www.iata.org/pressroom/Documents/Flight%20Efficiency%20Plan.pdf>
- [44] http://ec.europa.eu/transport/modes/air/sesar/doc/2010_06_sesar_environment_en.pdf

- [45] http://www.eurocontrol.int/sites/default/files/field_tabs/content/documents/nm/presentations/20111018-uf-ops-hbreton.pdf
- [46] <http://www.enviro.aero/Aviationindustryenvironmentalnews.aspx?NID=219>
- [47] <http://www.enviro.aero/Aviationindustryenvironmentalnews.aspx?NID=436>
- [48] http://www.skyguide.ch/fileadmin/user_upload/publications/ANS%20solutions/CALM.pdf
- [49] Civil Aviation Navigation Services Organisation (CANSO), *Accelerating Air Traffic Management Efficiency: A Call to Industry*, 2012
- [50] International Civil Aviation Organisation (ICAO), *Doc 9929 — Report of the High-level Meeting on International Aviation and Climate Change*, 2008
- [51] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Aviation and The Global Atmosphere*, Cambridge University Press, 1999
- [52] Cavcar A., *Temel Hava Trafik Yönetimi*, Anadolu Üniversitesi Yayınları, Eskişehir, 1998
- [53] International Civil Aviation Organisation (ICAO), *Annex 2 Rules Of The Air*, 2009
- [54] International Civil Aviation Organisation (ICAO), *Annex 11 Air Traffic Services*, 2009
- [55] International Civil Aviation Organisation (ICAO), *Doc. 9426 Air Traffic Services Planning Manual*, 2009
- [56] International Civil Aviation Organisation (ICAO), *Doc. 9689 Manual on Airspace Planning Methodology for the Determination of Separation Minima*, 2011
- [57] International Civil Aviation Organisation (ICAO), *Doc. 4444. Air Traffic Management: Procedures for Air Navigation Services*, 2009
- [58] International Civil Aviation Organisation (ICAO), *Doc. 9854 — Global Air Traffic Management Operational Concept*, 2012
- [59] International Civil Aviation Organisation (ICAO), *Doc.9882 — Manual on Air Traffic Management System Requirements*, 2010
- [60] International Civil Aviation Organisation (ICAO), *Doc 9884 — Guidance on Aircraft Emissions Charges Related to Local Air Quality*, 2012

- [61] EUROCONTROL, Hava seyrüsefer hizmetleri enstitüsü, *Hava trafik hizmetlerinde çevre eğitim kursu*, 8-12 ekim 2012, Lüksemburg.
- [62] Jardine C.N., *Calculating the Environmental Impact of Aviation Emissions*, Environmental Change Institute Oxford University Centre for the Environment
- [63] International Civil Aviation Organisation (ICAO), *Doc 9885 — Guidance on the Use of Emissions Trading for Aviation*, 2012
- [64] Federal Aviation Administration Office of Environment and Energy, *Aviation & Emissions A Primer*, January, 2005
- [65] <http://www.mgm.gov.tr/genel/sss.aspx?s=kuyrukizi>
- [66] Houghton *et al.*, *Climate Change 2001 – The Scientific Basis*, IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, 2001.
- [67] International Civil Aviation Organisation (ICAO), *Doc 9948 — Scoping Study on the Application of Emissions Trading and Offsets for Local Air Quality in Aviation*, 2010.
- [68] Masters, G.M., *Introduction to Environmental and Science*, Prentice Hall International Editions, 1991.
- [69] http://tr.wikipedia.org/wiki/K%C3%BCresel_%C4%B1s%C4%B1nma
- [70] Türkeş, M., Sümer, U. M. ve Çetiner, G., ‘*Küresel iklim değişikliği ve olası etkileri*’, Çevre Bakanlığı, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi Seminer Notları (13 Nisan 2000, İstanbul Sanayi Odası), 7-24, ÇKÖK Gn. Md.,Ankara.
- [71] Bows A., Anderson K., Upham P., *Aviation and Climate Change*, New York, Routledge, 2009
- [72] Rypdal K., *Aircraft Emissions, Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Green house Gas Inventories*.
- [73] Reynolds T., *Development of Flight Inefficiency Metrics for Environmental Performance Assessment of ATM*, Eighth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2009)
- [74] IATA/ EUROCONTROL/CANSO, *Flight Efficiency Plan-Fuel and Emission Savings*, Ağustos, 2008
- [75] Devlet Hava Meydanları İşletmesi 2011 istatistik yılı, sayfa 108

- [76] http://investor.turkishairlines.com/documents/ThyInvestorRelations/download/yillik_raporlar/2011_Faaliyet_Raporu.pdf
- [77] <http://investor.turkishairlines.com/tr/mali-veriler/filo>
- [78] Hammond S., Civil J., Ross M., Slater K., *Air Traffic Control, Business Regulation and CO₂ Emissions*, Operational Research Society, Vol.25,3,127-149, 2012
- [79] ATR Customer Services, *Fuel Saving: Contributing to a Sustainable Air Transport Development*, Ocak,2011, Fransa
- [80] <http://www.dhmi.gov.tr/istatistik.aspx>
- [81] Devlet Hava Meydanları İşletmesi, *Havacılık Bilgi Yayınları (AIP-Aeronautical Information Publication)*, 2014
- [82] <https://www.eurocontrol.int/articles/central-office-delay-analysis-coda>
- [83] <http://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/official-documents/facts-and-figures/coda-reports/>
- [84] Karasar, N., *Bilimsel Araştırma Yöntemleri: Kavramlar, İlkeler, Teknikler*. Nobel Yayın, Ankara, 2008
- [85] Büyüköztürk, Ş., *Sosyal bilimler için veri analizi el kitabı : istatistik, araştırma deseni, SPSS uygulamaları ve yorum*, PeGem A Yayıncılık, Ankara, 2008
- [86] Kalaycı, Ş., *SPSS uygulamalı çok değişkenli istatistik teknikleri*, Asil Yayın Dağıtım, Ankara, 2008
- [87] İslamoğlu A. H., *Sosyal Bilimlerde Araştırma Yöntemleri: SPSS Uygulamalı*, Beta Basım Yayın, İstanbul, 2009
- [88] Altunışık, R., *Sosyal Bilimlerde Araştırma Yöntemleri: SPSS Uygulamalı*, Sakarya Yayıncılık, Sakarya, 2007
- [89] Chou, C. P. ve Bentler, P. M., *Estimates and tests in structural equation modelling. Structural equation modelling: concepts, issues and applications*, Thousand Oaks, CA: Sage, 1995
- [90] Curan, P. J., West, S. G., Finch, J. F., *The robustness of test statistics to nonnormality and specification error in confirmatory factor analysis. Psychological Methods*, 1996

- [91] Akbulut Y., *Sosyal Bilimlerde SPSS uygulamaları*, İdeal Kültür Yayıncılık, İstanbul, 2010
- [92] Sümbüloğlu, K. ve Akdağ, B., *Regresyon Yöntemleri ve Korelasyon Analizleri*, Hatiboğlu Yayınları, Ankara, 2007.
- [93] Yazıcıoğlu Y., Erdoğan S., *SPSS Uygulamalı Bilimsel Araştırma Yöntemleri*, Detay Yayıncılık, Ankara 2004
- [94] Kirkpatrick, L. A., Feeney, B.C., *A Simple Guide to SPSS*, Wadsworth Cengage Learning, Australia, 2009.
- [95] Leech, N., Barrett, K., Morgan, G., *SPSS for Intermediate Statistics*, L. Erlbaum Associates, New York, 2008
- [96] Field, A., *Discovering Statistics Using SPSS*, Sage Publications, Londra, 2009.
- [97] Ural, A. Ve Kılıç, İ., *Bilimsel Araştırma Süreci ve SPSS ile Veri Analizi*, Detay Yayıncılık, Ankara, 2006
- [98] Carver, N., Nash, J., *Doing data analysis with SPSS version14*, Thomson-Brooks/Cole, Belmont, 2006